

Kommunale Klimaanpassung im Welterbe Oberes Mittelrheintal

Studie zu Möglichkeiten kommunaler Klimaanpassung im Welterbe Oberes Mittelrheintal 2020

Impressum

Diese Studie wurde im Rahmen eines Kooperationsvertrages zwischen der Entwicklungsagentur RLP e.V. und den drei o.g. Hochschulen unter Federführung der Hochschule Koblenz in 2019/2020 erstellt und durch die Entwicklungsagentur RLP e.V. finanziell unterstützt.

Das vorliegende Ergebnis ist eine Berichts-Rohfassung und stellt damit noch keine druckreife Publikation dar.

Verfasser*innen:

Technische Hochschule Bingen, FB 1 - Life Sciences and Engineering

Prof. Dr. Elke Hietel

Prof. Dr. Oleg Panferov

Tanja Reichling

Ingmar Blonzen

Hochschule Geisenheim University, Institut für Landschaftsplanung und Naturschutz

Prof. Dr. Eckhard Jedicke

Dr. Martin Reiss

Hochschule Koblenz, FB bauen-kunst-werkstoffe

Prof. Ulrike Kirchner

Prof. Dr. Dörte Ziegler

Tanja Busa

Marcel Kimmel

Daniel Klasen

Janina Weske

Verwertet wurden studentische Projektarbeiten aus dem Sommersemester 2020 von Studierenden der Hochschule Koblenz, FB bauen-kunst-werkstoffe, Wahlmodul „Klimaanpassung in Kommunen“ wie folgt:

Franziska Gelhard, Thomas Kaspar, Daniel Klasen, Robert Oblinger, Mike Peters, Benjamin Schwalm, Hans-Bernhard Steffes, Gina Stratmann, Pascal Wintgens und Jeannine Zerwas

Fertigstellung: Dezember 2020

Zitierhinweis: Kirchner, U. (Koord.), Busa, T., Hietel, E., Jedicke, E., Panferov, O., Reiss, M., Ziegler, D. (2020): Kommunale Klimaanpassung im Welterbe Oberes Mittelrheintal. Studie, erstellt in Kooperation der Technischen Hochschule Bingen, der Hochschule Geisenheim University, der Hochschule Koblenz und der Entwicklungsagentur Rheinland-Pfalz. Mitarbeit: Blonzen, I., Kimmel, M., Klasen, D., Linz, S., Reichling, T., Schafranski, F., Weske, J. - Pdf-Datei, verfügbar über die Hochschulen

INHALTSVERZEICHNIS

Einführung.....	1
1.1 Anlass der Studie.....	1
1.2 Zielsetzung und erkenntnisleitende Fragestellungen	2
1.3 Vorgehensweise und Methodik.....	3
2 Gesamträumliche Betrachtung des Oberen Mittelrheintals	5
2.1 Das Tal – als Welterbe	6
2.2 Das Tal – Lage und naturräumliche Gliederung	8
2.3 Topografie, Relief, Geologie und Boden	8
2.4 Wassernutzung und Gewässer	9
2.5 Die Kulturlandschaft im Oberen Mittelrheintal.....	11
2.6 Die Siedlungsräume - Städte, Orte und Dörfer	14
3 Klimawandel im Oberen Mittelrheintal.....	15
3.1 Globaler Klimawandel: Lufttemperatur.....	16
3.2. Klimawandel in Deutschland	17
3.3. Klimawandel in Rheinland-Pfalz.....	19
3.4. Klimawandel im gesamten und Oberen Mittelrheintal.....	21
Entwicklung der Lufttemperatur	21
Entwicklung des Niederschlags	28
Zusammenfassung.....	34
3.5. Folgen des Klimawandels für das Obere Mittelrheintal.....	34
Wassertemperatur	34
Starkniederschläge und Sturzfluten	34
Hoch- und Niedrigwasser des Rheins.....	35
Abgeleitete Folgen für Grundwasserneubildung und Wasserversorgung.....	37
4 Bedeutung von Landschaftselementen und Land-nutzungen zur Steuerung des regionalen und lokalen Klimas.....	38
4.1 Grünstrukturen.....	38
Klimaökologische Leistung verschiedener Grünstrukturen.....	41
Handlungsmöglichkeiten zur Erweiterung von Grünstrukturen	45
4.2 Wassernutzung und Gewässer	48
Umgang mit Starkregen	49
Private Bauvorsorge als Starkregenvorsorge	55
Wasser zur Kühlung.....	55
Folgen für die Wasserbereitstellung und mögliche Maßnahmen	57

Umgang mit Hoch- und Niedrigwasser.....	57
4.3. Bodenversiegelung	59
Formen und Entwicklung der Bodenversiegelung.....	60
Bedeutung von Bodenversiegelungen in urbanen Ökosystemen (Boden- und Wasserhaushalt sowie Klima).....	63
4.4 Kaltluftentstehungsgebiete und -bahnen.....	65
Zuordnung von typischen Kaltluft- bzw. Kälteproduktionsraten in Quellgebieten mit unterschiedlichen Landnutzungen	65
Bedeutung der Sicherung und Verbesserung von Kaltluftentstehungsgebieten und -bahnen für das örtliche Klima	67
Maßnahmen nach dem Raumordnungsplan Mittelrhein-Westerwald	69
5 Betroffenheit der Kommunen im Oberen Mittelrheintal durch den Klimawandel in ausgewählten Teilräumen.....	70
5.1 Kriterien und Methodik der Auswahl exemplarischer Kommunen.....	70
5.2 Betroffenheit unter dem Aspekt Versiegelungsgrad des Bodens: Flächenverbrauch ..	72
5.3 Betroffenheit unter dem Aspekt der Hitzebelastung	77
Kriterien zur Einschätzung der Hitzebelastung	78
Betroffenheit von Boppard.....	79
Betroffenheit von St. Goar	83
Betroffenheit von St. Goarshausen	87
5.4 Betroffenheit im Themenfeld Wasser.....	90
Kriterien zur Beurteilung von Wassernutzung und Gewässern.....	90
Betroffenheit von Boppard.....	92
Betroffenheit von St. Goar	96
Betroffenheit von St. Goarshausen	100
5.5 Betroffenheit unter dem Aspekt der Kaltluftsischerung	105
Betroffenheit der Kommunen im Teilraum 1 Boppard.....	105
Betroffenheit der Kommunen im Teilraum 2 St. Goar und St. Goarshausen.....	111
5.6 Zusammenfassende Betrachtung der Betroffenheit und Ableitung von Handlungsbedarfen.....	113
6 Kommunale Handlungsvorschläge und Maßnahmen zur Klimaanpassung	116
6.1 Maßnahmen im Bereich von Grünstrukturen.....	116
6.2 Maßnahmen zu Wassernutzung und Gewässern	124
6.3 Maßnahmen zur Offenhaltung und zum Schutz des Bodens - Handlungsmöglichkeiten zur Verringerung und Kompensation von Bodenversiegelungen	132
6.4 Maßnahmen zur Sicherstellung und Verbesserung von Kaltluftentstehungsgebieten und -bahnen.....	135

7	Steuerungsinstrumente und Fördermöglichkeiten.....	137
7.1	Steuerungsinstrumente	137
7.2	Fördermöglichkeiten	137
8	Anhang	A
8.1	Abbildungen und Tabellen	A
8.2	Methoden	E
	Kombinationen von Szenarien, Globalen und Regionalen Klimamodellen.....	E
	Räumliche Erfassung des Welterbegebietes	F
	Ortsbegehungen zur Abschätzung der Betroffenheit	I
9	Literaturverzeichnis.....	J
	Abbildungsverzeichnis.....	V
	Tabellenverzeichnis	DD

EINFÜHRUNG

1.1 ANLASS DER STUDIE

Das Gebiet des Welterbes Oberes Mittelrheintal plant für das Jahr 2029 die Durchführung einer Bundesgartenschau. Damit sollen im Tal neue Impulse zum Erhalt und zur Verbesserung der Umwelt- und Lebensqualität sowie zur Förderung des Tourismus gesetzt werden.

Der Prozess hierzu ist seit Jahren im Gange: eine Machbarkeitsstudie ist erstellt und die Kommunen sind im intensiven Dialog über Zielsetzungen, Konzepte und Maßnahmen. Viele Gemeinden rüsten sich und planen ihre Orte zu entwickeln, neue Lebens- und Aufenthaltsqualitäten zu schaffen, die Attraktivität für Bewohner und mögliche Gäste zu steigern.

Was hat das mit Klimawandel und Klimaanpassung zu tun?

Der Klimawandel stellt eine enorme **Herausforderung** dar, sowohl an eine Gartenschau als auch an die Kommunen und ihre Bewohner: sie müssen sich auf Hitze, Dürre, Stürme, Starkregen und Sturzfluten, Niedrig- und Hochwasser einstellen. Auch die Region Oberes Mittelrheintal ist von Klimawandelfolgen betroffen. Fährt man durchs Rheintal, erkennt man bereits großflächig die Spuren von Trockenheit und Borkenkäferbefall in den Wäldern. Starkregenereignisse und Sturzfluten haben in den letzten Jahren zu Hangrutschen und Murenabgängen geführt. Zunehmende Hitzetage sind in der sowieso schon warmen Region zu verzeichnen und machen manchem Wanderer oder Einheimischen die heißen Sommertage schwer. Die Winzer klagen über Sommertrockenheit.

Der Klimawandel und die Art und Weise, wie sich die Kommunen in der Region auf dessen Folgen einstellen, gehören zu den Faktoren, die Einfluss darauf haben können, ob und inwieweit die Erwartungen an die BUGA erfüllt werden können. Kommen genügend Besucher, wenn die Sommer erdrückend heiß werden, reichen die veranschlagten Mittel für den steigenden Wasserbedarf der Pflanzungen, wie sorgt man für das Wohlbefinden der Besucher und wie schützt man sie bei eventuellen Sturzfluten? Nicht zuletzt geht es um die Vorsorge für gesunde Lebens- und Existenzbedingungen für die Menschen, die hier auch nach der BUGA dauerhaft leben und arbeiten wollen. Die Art und Weise, wie sich die Kommunen in der Region auf den Klimawandel vorbereiten, ihn in ihren Planungen vorausschauend berücksichtigen und ihre Kommunen schützend stärken, wird ein wesentlicher Erfolgsfaktor sein.

Zum vorsorgenden Umgang mit dem Klimawandel gehören Klimaschutz und Klimaanpassung gleichermaßen.

Während der Klimaschutz eher darauf zielt, die weitere Erderwärmung zu mindern und dafür zu sorgen, dass weniger Treibhausgase, vor allem weniger CO₂, in die Atmosphäre abgegeben werden, zielt Klimaanpassung darauf, die Schäden infolge des Klimawandels zu begrenzen und das Risiko zu mindern.

„Anpassung [an die globale Erwärmung] hat das Ziel, sich mit [den aufgrund der globalen Erwärmung] bereits erfolgten Klimaänderungen zu arrangieren und auf zu erwartende Änderungen so einzustellen, dass zukünftige Schäden [so weit wie möglich] vermieden werden

können" (Bundeszentrale für politische Bildung [bpb], 2009) oder auch Chancen, wo sie entstehen, genutzt werden. Die Anpassung kann „entweder reaktiv oder proaktiv (vorsorgend) erfolgen und betrifft sowohl soziale als auch natürliche Systeme" (bpb, 2009). Man spricht auch von der Anpassung (oder Adaptation) an den Klimawandel oder kurz von Klimaanpassung.

Vor diesem Hintergrund wurde die Arbeitsgemeinschaft der drei beteiligten Hochschulen (Hochschule Koblenz, Technische Hochschule Bingen und Hochschule Geisenheim) gebildet, um für die Kommunen im Tal eine **Studie zur Klimaanpassung** zu erstellen.

Erforderliche Strategien können regional sehr unterschiedlich sein. Voraussetzung ist zunächst, dass Klimaveränderungen von den Zuständigen in den Kommunen erkannt und wahrgenommen werden. Ein Überblick über die zu erwartenden Klimaveränderungen, mögliche Schwellenwerte für bestimmte Klimaveränderungen und mögliche Risiken sind zu identifizieren, um hierauf entsprechende Maßnahmen aufzubauen. Neben der Analyse der aktuellen und zukünftigen Betroffenheit ist eine Sensibilisierung der Kommune und ihrer Bürger wichtig.

Die Studie richtet sich in ihren Aussagen und Empfehlungen sowohl an die Kommunalverwaltung, als auch an politische Vertreter*innen und Bürger*innen.

1.2 ZIELSETZUNG UND ERKENNTNISLEITENDE FRAGESTELLUNGEN

Im Fokus der Studie steht nicht der Klimaschutz, sondern die Klimaanpassung durch die Kommunen im Welterbe-Gebiet. Dabei sind Ziele der Studie, sowohl den aktuellen Stand zu Klimawandelfolgen im Welterbe-Gebiet Oberes Mittelrheintal zu beleuchten als auch für einzelne Handlungsfelder konkrete Vorschläge zu entwickeln, wie die Kommunen sich auf die Auswirkungen des Klimawandels vorbereiten können.

Die Anpassung der Bundesgartenschau selbst an die Erfordernisse des Klimawandels, mit Durchführungsmaßnahmen wie Gestaltung der Ausstellungsflächen, Pflanzenwahl oder Pflege- und Unterhaltungsmaßnahmen, ist nicht Gegenstand dieser Studie. Dies schließt nicht aus, dass mögliche Zusammenhänge zwischen der kommunalen und BUGA-bezogenen Klimaanpassung, beispielsweise die unterstützende Funktion kommunaler Klimaanpassung, angesprochen werden.

Die Vorgehensweise bei der Erarbeitung der Studie begleiten vier erkenntnisleitende Fragestellungen:

- Wie sind Kommunen im Mittelrheintal vom Klimawandel betroffen?
- Was können Kommunen tun, um sich an den Klimawandel anzupassen?
- Welche Herausforderungen bestehen und welche positiven Beispiele gibt es?
- Welche Möglichkeiten der Steuerung und Umsetzung gibt es?

In der Studie werden zunächst Daten über Klimawandel im Welterbe-Gebiet Oberes Mittelrheintal recherchiert, der aktuelle Erkenntnisstand aus der Arbeit der drei Hochschulen zusammengetragen und zu erwartende Entwicklungen vor dem Hintergrund der globalen Entwicklungen und der bestehenden räumlichen Rahmenbedingungen prognostiziert werden.

Aufbauend darauf sollen kommunale Möglichkeiten zur Vorsorge, zur Vermeidung und Minimierung negativer Folgen des Klimawandels exemplarisch erarbeitet und dargestellt werden.

1.3 VORGEHENSWEISE UND METHODIK

Ausgehend davon, dass unterschiedliche naturräumliche, topografische und nutzungsbedingte Gegebenheiten die klimatischen Verhältnisse und damit die mögliche Betroffenheit von Folgen des Klimawandels beeinflussen, setzt sich das Folgekapitel intensiver mit den regionalen Gegebenheiten und Charakteristika des Welterbes auseinander und versucht eine grobe „Gesamträumliche Betrachtung des Oberen Mittelrheintales“ vorzunehmen. Ziel dieser Beschreibung ist, das Tal und seine unterschiedlichen Teilräume zu verstehen, mögliche Betroffenheit von Klimawandelfolgen einschätzen zu können und Kriterien für die Festlegung der Untersuchungsräume herauszuarbeiten.

Im Kapitel „Klimawandel im Oberen Mittelrheintal“ gibt die Studie einen Überblick zum Stand des globalen Klimawandels und stellt Zusammenhänge zum Stand in Deutschland, Rheinland-Pfalz sowie vertiefend den Bereich des Oberen Mittelrheintals dar. Relevante Schwerpunkte sind hierbei die Entwicklung der Lufttemperatur und die Entwicklung der Jahresniederschläge. Abschließend werden die Folgen der Klimaveränderungen und Anpassungserfordernisse für das Obere Mittelrheintal zusammengefasst. Temperaturentwicklung sowie Niederschlagsentwicklung und die Klimaprojektionen für die Zukunft mit den Folgen des bisherigen und zu erwartenden Klimawandels sind dabei besonders relevant.

Das Folgekapitel legt den Fokus, noch nicht regionalspezifisch, auf die „Bedeutung von Landschaftselementen und Landnutzungen zur Steuerung des regionalen und lokalen Klimas“. Es widmet sich im Besonderen der Bedeutung und Relevanz von Grünstrukturen, den Gewässern, dem Boden und den Kaltluftentstehungsgebieten und -abflussbahnen sowie ihrem jeweiligen Anteil am Einfluss aufs (Klein-)Klima. Dahinter steht die Frage, welche Bedeutung diesen Elementen im Hinblick auf ihre Beeinflussung des Klimas zukommt oder was sie im Sinne der Anpassungserfordernisse bewirken oder leisten können?

Im Kapitel „Betroffenheit der Kommunen im Oberen Mittelrheintal durch den Klimawandel“ geht es um die Identifizierung von konkreten Problemfeldern im Oberen Mittelrheintal. Gearbeitet wird anhand ausgewählter Teilräume bzw. exemplarischer Kommunen. Mit Hilfe eines Transekts werden sowohl die Höhen (-dörfer) als auch exemplarische Orte im Tal erfasst und differenzierter betrachtet. Analysiert werden hierbei Hitze- und Risikopotenziale insbesondere durch Betrachtung von Grünbestand, Zustand der Gewässer, Kaltluftentstehungsgebieten und -bahnen sowie dem Versiegelungsgrad des Bodens. Im Folgenden wird die Übertragbarkeit auf weitere Teilräume oder Kommunen im Tal geprüft.

Das Kapitel „Kommunale Handlungsvorschläge zur Klimaanpassung“ stellt daraufhin exemplarisch konkrete Maßnahmenvorschläge zusammen, wobei die Schwerpunkte auf den Handlungsfeldern Grünstrukturen, Gewässer, Boden und Sicherung der Kaltluftentstehung und -ableitung liegen.

Abschließend zeigt die Studie Möglichkeiten der Unterstützung von Klimaanpassungsmaßnahmen durch adäquate Steuerungsinstrumente (z.B. in der Bauleitplanung) und entsprechende Fördermöglichkeiten auf.

Die Arbeit im Oberen Mittelrheintal erfolgte sowohl durch Vor-Ort-Begehungen, Kartierungen und Messungen als auch durch die Auswertung einschlägiger, im Anhang aufgeführter Datengrundlagen (siehe Kapitel 8.2 Methoden, Seite E f. im Anhang). Diese dienten auch als Grundlage für die erstellten und im Text abgebildeten Karten.

2 GESAMTRÄUMLICHE BETRACHTUNG DES OBEREN MITTELRHEINTALS

Das Obere Mittelrheintal ist von den Folgen des Klimawandels besonders betroffen (vgl. Kap. 3.5). Zwischen Koblenz und Bingen, zwischen rechter und linker Rheinseite, zwischen den Hochebenen und den Tallagen, in besiedelten Räumen, den Waldflächen, den Weinhängen und den vielfältigen Seitentälern lassen sich unterschiedliche Auswirkungen von Klimawandelfolgen finden.

Um in den zu entwickelnden Empfehlungen in dieser Studie über generelle Aussagen hinausgehen zu können, ist es wichtig sich zunächst einen Überblick über das gesamte Tal zu verschaffen und dann exemplarische Orte als Fallbeispiele zu vertiefen. Dabei soll in dieser Studie aber nicht das ganze Tal untersucht werden, sondern der Schwerpunkt auf den Siedlungsräumen sowie ihren Wechselwirkungen mit den das Klima beeinflussenden, naturräumlichen und baulich-kulturellen Gegebenheiten liegen.

Die möglichen Auswirkungen Klimawandel-bedingter Extremwetter (Hitze, Trockenheit, Starkregen und Hochwasser) werden unter den Themen- und Handlungsfeldern der Grünstrukturen, der Gewässer und Wassernutzungen, der Frisch- oder Kaltluftsicherung sowie der Auswirkungen auf den Boden vertiefend betrachtet.

Im Hinblick auf Maßnahmen zur Klimaanpassung ist es wichtig zu überprüfen, inwieweit diese sich möglicherweise mit Zielen und Belangen der Raumordnung, Landschaftsentwicklung und Baukultur überschneiden oder ob sich hier ggf. Konflikte ergeben könnten. Auch die Bedeutung, die der Entwicklung des Oberen Mittelrheintales seit seiner Anerkennung als UNESCO Welterbestätte im Jahr 2002 zukommt, kann u.U. ähnlich wie bei Fragen der Denkmalpflege zu Konflikten bei eventuellen Anpassungsvorschlägen führen.

2.1 DAS TAL – ALS WELTERBE

Im Jahr 2002 wurde die Kulturlandschaft Oberes Mittelrheintal von der UNESCO als Welterbestätte anerkannt. Einzigartigkeit, Authentizität (historische Echtheit) und Integrität (Unversehrtheit) waren dabei die Kriterien, die zur Aufnahme in die Welterbeliste führten. Entscheidungskriterien waren letztendlich die Kriterien II, IV, V der Welterbekonvention. Mit der Anerkennung ist die Verpflichtung zur Wahrung von Authentizität und Integrität der Welterbestätte verbunden. Hieraus resultieren für die beiden Landkreise und vor allem für ihre Kommunen neue Aufgaben zur Sicherung der baukulturellen und landschaftlichen Identität.

Kriterien der Welterbekonvention

Angemeldete Güter von außergewöhnlichem und universellem Wert sollten folgende Kriterien erfüllen:

ii) für einen Zeitraum oder in einem Kulturgebiet der Erde einen bedeutenden Schnittpunkt menschlicher Werte in Bezug auf die Entwicklung der Architektur oder Technik, der Großplastik, des Städtebaus oder der Landschaftsgestaltung aufzeigen;

iv) ein hervorragendes Beispiel eines Typus von Gebäuden, architektonischen oder technologischen Ensembles oder Landschaften darstellen, die einen oder mehrere bedeutsame Abschnitte der Geschichte der Menschheit versinnbildlichen;

v) ein hervorragendes Beispiel einer überlieferten menschlichen Siedlungsform, Boden- oder Meeresnutzung darstellen, die für eine oder mehrere bestimmte Kulturen typisch ist, oder der Wechselwirkung zwischen Mensch und Umwelt, insbesondere, wenn diese unter dem Druck unaufhaltsamen Wandels vom Untergang bedroht wird;

Auszug aus den Richtlinien für die Durchführung des Übereinkommens zum Schutz des Kultur- und Naturerbes der Welt - (UNESCO World Heritage Center [UNESCO WHC], 2017)

Die Abbildung 1 auf der Folgeseite zeigt die Grenzen des Welterbegebietes mit Kernbereich und Rahmenbereich sowie die dazugehörigen Landkreise bzw. kreisfreien Städte und Gemeinden.



Abbildung 1 Räumliche Ausdehnung des Welterbes Oberes Mittelrheintal und Verwaltungsgrenzen (Quelle: Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz [MWKEL RLP], 2013b)

2.2 DAS TAL – LAGE UND NATURRÄUMLICHE GLIEDERUNG

Das Obere Mittelrheintal ist zwischen Bingen und Koblenz fast 70 km lang und gehört nach der naturräumlichen Gliederung Deutschlands zum Rheinischen Schiefergebirge.

Hierbei gliedert sich das Obere Mittelrheintal in fünf verschiedene Abschnitte:

1. den weiten Flussraum der „Binger Pforte“ mit den Orten Bingen und Rüdesheim,
2. dann das „Bacharacher Tal bis Oberwesel“ und
3. von dort das „St. Goarer Tal“ bis kurz vor Boppard. Dieser Abschnitt bildet das enge, gebirgige und felsige Tal mit der Loreley, mit schmalen V-förmigen Seitentälern, Talverengungen und Höhenplateaus, der sich
4. ab Boppard (Rheinschleife) weicher mäandierend entwickelt (Bopparder Schlingen)
5. und sich dann im Bereich der „Lahnsteiner Pforte“ und Koblenz zum Neuwieder Becken hin öffnet.

Die Westseite des Tals bilden Ausläufer des Rheinhunsrücks wogegen rechtsrheinisch unterschiedliche Bereiche des Taunus das Mittelrheingebiet begrenzen. Felshänge, terrassierte Weinberge sowie Transportwege, den Fluss beidseitig begleitende Straßen und Bahnstrecken, prägen das Erscheinungsbild. Das enge Tal ist mit den Verkehrsachsen, der Flussschifffahrt und den Güterbahnstrecken ein wichtiges Nadelöhr zwischen Nord- und Südeuropa. Im Vergleich zur Kleinteiligkeit der Talhänge finden sich auf den Höhenlagen große landwirtschaftliche Flächen und – vor allem linksrheinisch durch die gute Autobahnanbindung der A 61 – auch Gewerbeansiedlungen.

Das Welterbe-Gebiet ist stark siedlungsgeprägt. Hier liegen knapp 50 Dörfer, kleine Städte und Siedlungen. Davon sind ungefähr die Hälfte „Rheinorte“ und die andere Hälfte „Höhenorte“. Sieht man von Koblenz, Lahnstein und Bingen ab, ist Boppard mit über 20.000 EW der größte Ort des Tales.

2.3 TOPOGRAFIE, RELIEF, GEOLOGIE UND BODEN

Topografie und Relief sowie das Ausgangsgestein sind bestimmend für das besonders milde Klima im Talraum. Das Wasser des Flusses bildet makroklimatisch einen großen Wärmespeicher, der auch in den Wintermonaten ausgleichend wirkt und für mildes Klima sorgt. Durch die Tallage streichen kühle Winde über das Tal hinweg ohne das Flussklima selber zu beeinflussen. So kann das Wasser temperatúrausgleichend wirken (MWKEL RLP, 2013c). Die Geologie mit Quarzit, dunklem Tonschiefer oder Sandstein und Grauwacke verstärkt die Wärmespeicherung (Zweckverband Welterbe Oberes Mittelrheintal, o.J.). Je nach Lage bergen insbesondere die steilen, südexponierten Felshänge durch Besonnung in heißen Sommermonaten Erhitzungspotenziale. Gleichzeitig sind die steil ansteigenden Talhänge besonders der Gefährdung im Falle von Starkregen/Sturzfluten ausgesetzt.

Zwischen Tal und Höhenrücken liegen bis zu 130 Höhenmeter Unterschied (70-200 m über Meeresspiegel). Man kann von einer Temperaturabnahme von ca. 0,6° pro 100 Höhenmeter ausgehen (Müller-Westermeier, 1995). Damit können Temperaturunterschiede zwischen den Tallagen und den Höhendörfern zwischen 1° und 2°, mancherorts sogar bis zu 6° betragen.

Vor allem der Abschnitt des Bacharacher und des St. Goarer Tales, d.h. des südlichen Abschnittes des Oberen Mittelrheintales, ist von Enge und vielen Seitentälern geprägt. Mal münden diese von Osten (im südlichen Abschnitt) mal von Westen (zwischen Niederheimbach und Oberwesel) in das Rheintal. Häufig sind diese Seitentäler identisch mit zulaufenden Bächen und bilden gleichzeitig wichtige Frischluftschneisen. Während im felsigen Tal die Wärme gespeichert wird, bilden die Höhenlagen mit ihren großen offenen, zum Teil ackerbaulich genutzten Flächen die Kaltluftentstehungsgebiete. Neben den ackerbaulich genutzten Bereichen spielen für die Kalt- und Frischluftentstehung auch die bewaldeten Hänge eine große Rolle. Die Kaltluft strömt durch die Seitentäler ins Flusstal. Je breiter die Täler, desto kühler sind deren untere Bereiche. Insofern sind die Frischluftschneisen und ihre Freihaltung besonders für die im Tal liegenden Orte relevant, denn sie sorgen hier für die erforderliche Kühlung.

2.4 WASSERNUTZUNG UND GEWÄSSER

Das Mittelrheintal wird vom **Rhein** geprägt. Der Rhein wird als Wasserstraße genutzt, weiterhin zur Trinkwassergewinnung und zur Niederschlags- und Abwasserableitung. Der Rhein teilt das Tal, in dem eine Überquerung zwischen Mainz und Koblenz allein per Fähren möglich ist. Der mittlere Abfluss des frei fließenden Mittelrheins (Pegel Kaub) beträgt 1650 m³/s, mit Schwankungen zwischen Niedrig- und Hochwasserabflüssen zwischen 770 und 4270 m³/s (Bundesanstalt für Gewässerkunde [BfG], 2020).

Der Rhein ist die wichtigste Bundeswasserstraße in Deutschland. Im Rhein-Korridor werden ca. 88% der Verkehrsleistung der Binnengüterschifffahrt in Deutschland erbracht (Umweltbundesamt [UBA], 2017, S. 90). Fährverbindungen finden sich in Bingen – Rüdesheim, Niederheimbach – Lorch, Engelsburg – Kaub, St. Goar – St. Goarshausen und Boppard – Filsen/Kamp-Bornhofen.

Zur Sicherung des Rheins als Wasserstraße auch bei Niedrigwasser ist die Vertiefung der Fahrrinne zwischen St. Goar und Wiesbaden im Bundesverkehrswegeplan 2030 als Projekt mit vordringlicher Bedeutung eingeplant (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [BMVI], 2016). Unter dem Projektnamen „Abladeoptimierung am Mittelrhein“ soll die Fahrrinntiefe von 1,90m auf 2,10 m erhöht werden.

Im Oberen Mittelrheintal, das der Rhein ungestaut durchströmt, sind Hoch- und Niedrigwassersituationen alltäglich. Dem Hochwasser sind die Anwohner infolge der Enge des Tals meist ungeschützt ausgesetzt. Technische Maßnahmen wie z.B. Hochwasserschutzwände oder gar Deiche können aufgrund der Enge des Tals baulich nicht realisiert werden. Hochwasser-Vorsorgemaßnahmen konzentrieren sich auf die Bauvorsorge an Gebäuden oder die Etablierung von Informations- und Warnsystemen.

Die hochwassergefährdeten Flächen und das Ausmaß der Risiken werden seit 2013 in Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten dargestellt (Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz [MUEEF RLP], o.J.–c). Die Überschwemmungsgebiete sind aufgrund der Enge des Tals auf die ufernahen Gebiete beschränkt. Maßnahmen zur Verringerung der Hochwassergefahr werden im Aktionsplan Hochwasser gebündelt – sie sind vor allem im Oberlauf des Rheins umsetzbar. Insgesamt wurden am Rhein bereits 14,1 Mrd. Euro in den Hochwasserschutz investiert (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins [IKSR], 2020).

Wie Hochwasser können auch die Niedrigwasserperioden des Rheins erhebliche Folgen haben, wie das Jahr 2018 zeigte, in dem u.a. die Schifffahrt extrem eingeschränkt werden musste (BfG, 2019). Solche Niedrigwasserperioden waren in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts ausgeprägter, sind dann aber in Vergessenheit geraten. Neben den Einschränkungen der Schifffahrt haben Niedrigwassersituationen zur Folge, dass Schadstofffrachten im Rhein weniger verdünnt werden und die Wassertemperaturen ansteigen können. Sowohl Wasserwerke, die Uferfiltrat beziehen, als auch Kraftwerke, die Rheinwasser z.B. zu Kühlzwecken nutzen, können durch Niedrigwasserperioden in ihrer Wassernutzung eingeschränkt werden (IKSR, 2020).

Im Engtal des Oberen Mittelrheins münden eine Vielzahl an Bächen aus steilen v-förmigen Kerbtälern in den Rhein (vgl. im Anhang). Häufig sind diese Gewässer im Uferbereich verrohrt, um sie unter den Straßen und Schienenwegen hindurchzuführen. Auch in den Kerbtälern sind die Gewässer häufig stark in ihrer Entwicklung baulich eingeschränkt. Gewässer-Renaturierungen



fanden teilweise statt wie z.B. am Breyerbach und Tauberbach in Brey (Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz [LfU RLP], o.J.–a). Im Oberen Mittelrheintal finden sich allerdings nur wenige Renaturierungen, darunter das Rheinufer zwischen Braubach und Lahnstein (LfU RLP, o.J.–c, vgl. Abbildung 2).

Abbildung 2: Einmündung des Schlierbachs in den Rhein zwischen Braubach und Lahnstein (LfU RLP, o.J.–c, Foto Rudolf May)

Die Mittelrhein-Region ist von mittleren Niederschlägen von ca. 600 bis 900 mm pro Jahr geprägt (Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinland-Pfalz [DLR-RLP], o.J., Periode 1981-2010). Das Tal selbst hat im Vergleich zu den Höhenlagen ein trockeneres und milderes Klima.

Das Trinkwasser zur Versorgung eines großen Teils der linksrheinischen Kommunen wird nicht aus dem Oberen Mittelrheintal selbst gewonnen, sondern aus dem Neuwieder Becken nördlich vom Tal (Wasserwerk Koblenz-Urmitz). Bingen und Rüdesheim z.B. werden über Grundwasser versorgt, das sich z.T. aus den Mittelgebirgen wie dem Taunus, z.T. aber auch aus Uferfiltrat speist. Die Trinkwassergewinnung befindet sich damit vorrangig außerhalb des Welterbe-Tals. Infolge der trockenen Jahre 2018 und 2019 werden Trinkwasserspeicher-Kapazitäten erweitert bzw. Wasserwerke vernetzt.

Aufbereitetes Abwasser aus Kläranlagen wird in den Rhein oder in seine Zuflüsse geleitet. Damit kann in kleinen Gewässern in Trockenjahren ein erhöhter Anteil aufbereiteten Abwassers entstehen - im Guldenbach bei Bad Kreuznach stieg dieser Anteil im Jahr 2018 bis auf 35% an (Zeititz, 2019). Der Rhein selbst kann in Niedrigwasserzeiten 10 - 20 % gereinigtes Abwasser enthalten, die Nahe und die Lahn sogar bis zu 50% (UBA, 2018).

Das Obere Mittelrheintal ist also durch eine Wassernutzung gekennzeichnet, die einerseits vom Rhein abhängt, umgekehrt aber auch von den vielen kleinen steilen Fließgewässern geprägt ist. Die Grundwassernutzung hat eine nachrangige Bedeutung.

2.5 DIE KULTURLANDSCHAFT IM OBEREN MITTELRHEINTAL

Die Besonderheit des Mittelrheintales liegt in der Vielfalt der Landschaft, die sich aus Naturkräften und menschlichem Wirken entwickelt hat – eine Kulturlandschaft mit vielfältigen Prägungen (Abbildung 3). Das Flusstal und die Felsen, das Tal und die Höhen, dazwischen die Hänge mit Weinbergterrassen, Streuobstwiesen, Wäldern und den Burgen als Landmarken im Verlauf des Flusses.

Die zum Weinbau gehörenden Trockenmauern verstärken als Wärmespeicher hier typische Kleinklimate und fördern die Vielfalt wärmeliebender Arten. Weite Teile hiervon sind jedoch heute auch Brachlandschaft.

Mit nachlassender Nutzung der steilen Weinhänge erfolgt eine zunehmende Verbuschung, die mit der Zeit zum Abbruch der Trockenmauern führt und damit zur Veränderung des jeweiligen Kleinklimas. Vor allem im nordöstlichen, flacheren Bereich des Tales um Filsen und Kestert finden sich Streuobstwiesen, z.T. wird hier der ehemals typische Kirschenanbau reaktiviert. Insbesondere die in weiten Abschnitten des engen Tales vorherrschende Waldlandschaft in den mittleren Hanglagen ist durch die Klimawandelfolgen bzw. die damit zunehmende Trockenheit massiv bedroht.



Abbildung 3 Impressionen aus dem Mittelrheintal

Das im Auftrag des Zweckverbandes Oberes Mittelrheintal in 2008 erstellte Kulturlandschaftsentwicklungskonzept (Zweckverband Welterbe Oberes Mittelrheintal, 2008) definiert für den Kernbereich des Welterbe-Gebietes unterschiedliche Kulturlandschaftstypen. Die folgende Beschreibung bezieht sich im Wesentlichen auf die Ergebnisse dieser Studie. Die dort enthaltene Karte wurde nachfolgend übertragen und grobmaßstäblich um die Flächen des Rahmenbereiches des Welterbe-Gebietes erweitert (s. Abbildung 4 auf Seite 13). Es finden sich demnach folgende Kulturlandschaftstypen:

1. Von Siedlungsflächen geprägte Stadtlandschaft im Norden mit Koblenz und Lahnstein, im Süden mit Bingen und Rüdesheim.
2. Dazwischen einige Siedungslandschaften kleinstädtischen Charakters wie Boppard und weitere Siedlungen bandartig am Fuße der Hänge. Größere Orte liegen im schon weiter werdenden Tal um Boppard und auf der gegenüberliegenden Seite mit Kamp-Bornhofen. Im engen, von Steilhängen geprägten südlichen Talabschnitt sind die Orte bis auf Bacharach sehr klein.
3. Die Karte zeigt vor allem, wie von Süden bis zu den sich weitenden Bopparder Schlingen das Tal von unterschiedlichen Weinbergslandschaften und heute zum Teil verbuschenden Terrassen geprägt ist. Dabei liegen die großen Weinbergsflächen um Boppard (Bopparder Schlingen) und bei Rüdesheim, wogegen sich die kleinteilige Weinbergslandschaft überall im Tal findet, besonders häufig rechtsrheinisch zwischen Kaub und Kestert und linksrheinisch im südlich liegenden Viertälergebiet. Hier zieht sich die kleinteilige Struktur der mit Wald besetzten Flächen weit in die Seitentäler in Richtung der Höhen. Dieses Gebiet ist aufgrund seiner steilen Hänge in den letzten Jahren besonders von Starkregenereignissen geschädigt worden.
4. Die großflächigeren Waldlandschaften konzentrieren sich im Tal rechtsrheinisch auf die Bereiche zwischen Osterspai und Braubach, linksrheinisch zwischen Bingen und Oberwesel sowie nördlich von Rhens.
5. Flusstypische Auenlandschaften, die auch als Überflutungs- und Rückhalteflächen dienen könnten, gibt es an der Verkehrsader Rhein kaum. Hinzu kommt, dass die wenigen und oft schmalen Rheinvorflächen im engen Tal auch genutzt und belegt sind mit Infrastrukturen, dem Tourismus dienen (Camping, Wohnmobile), dem Sport oder gewerblichen Ansiedlungen.

Das Kulturlandschaftsentwicklungskonzept beschränkt sich in seiner Analyse auf den Kernbereich des Welterbes. Betrachtet man zusätzlich den Rahmenbereich, so lässt sich hier grob festhalten, dass der westliche Bereich der Hochebenen zum Hunsrück hin, in großen Bereichen zusammenhängende Waldflächen aufweist. Von Trechtingshausen bis St. Goar ziehen sich topografiebedingt, viele und enge Seitentäler in waldbestandene Hänge. Auf der östlichen Seite, den Hochebenen der Taunusausläufer, finden sich vor allem zwischen Kaub und Kamp-Bornhofen auf den Höhen großflächige landwirtschaftlich genutzte Bereiche. Erst oberhalb Kamp-Bornhofens, ab Dalheim erstrecken sich wieder zusammenhängende Waldflächen bis Lahnstein.

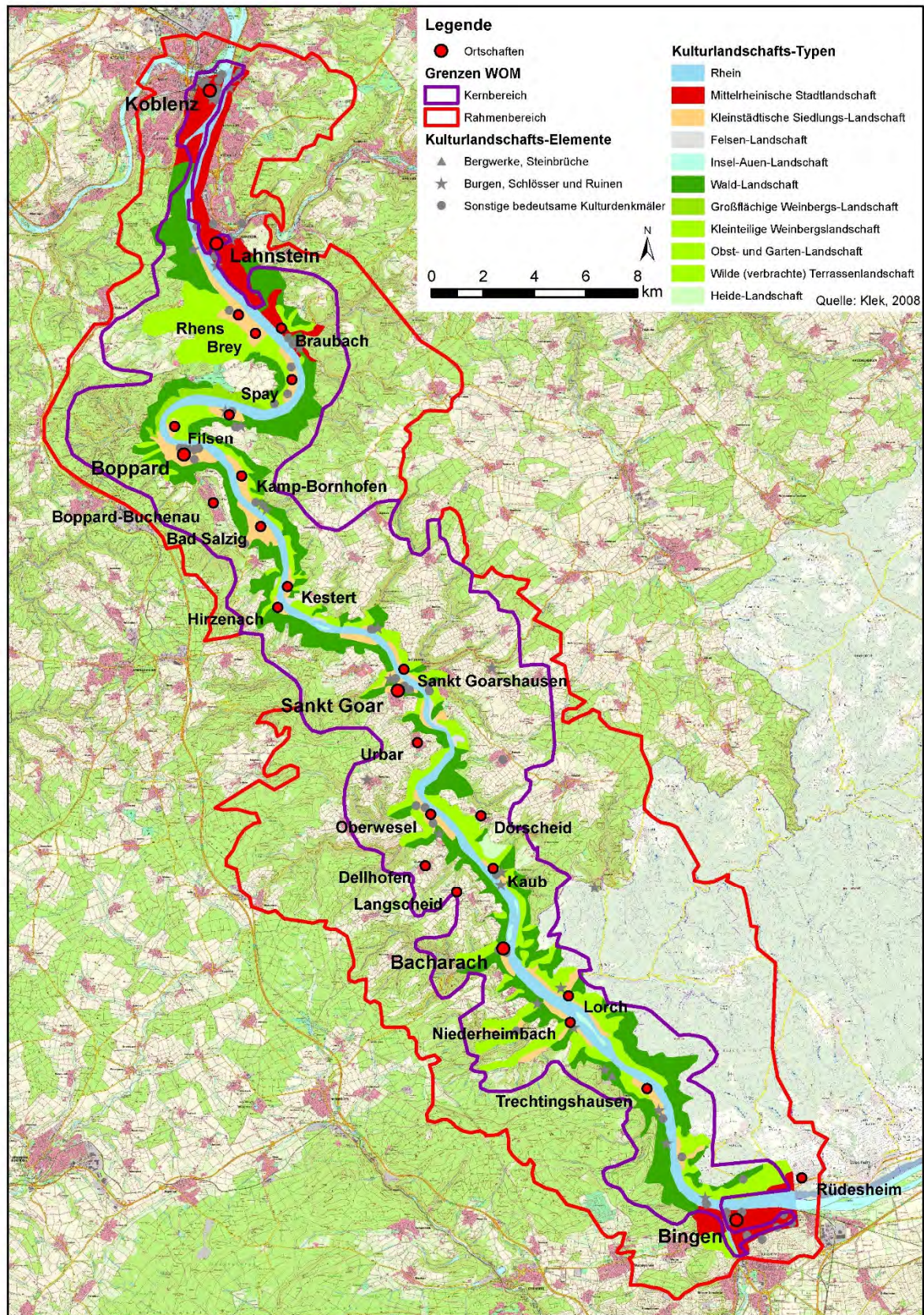


Abbildung 4 Kulturlandschaftstypen (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020; Datengrundlagen: Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation [HVBG], o.J., Landesamt für Vermessung und Geobasisinformationen Rheinland-Pfalz [LVermGeoRLP], 2020a, MWKEL RLP, 2013b; Zweckverband Welterbe Oberes Mittelrheintal, 2008)

2.6 DIE SIEDLUNGSRÄUME - STÄDTE, ORTE UND DÖRFER

In dem sehr engen und felsigen Tal entwickelten sich die Orte und Dörfer aus den Gegebenheiten der Landschaft. Nur wo die Topographie es zuließ, entstanden kleinere und größere Siedlungen. Daher erstrecken sich die Orte schmal im beengten Tal entlang der Rheinufer, schmiegen sich an die Hangfüße oder ziehen sich in die Seitentäler (Abbildung 5). In den Tallagen sind die Orte eng, dicht bebaut und steinern. Vielfältige Grünstrukturen finden sich eher außerhalb der Ortslagen.

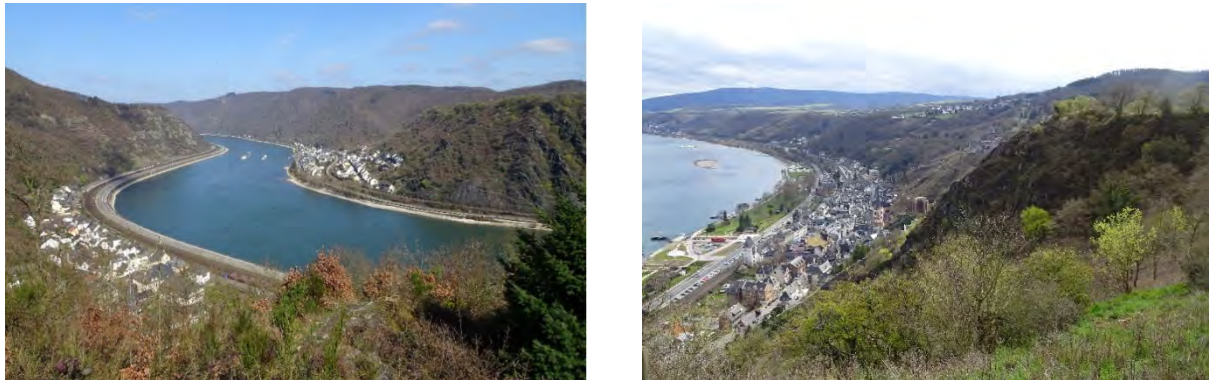


Abbildung 5 Siedlungsräume im Mittelrheintal: Orte und Siedlungen entwickeln sich aus den Gegebenheiten der Landschaftsstruktur - sie schmiegen sich eng zwischen Fluss und Fels oder liegen auf den Höhen. (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)

Durch die Topografie sind die Orte der Tallagen, die kaum Wind ausgesetzt sind und damit wenig Luftaustausch haben, stärker von Überwärmung und von Extremwetter betroffen als die Orte der Höhenlagen. Je nachdem wie die Durchlüftung der häufig dichten und engen Bebauung mit überwiegend steinernen Gassen und Plätzen ausgerichtet ist, bergen die Orte im Tal ein besonderes Belastungspotenzial.

3 KLIMAWANDEL IM OBEREN MITTELRHEINTAL

Der Klimawandel im Oberen Mittelrheintal lässt sich nicht unabhängig von globalen Zusammenhängen betrachten. Die Auswirkungen des globalen Klimawandels prägen sich regional und lokal ganz unterschiedlich aus und haben individuelle Folgen. Deshalb wird, nach einer kurzen Darstellung der weltweiten Auswirkungen, der Klimawandel in Deutschland beschrieben und anschließend auf das Bundesland Rheinland-Pfalz und die Region Mittelrheintal konkretisiert. Der Fokus liegt auf den meteorologischen Variablen Temperatur und Niederschlag. Die bereits beobachteten Änderungen der Variablen sowie möglichen Entwicklungen in der Zukunft für das Obere Mittelrheintal werden dargestellt und analysiert. Die Weltmeteorologische Organisation definiert die normale Klimaperiode als 30 Jahre. Um Klimawandel in der Region zu charakterisieren werden deshalb im folgenden Kapitel die 30-jährigen Mittelwerte und Summen der betrachteten Variablen und abgeleiteten Indikatoren für verschiedene Klimaperioden miteinander verglichen.

Die hier analysierten regionalen Projektionen des zukünftigen Klimas¹ basieren auf den SRES (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2000) A1B und B1 und neueren RCPs (Representative Concentration Pathways, (Moss et. al., 2010) 2.6, 4.5 und 8.5 Emissionsszenarien². Globalisierungsszenario SRES A1B beschreibt eine zukünftige globalisierte Welt, in der es zu einem raschen Wirtschaftswachstum ohne Klimaschutz kommt und ist gekennzeichnet durch die ausgewogene Nutzung aller Energiequellen, einer in der Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierten und anschließend rückläufigen Weltbevölkerung sowie dem Einsatz neuer und effizienterer Technologie. Das optimistische SRES B1 beschreibt eine globalisierte, aber nachhaltig orientierte „geplante grüne Welt“, die wie A1B eine kulminierende und danach rückläufige Weltbevölkerung in der Mitte des 21. Jahrhunderts hat. Allerdings kommt es hier zu einer raschen Änderung der wirtschaftlichen Strukturen. Dienstleistungs- und Informationswissenschaften nehmen zu bei einem gleichzeitigen Rückgang des Materialverbrauches und Einführung von sauberen und ressourceneffizienteren Technologien (IPCC, 2007).

Für die Beschreibung und Analyse der Klimabedingungen für das 20. Jahrhundert wurde außerdem das C20 Szenario mit den seit 1860 beobachteten ansteigenden CO₂-Werten verwendet. Die RCPs unterscheiden sich in anthropogen verursachten zusätzlichen Strahlungsantrieben im Jahr 2100 im Vergleich zu vorindustriellen Bedingungen im Jahr 1850. Das „worst case“ RCP8.5 entspricht damit einem Anstieg des Strahlungsantriebes von 8,5 W/m² verursacht durch einen kontinuierlichen, anthropogen verursachten Anstieg an Treibhausgaskonzentrationen (THG) in der Atmosphäre. Das klimafreundliche „politische“ RCP2.6 beinhaltet Maßnahmen zur drastischen Reduzierung der THG-Emissionen so, dass der Strahlungsantrieb bis zum Ende des 21. Jahrhunderts bei „nur“ 2,6 W/m² liegt. Es entspricht ungefähr dem 2 Grad Ziel der Vereinbarungen von Paris, 2015. RCP4.5 ist ein „intermediate“, d.h. moderates Szenario ähnlich wie SRES B1, mit Stabilisierung des Strahlungsantriebs bei 4.5 W/m², was auch die THG-Reduktionsmaßnahmen berücksichtigt, aber nicht so drastisch wie in RCP 2.6.

Die Emissionsszenarien wurden als Input für die Globalen Klimamodelle (GCM) verwendet, um damit die entsprechenden Globalen Klimaszenarien zu berechnen. Die globalen Klimaszenarien

¹ Eine Klimaprojektion ist die simulierte Reaktion des Klimasystems auf ein Szenario zukünftiger Emissionen oder Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen, häufig basierend auf Klimamodellen (www.klimanavigator.eu).

² Emissionsszenarien sind mögliche zukünftige Entwicklungspfade des menschlichen Ausstoßes von Treibhausgasen und Aerosolen.

wurden danach mit Regionalen Klimamodellen (RCM) für unterschiedlichen Regionen herunterskaliert. Die für die Untersuchungsregion verwendeten regionalen Klimaszenarien wurden hauptsächlich mit dem Climate Local Model (CLM), WETTREG, und regionalen Modellen des CORDEX Experiments (Region Europa) herunterskaliert. Mehrere Szenarios zusammen bilden ein Ensemble, welches möglichst groß seinen sollte, um eine möglichst repräsentative und robuste Projektion der Klimaentwicklung zu bekommen. Alle verwendeten Datensätze und entsprechende genauere Angaben zu Datenquellen werden im Anhang 1 aufgelistet.

3.1 GLOBALER KLIMAWANDEL: LUFTTEMPERATUR

Eine der beobachteten globalen Klimaänderungen ist die Erhöhung der Lufttemperatur sowohl im globalen Mittel (Abbildung 6), als auch regional (Abbildung 7).

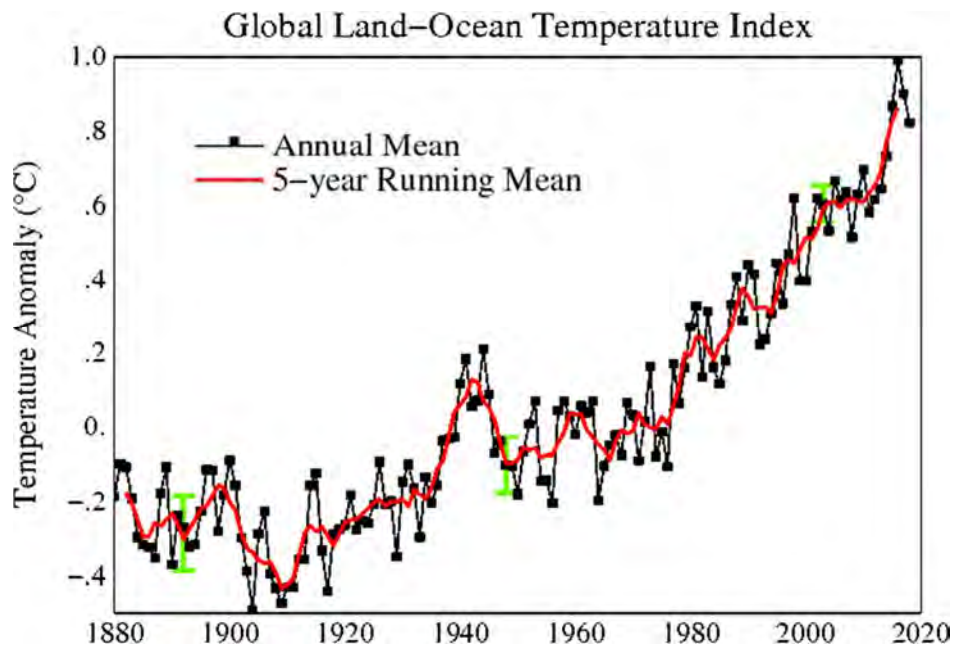


Abbildung 6 Beobachtete Änderung der globalen Durchschnittstemperatur bezogen auf die Referenzperiode 1951-1080 (Quelle: National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2019)

Insgesamt wird ersichtlich, dass bereits ein deutlicher Anstieg der genannten Temperaturen zu verzeichnen ist. Hierbei sind die Kontinente tendenziell von einem stärkeren Anstieg betroffen, doch auch die Ozeane erwärmen sich überwiegend signifikant. Gemäß dem IPCC „Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C“ erreichte die mittlere globale Erwärmung fast 1 °C (IPCC, 2018). Weltweit wurden stellenweise Temperaturanstiege von bis zu 2,5 °C beobachtet (IPCC, 2015).

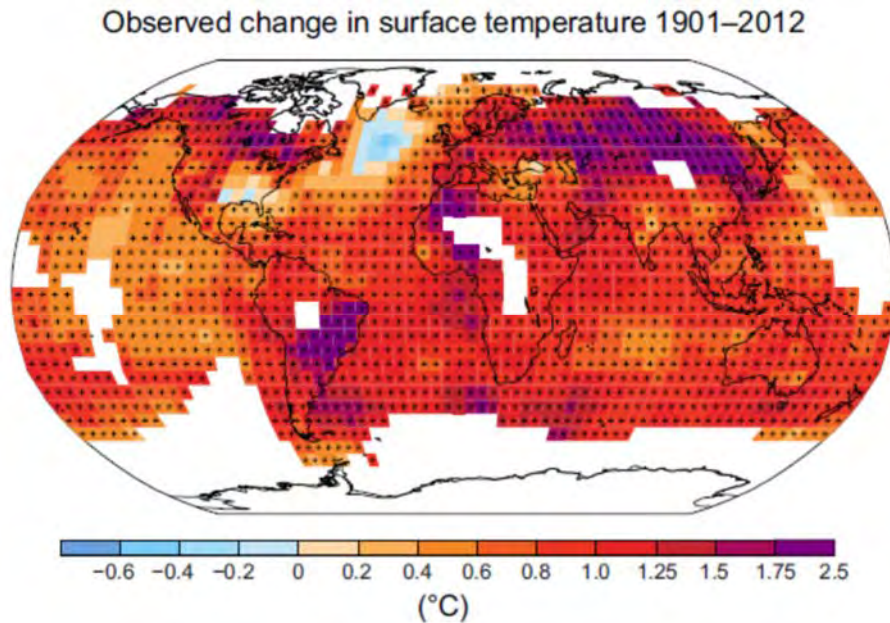


Abbildung 7 Räumliche Verteilung der Temperaturänderungen auf der Erdoberfläche. Signifikante Änderungen sind mit '+' gekennzeichnet (Quelle: IPCC, 2015)

3.2. KLIMAWANDEL IN DEUTSCHLAND

Der globale Klimawandel hat weltweite Auswirkungen und somit auch auf Deutschland. Abbildung 8 zeigt, dass der Anstieg der durchschnittlichen Lufttemperatur seit 1891 in der Bundesrepublik mit 1.5°C deutlich höher liegt als global (ca. 1°C).

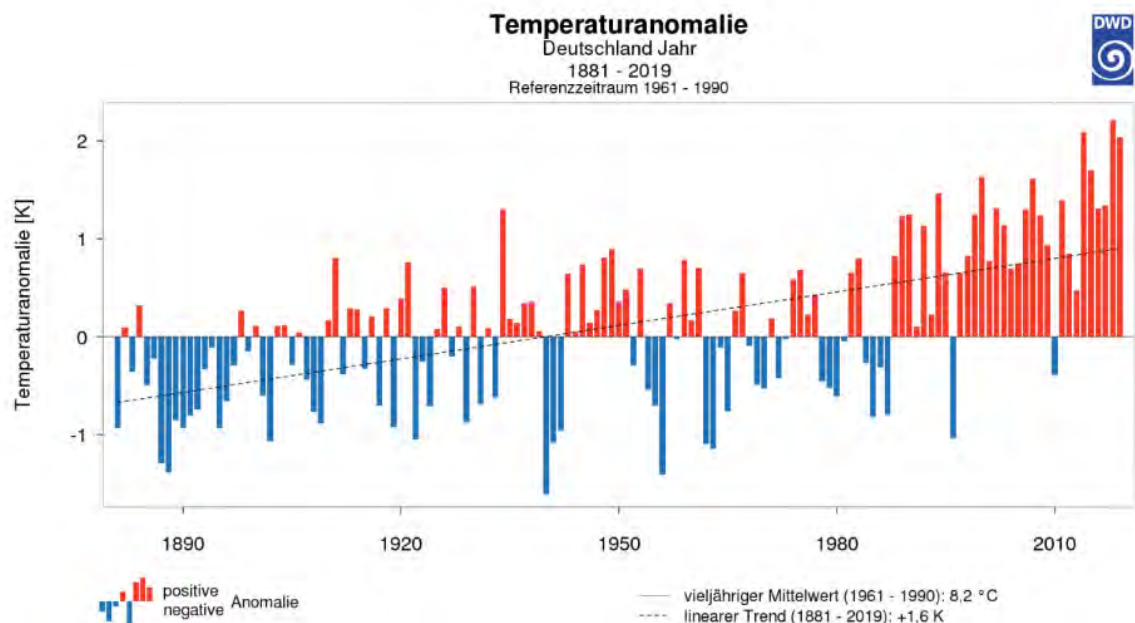


Abbildung 8 Temperaturanomalie: Beobachtete Änderungen der Durchschnittstemperatur in Deutschland relativ zur Referenzperiode 1961-1990 (Quelle: Deutscher Wetterdienst [DWD], 2020a)

Außerdem werden in Abbildung 9 verschiedene Klimafolgen Deutschlands, wie z.B. die Zunahme von Hitzetagen oder Starkregenereignissen, zusammengefasst. Ein Beispiel ist das Jahr 2016, aber auch in anderen Jahren kam es zu Starkregenereignissen, z.B. in Süddeutschland mit teilweise hohen Schäden (Klimaveränderung und Wasserwirtschaft [KLIWA], 2019c).

Starkniederschläge sind schwer zu erfassen, da sie innerhalb kürzester Zeit auftreten und meist lokal begrenzt sind. Die Erfassung hat sich in den vergangenen 18 Jahren mit der Einführung von flächendeckenden Regenradar- und Daten stark verbessert (UBA, 2019b). Für den Winter sind Zunahmen von Starkregen-Ereignissen feststellbar: Starkniederschläge der Dauerstufe von 24h haben in den letzten 65 Jahren um ein Viertel zugenommen (ebd.). Für den Sommer sind robuste Trendaussagen bisher nicht möglich.

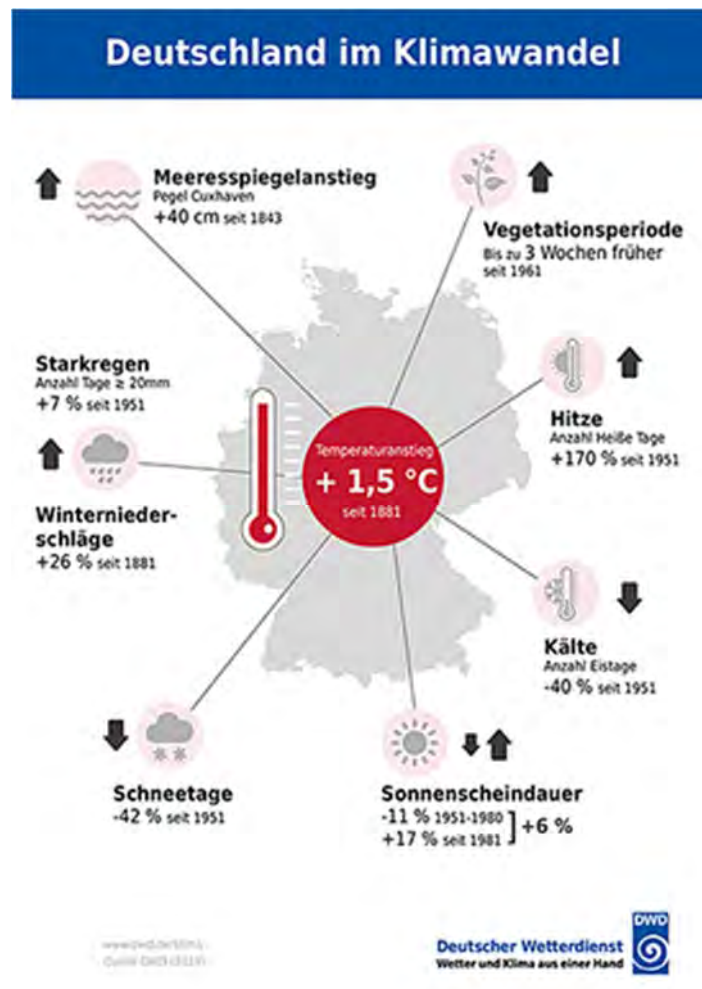


Abbildung 9 Weitere Klimawandelfolgen in Deutschland seit 1881
(Quelle: DWD, 2020b)

3.3. KLIMAWANDEL IN RHEINLAND-PFALZ

Die Bundesländer Rheinland-Pfalz und Saarland haben sich während der Periode 1881 bis 2019 auch stark erwärmt (Abbildung 10). Insbesondere fällt der steile Anstieg seit den 1980er Jahren auf. Mit ca. $+1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist dies seit 1881 einer der größten Trends in Deutschland (DWD, 2020a). Diese Tendenz ist für alle Jahreszeiten fast gleichermaßen ausgeprägt und lediglich im Herbst etwas schwächer ausgeprägt ($+1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$).

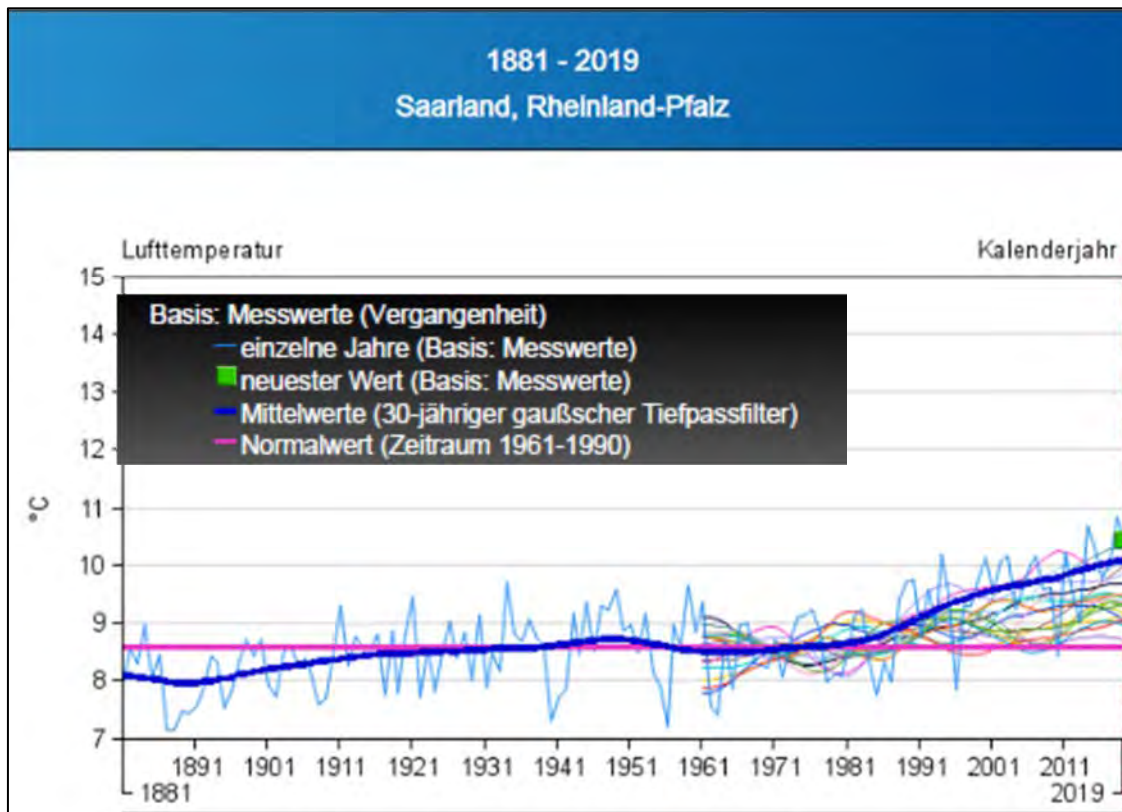


Abbildung 10 Entwicklung der Jahresdurchschnittstemperatur der Luft auf 2 m Höhe in Rheinland-Pfalz und Saarland während der Periode 1881-2019 (DWD, 2020a)

Die Entwicklung der Jahresniederschläge (Abbildung 11a) zeigt seit 1881 auch eine leicht steigende Tendenz $+8,7\text{ }\%$ relativ zum Mittelwert 1961-1990 (DWD, 2020a). Die Unterschiede zwischen Jahreszeiten sind jedoch sehr groß (Abbildung 11b und c). Die Zunahme der Jahressummen wird durch die starke Zunahme der Winter- ($+27,2\%$) und Frühlingsniederschläge ($+14,1\%$) verursacht. Während die Herbstniederschläge plus/minus konstant bleiben ($+1,3\%$) wird eine schwache Abnahme im Sommer ($-6,7\text{ }\%$) beobachtet (DWD, 2020a). Die einhergehenden sog. Dürresommer werden in Deutschland seit einigen Jahren zum Problem u.a. für die Land- und Forstwirtschaft.

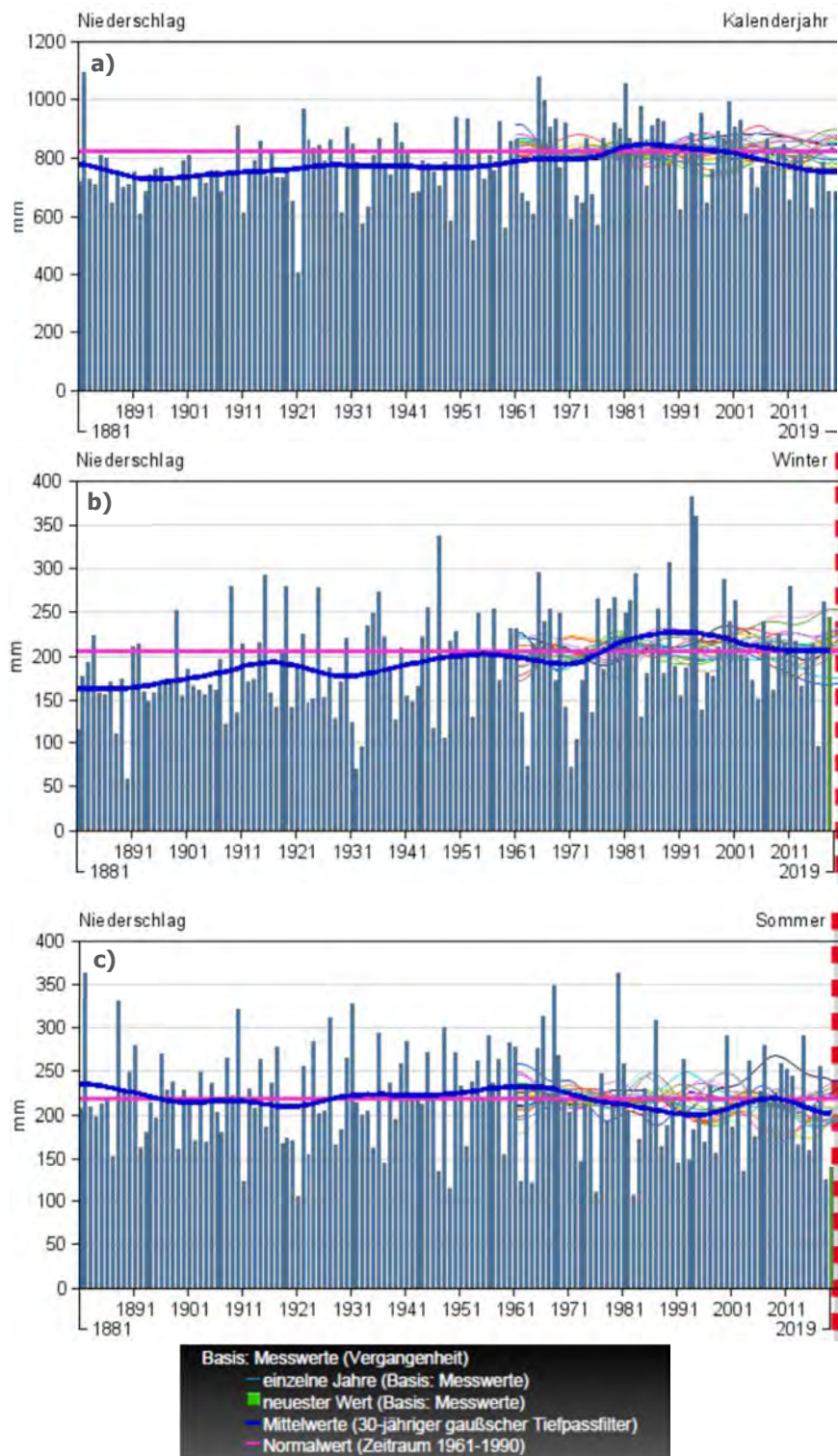


Abbildung 11 Niederschlagsentwicklung in Rheinland-Pfalz und Saarland während der Periode 1881-2019: a) Jahressumme; b) Summe Sommerhalbjahr; c) Summe Winterhalbjahr (DWD, 2020a).

3.4. KLIMAWANDEL IM GESAMTEN UND OBEREN MITTELRHEINTAL

Entwicklung der Lufttemperatur

Um die Auswirkungen der globalen Erwärmung konkret für das Untersuchungsgebiet beurteilen zu können, werden die **Entwicklung der Jahresmitteltemperatur sowie der Tagesmaximumtemperatur** der Luft auf 2 m Höhe des Naturraums Mittelrheingebiet betrachtet. Für beide Variablen ist ein **deutlich signifikanter Anstieg** zu verzeichnen (Abbildung 12 a und b).

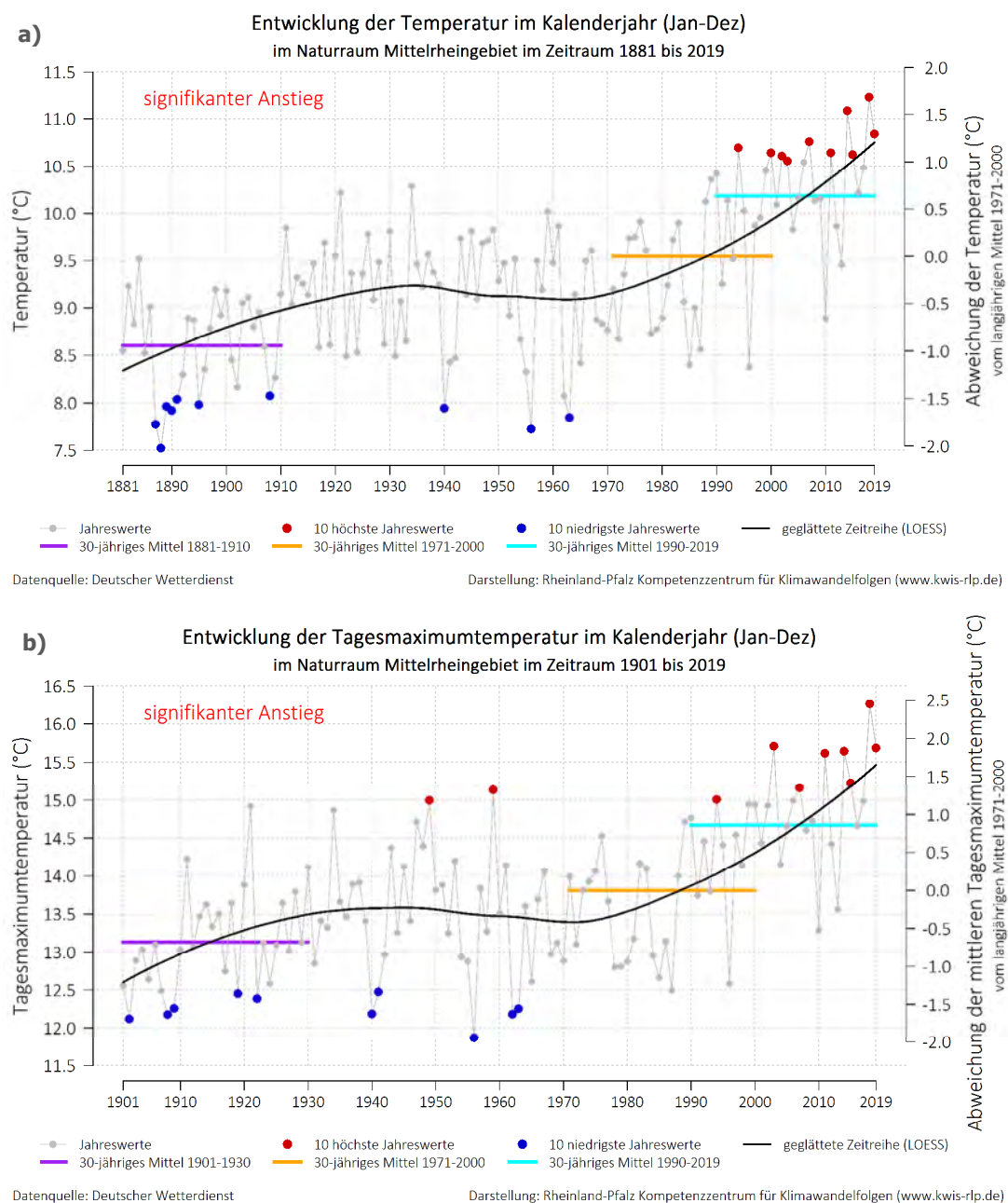


Abbildung 12 Entwicklung der Lufttemperatur im Mittelrheingebiet: a) Jahresmittelwert; b) Maximale Tagestemperatur im Mittelrheingebiet (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020).

Zusätzlich sind auf der Abbildung durch die blauen Punkte die zehn niedrigsten Jahreswerte und durch die roten Punkte die zehn höchsten Jahreswerte der genannten Zeitreihe markiert. Es ist erkennbar, dass der Großteil der höchsten Jahreswerte ab dem Jahr 2000 auftreten. D.h. der Temperaturanstieg folglich in den letzten 20 Jahren überdurchschnittlich hoch ist.

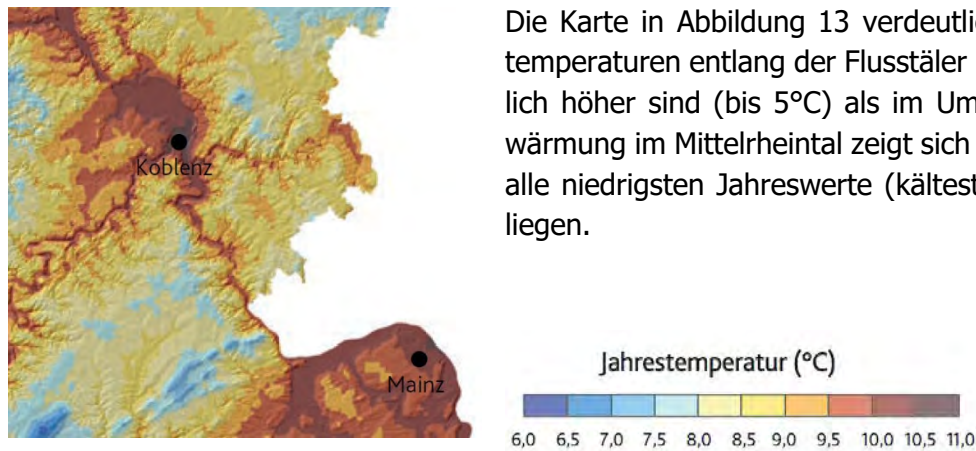


Abbildung 13 Räumliche Verteilung der mittleren Jahrestemperatur (Referenzzeitraum 1971-2000) im Mittelrheingebiet

Unter der gleichen Darstellungsweise wird in Abbildung 15 nun die Entwicklung der **Anzahl der heißen Tage** (Tag mit einer Höchsttemperatur von $\geq 30^\circ\text{C}$) sowie in Abbildung 15 die Anzahl der Sommertage (Tag mit einer Höchsttemperatur von $\geq 25^\circ\text{C}$) für den Zeitraum 1951 bis 2019 abgebildet. Auch hier ist **ein signifikanter Anstieg** beider Indikatoren zu erkennen. Auffällig ist in diesen beiden Grafiken auch die Verteilung der zehn niedrigsten Jahreswerte, welche allesamt vor dem Jahr 1990 auftreten.

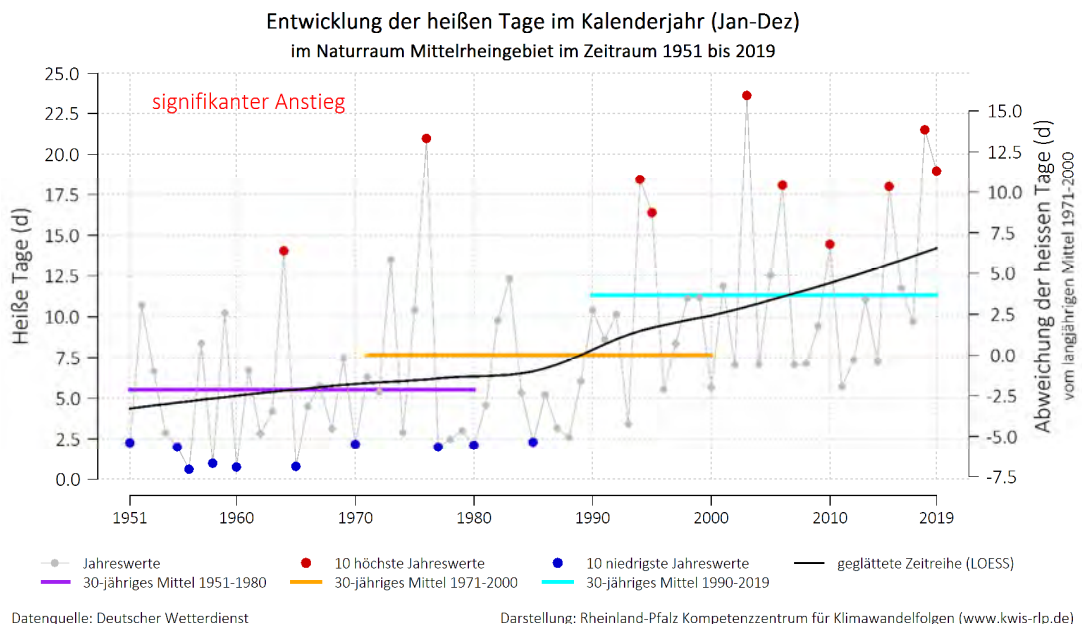


Abbildung 14 Entwicklung der jährlichen Anzahl der Hitzetage im Mittelrheingebiet während der Periode 1951-2019 (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020. Datenquelle: DWD)

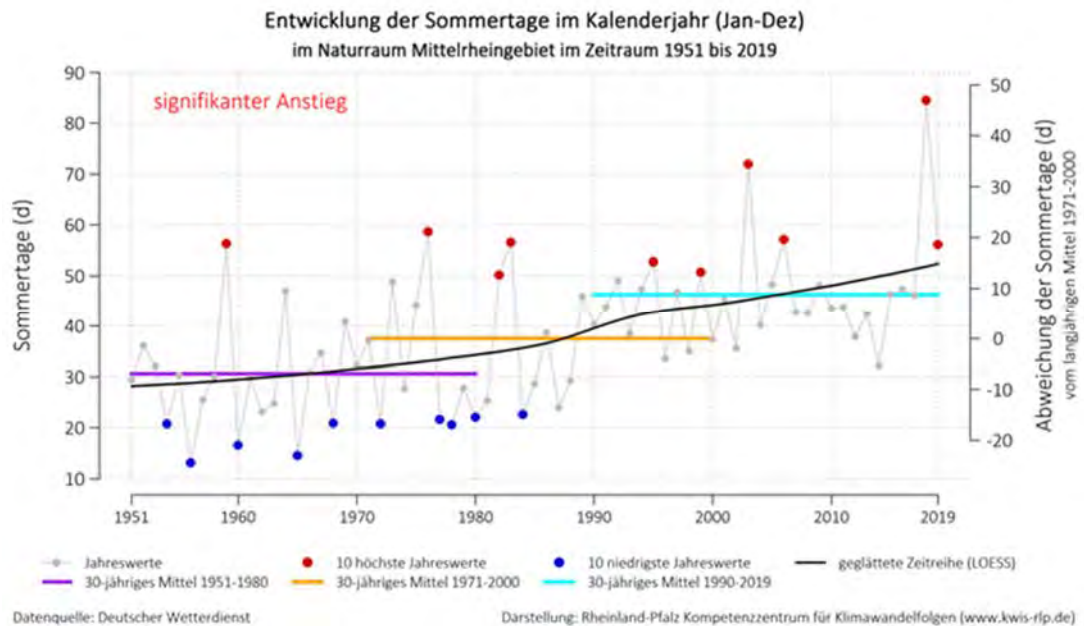


Abbildung 15 Entwicklung der jährlichen Anzahl der Sommertage im Mittelrheingebiet während der Periode 1951-2019 (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020. Datenquelle: DWD).

Die steigenden Lufttemperaturen werden auch durch die **Abnahme der Anzahl der Frosttage** (Tag mit einer Minimumtemperatur von $< 0^\circ\text{C}$, Abbildung 16) und der Eistage (Tag mit einer Höchsttemperatur von $< 0^\circ\text{C}$, Abbildung 17) für den Zeitraum 1951 bis 2019 aufgezeigt (Abbildung 17). Für beide Betrachtungen ist eine **signifikante Abnahme** um entsprechend ca. 15 und 10 Tage pro Jahr zu verzeichnen. Die Farbskala der zehn höchsten und niedrigsten Jahreswerte ist in dieser Abbildung ausgetauscht, sodass die blauen Punkte die zehn höchsten Jahreswerte darstellen und die roten Punkte die zehn niedrigsten.

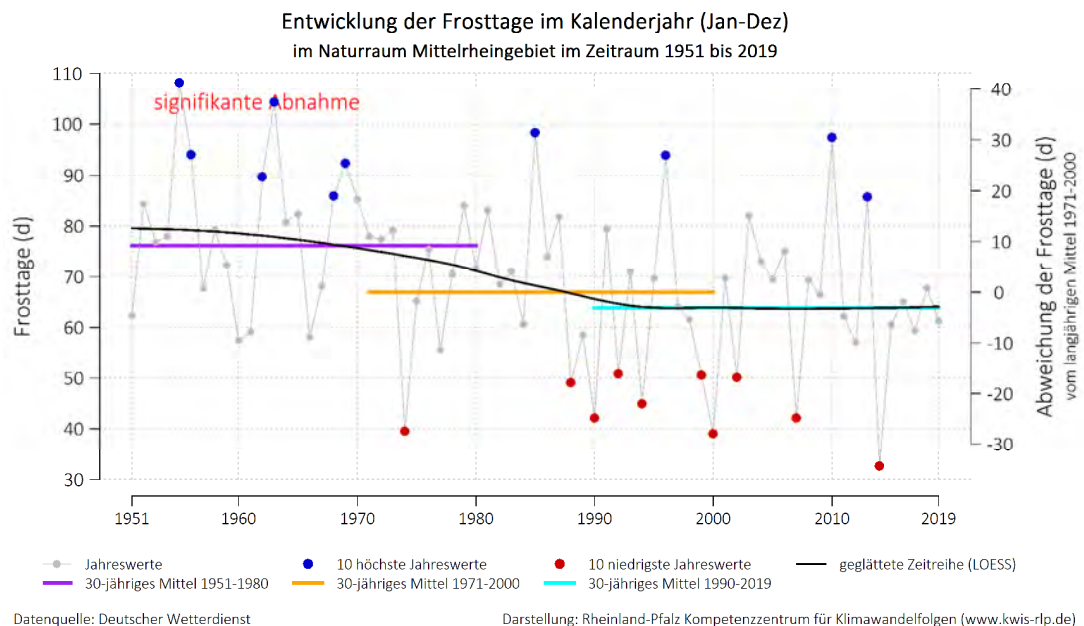


Abbildung 16 Entwicklung der Frosttage im Mittelrheingebiet während der Periode 1951-2019 (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020. Datenquelle: DWD)

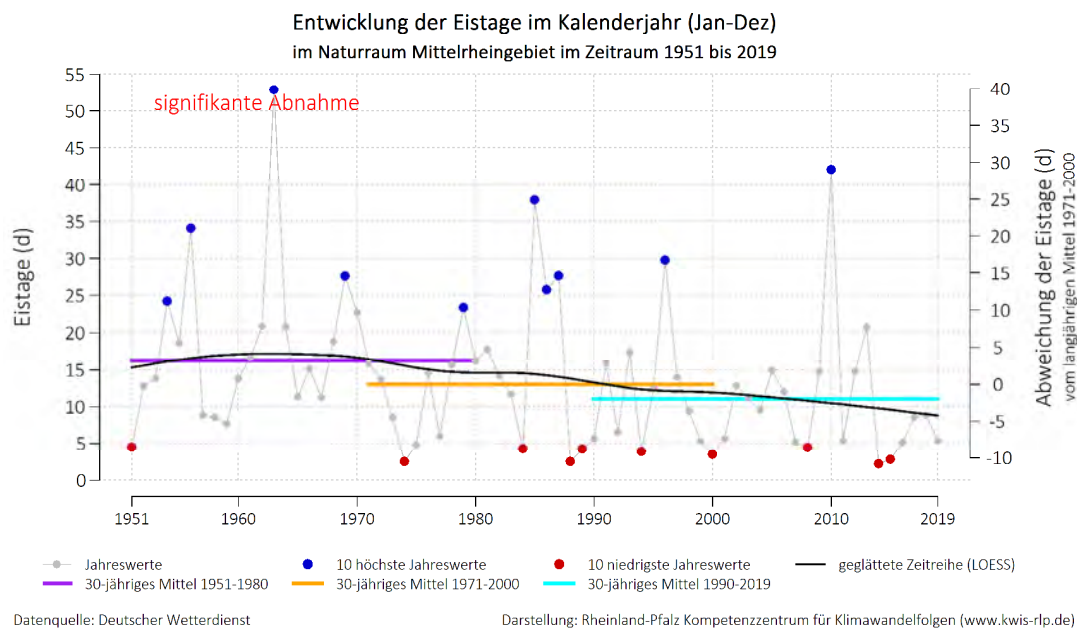


Abbildung 17 Entwicklung der Eistage im Mittelrheingebiet während der Periode 1951-2019 (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020. Datenquelle: DWD)

Die steigenden Trends der Lufttemperatur werden auch für die Zukunft projiziert.

Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse eines Modell- und Szenarioensembles³, das die mögliche Entwicklung der jahresmittleren (links) und mittleren maximalen (rechts) Temperatur bis zum Jahr 2100 beschreibt. Es handelt sich um 30-jährige Mittel, welche als Abweichung vom langjährigen Mittel (1971-2000) dargestellt werden. Die Projektionen ergeben für beide Variablen einen deutlichen Anstieg um bis zu 5 °C. Unter dem Szenario RCP8.5 steigen beide Temperaturen besonders in den letzten Jahrzehnten bis 2100 deutlich stärker an als unter RCP4.5.

Um zu überprüfen, ob die Untersuchungsregion Oberes Mittelrheintal sich vom gesamten Mittelrheintal unterscheidet, wurden die Analysen der Klimavariablen auch separat für dieses Gebiet durchgeführt. Hierfür wurden im Zuge des vorliegenden Projektes insgesamt die Ergebnisse der neun Modellläufe mit verschiedenen Modell- /Szenario-Kombinationen betrachtet, welche anfänglich in diesem Kapitel bereits näher erläutert wurden. Das Gebiet des Oberen Mittelrheintals und die Periode 1960 bis 2100 wurden analysiert. Die mittleren Tageswerte wurden zu den Jahresmittelwerten aggregiert und die Ergebnisse aller Modelle sind in Abbildung 19 dargestellt. **Deutlich erkennbar ist der allgemeine Trend zum Temperaturanstieg.** Für die Analysen der Klimaänderung wurden die Werte zu den 30-Jährigen Mittelwerten zusammengefasst:

- 1971-2000 als Vergangenheit/Gegenwart
- 2021-2050 als nähere Zukunft
- 2071-2100 als ferne Zukunft

³ Ensemble ist eine Sammlung von Modellsimulationen, die eine Klimaprojektion kennzeichnet. Unterschiede in den Anfangsbedingungen und der Modellformulierung führen zu unterschiedlichen Entwicklungen der modellierten Systeme und können Informationen zu Unsicherheiten aufgrund von Modellfehlern und intern generierter Klimavariabilität liefern. (www.klimanavigator.eu)

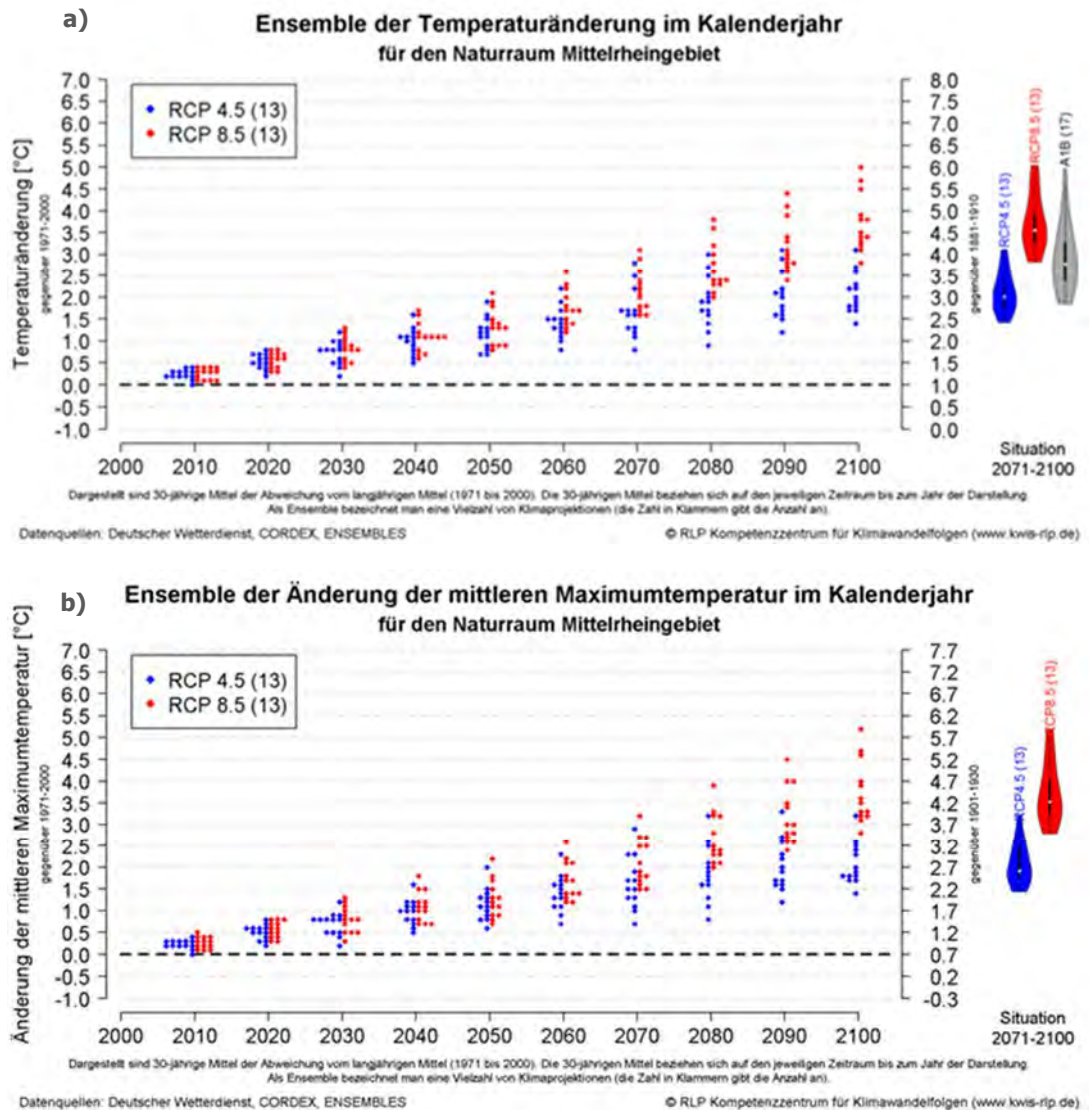


Abbildung 18 Entwicklung der Durchschnittstemperatur (a) und Maximumtemperatur (b) im Mittelrheingebiet bis 2100 gemäß den Klimaszenarien SRES A1B, RCP 4.5 und RCP 8.5 (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020)

Die Klimaänderungssignale wurden als Differenz der Periodenmittelwerte berechnet. Die Signifikanz der Klimaänderung wurden mit dem U-Test unter $\alpha=0.15$ überprüft. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt. Mit Ausnahme eines Modelllaufs liegen überall die signifikanten Klimaänderungen vor. Der Temperaturanstieg im Mittelrheintal bis 2100 ist somit unter den gegebenen Szenarien statistisch wahrscheinlich.

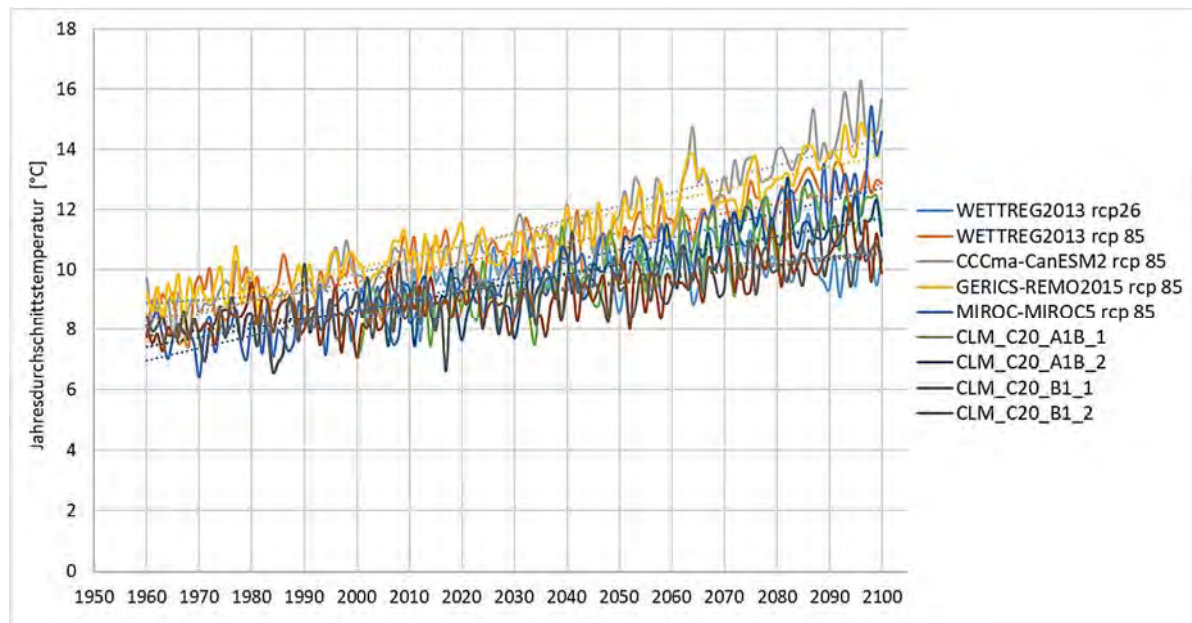


Abbildung 19 Entwicklung Tagesdurchschnittstemperatur vom 1960 bis 2100 im Oberen Mittelrheintal gem. den Szenarien: A1B, B1, RCP 2.6 und RCP 8.5 (siehe Tabelle 17, Anhang); eigene Darstellung: räumliche und zeitliche Mittelung für Region, Linearer Trend

Auch innerhalb des Oberen Mittelrheintals gibt es lokale, aber sehr schwache Unterschiede der Auswirkungen des Klimawandels. Die genannten Modelle verfügen hierbei, wie einleitend erläutert, über verschieden hohe Auflösungen. Beispielhaft soll das Ergebnis des Modelllaufs „CLM_A1B_1“⁴ kartografisch dargestellt werden (Abbildung 20). Hierfür wurde der Vergleich der Perioden 2071-2100 und 1971-2000 ausgewählt. Unter den beschriebenen Ergebnissen in Tabelle 2 wurde ein Mittelwert aller Gitterzellen gebildet.

Tabelle 1 Mittlere Temperaturen und die Temperatur-Klimaänderungssignale zwischen Gegenwart, Näherer und ferner Zukunft im Oberen Mittelrheintal nach unterschiedlichen Modell-/Szenario Kombinationen

Jahresdurchschnittstemp. [°C]	CLM_A1B_1	CLM_A1B_2	CLM_B1_1	CLM_B1_2	Wettreg. Rcp26	Wettreg. Rcp85	CanESM2 rcp85	REMO rcp85	MIROC rcp85
1971-2000	8,41	8,20	8,41	8,71	9,31	9,31	9,45	9,63	8,11
2021-2050	9,42	9,34	8,96	9,52	10,07	10,40	10,96	10,93	9,82
2071-2100	11,59	11,52	10,49	10,69	10,19	12,53	14,10	13,50	12,41
Diff. 2021-2050 zu 1971-2000	1,01	1,14	0,55	0,81	0,76	1,09	1,50	1,31	1,72
Diff. 2071-2100 zu 1971-2000	3,18	3,32	2,08	1,98	0,88	3,22	4,65	3,87	4,30
Signifikanz	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein

In Abbildung 20 werden die Unterschiede der Temperaturänderung innerhalb des Untersuchungsgebiets deutlich. Es ist jedoch dringend die Skala zu beachten, da die absoluten Abweichungen untereinander minimal sind. Eine Verfälschung durch Randgebiete, welche per Definition nicht mehr direkt zum Betrachtungsgebiet gehören, ist somit auszuschließen. Die allgemeine Tendenz und die Aussage über die zukünftige Entwicklung sind folglich nicht hiervon beeinflusst.

⁴ (globales Klimaszenario SRES A1B, das mit dem Regionalmodell CLM herunterskaliert wurde)

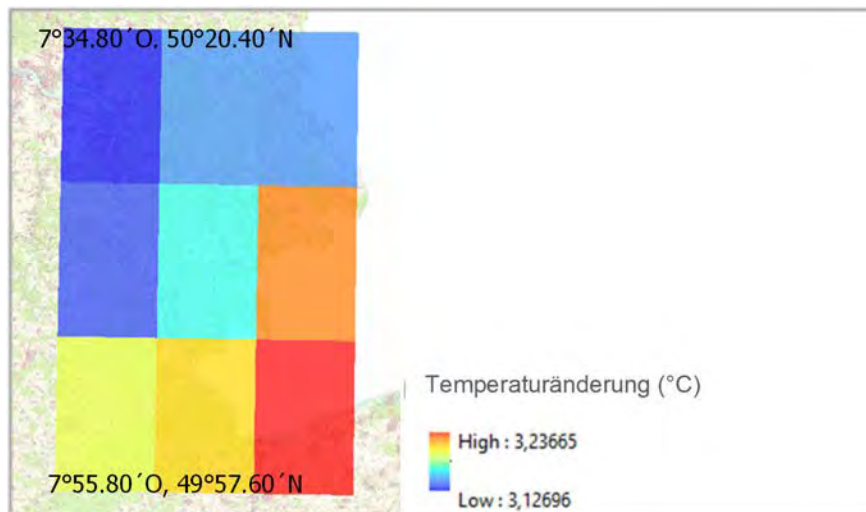


Abbildung 20 Beispiel der räumlichen Verteilung des Klimaänderungssignals für Jahresdurchschnittstemperatur im Oberen Mittelrheintal von 2071-2100 zu 1971-2000 unter dem Modell CLM Szenario A1B Lauf 1, Angaben in °C (Jahresdurchschnitt).

In Tabelle 14 (Anhang, Seite A) werden die jetzige Situation sowie die Klimaänderungssignale für die Anzahl der Tage mit nächtlichen Temperaturen über 20 °C (Tropennächte) pro Jahr bzw. pro 30 Jahre dargestellt. Als Beispiele für die Untersuchungsregion werden drei Stationen ausgewählt: Bacharach, Oberwesel und Boppard. Alle neun Klimaprojektionen zeigen eine Erhöhung der Anzahl der Tropennächte von 1971-2000 bis 2071-2100. Das Szenario CCCma_rcp85 weist die größte Differenz zwischen den beiden Perioden auf mit rund 45 zusätzlichen Tropennächten pro Jahr. Das mit dem Modell WETTREG berechnete RCP2.6 Szenario ergibt die kleinste Erhöhung mit 0,4 Tropennächten pro Jahr. Von den verwendeten neun Szenarios projizieren acht einen Anstieg von rund drei Tropennächten pro Jahr bis 2100.

Auch für die Hitzetage (Tagesmaximumtemperatur ≥ 30 °C, Tabelle 15 auf Seite A im Anhang) projizieren die verwendeten neun Modellläufe eine deutliche Zunahme verglichen mit der Gegenwart. Die geringste Erhöhung weist das Szenario Wetter_rcp26 (Modell WETTREG) mit 154 Tagen ($\Sigma 2071-2100$ minus $\Sigma 1971-2000$), sprich rund 5 Tagen pro Jahr, auf. Die größte Zunahme mit 1.529 Tagen (ca. 51 Tage pro Jahr) projiziert für die ferne Zukunft das Worst Case Szenario RCP 8.5 modelliert mit CLM getrieben vom CCCma.

Entwicklung des Niederschlags

Im Rheintal gibt es häufig weniger als 600 l/m² Niederschlag pro Jahr, die Höhenlagen der Mittelgebirge erhalten hingegen ca. 1.000 l/m² (Abbildung 21). Die Abbildung verdeutlicht somit die Unterschiede der Niederschlagsmenge auf kleinskaliger Ebene. Tendenziell verfügt der Süden des Oberen Mittelrheintals über geringere Jahresniederschläge als der Norden. In Abbildung 22 ist zudem die Entwicklung des jährlichen Niederschlags von 1881 bis 2019 im Mittelrheingebiet dargestellt (a). Zusätzlich sind durch die roten Punkte die zehn niedrigsten Jahressummen der genannten Zeitreihe markiert, respektive durch die blauen Punkte die zehn höchsten Jahressummen. Insgesamt ist ein leichter, aber signifikanter Anstieg des Niederschlags erkennbar (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020). Abbildung 22 zeigt zusätzlich unter der gleichen Darstellungsweise die Entwicklung des Niederschlags im meteorologischen Winter (c) sowie im hydrologischen Sommer (d) von 1881 bis 2019. Im Winter ist hierbei ein signifikanter Anstieg zu verzeichnen (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020). Im Sommer ist keine signifikante Änderung zu verzeichnen. Auch die Verteilung der zehn höchsten und niedrigsten Jahreswerte (blaue und rote Punkte) ist relativ homogen über die Zeitspanne verteilt. Im Winter hingegen häufen sich die zehn höchsten Jahreswerte ungefähr in den letzten drei Jahrzehnten.

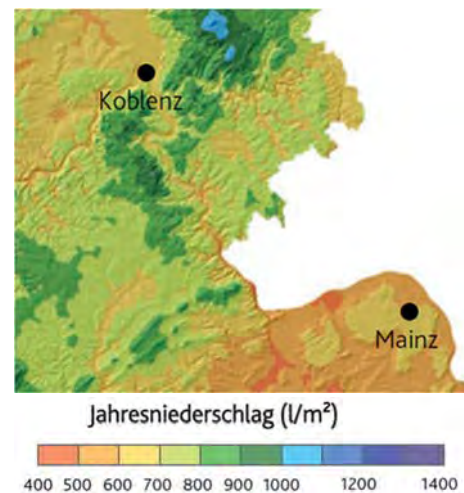


Abbildung 21 Räumliche Verteilung des Jahresniederschlags im Mittelrheingebiet (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020)

Die Entwicklung von Starkniederschlags- und Schneedeckentagen zwischen 1951 und 2019 ist in Abbildung 23 dargestellt. Die Jahresanzahl der Starkniederschlagstage mit min. 20 mm Niederschlag pro Tag haben nach Angaben des Kompetenzzentrums für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz (2020) im Mittelrheingebiet signifikant zugenommen (Abbildung 23a), wohingegen die Tage mit min. 30 mm Niederschlag pro Tag keine signifikante Änderung aufweisen (Abbildung 23 b). Beispiele für solche Ereignisse sind die Kommunen Kestert im Jahre 2011, Fischbach im Jahr 2018 sowie Boppard und St. Goar im Jahre 2019 (siehe Abbildung 27).

Die Anzahl der Tage pro Jahr, an denen eine Schneedecke vorlag, hat hingegen zwischen 1951 und 2019 signifikant abgenommen (Abbildung 23c). Hier wird insbesondere deutlich, dass sich die zehn niedrigsten Jahreswerte ab dem Jahr 1990 häufen (rote Punkte), wohingegen die zehn höchsten Jahreswerte meist vor diesem Jahr liegen (blaue Punkte). **Insgesamt ist die Zunahme von Extremwetterlagen wie Starkregen, Stürme, aber auch von Trockenzeiten zu beobachten.**

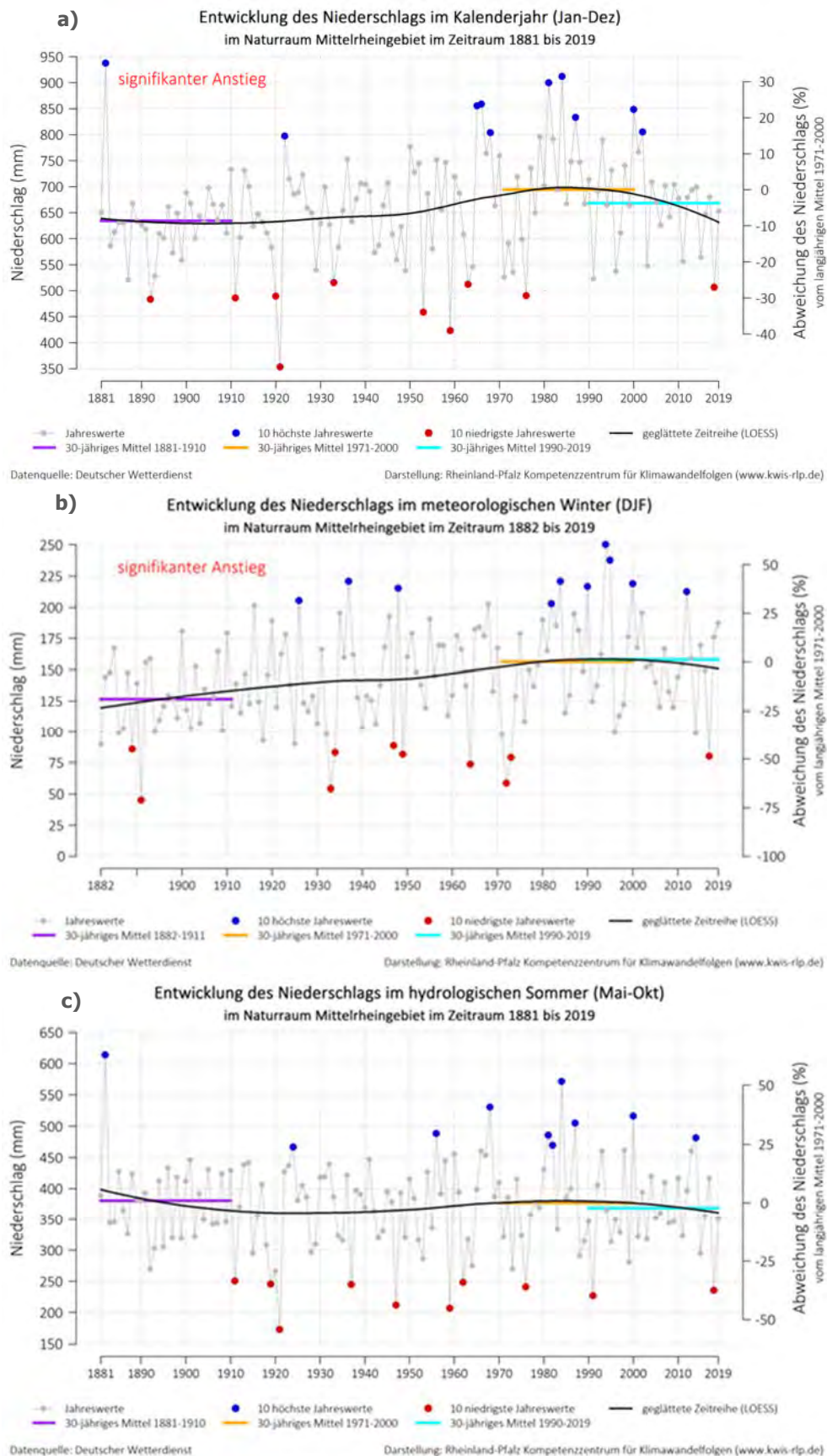


Abbildung 22 Zeitliche Entwicklung des Jahresniederschlags im Mittelrheingebiet (a) sowie die Entwicklung des Mittelrhein-Niederschlags im hydrologischen Winter (b) und Sommer (c) (Kompetenzzentrum Klimawandelfolgen RLP, 2020).

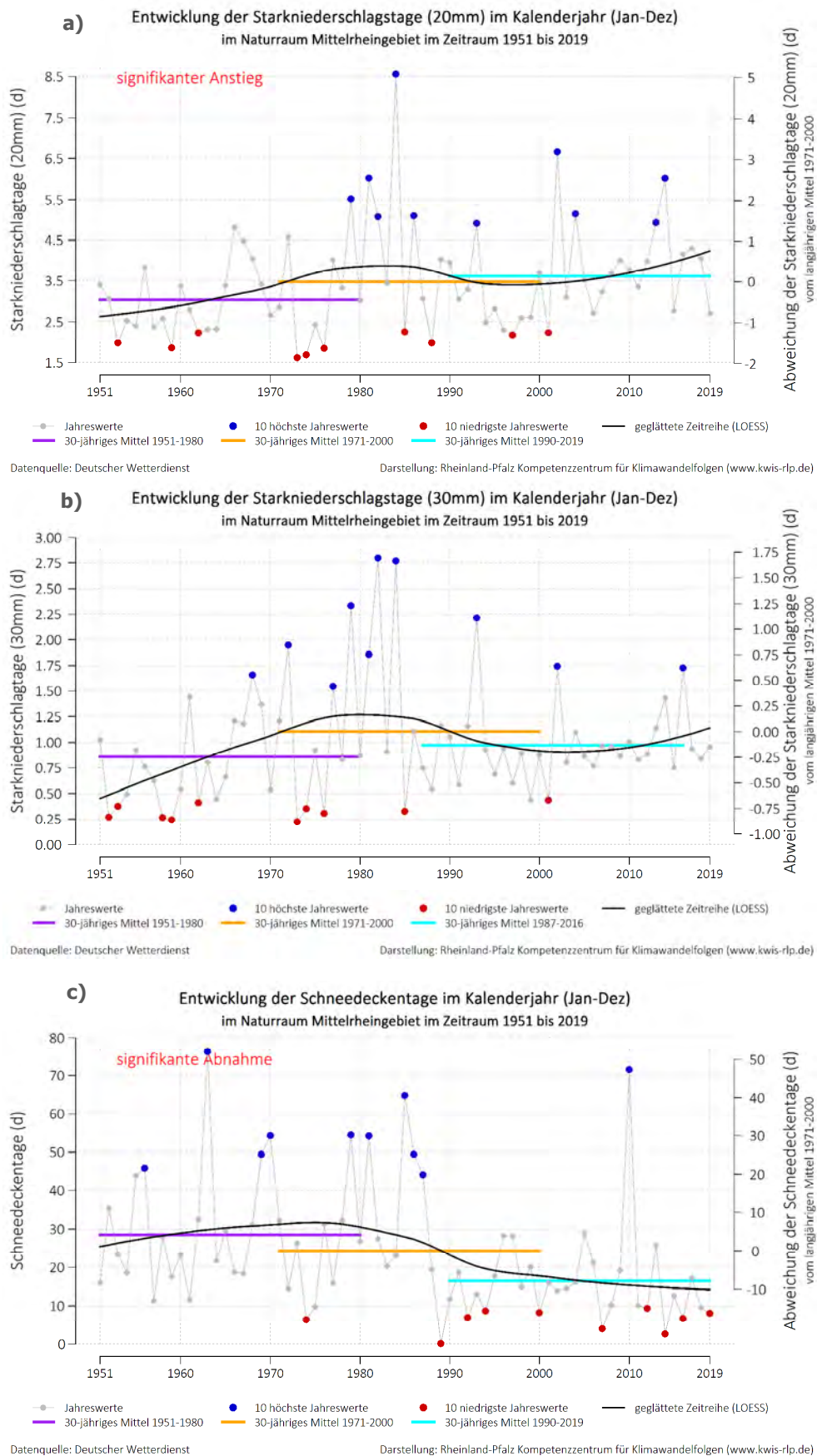


Abbildung 23 Entwicklung der Starkniederschlagstage: Tagessumme > 20 mm (a), > 30 mm (b) sowie der Schneedeckentage (c) im Mittelrheingebiet (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020)

Für das gesamte Mittelrheintal stellt Abbildung 24 eine mögliche zukünftige Entwicklung des Jahresniederschlags (a), sowie Summen des meteorologischen Sommers (b) und Winters (c) bis 2100 nach SRES A1B, RCP 4.5 und 8.5 vor. Es handelt sich um 30-jährige Mittel, welche als Abweichung vom langjährigen Mittel (1971-2000) dargestellt werden. Alle Szenarien ergeben für den Jahresniederschlag tendenziell einen leichten Anstieg. Insbesondere die alleinige Betrachtung der Wintermonate ergibt einen deutlichen Anstieg, wohingegen die Spannweite der Änderung in den Sommermonaten von einer deutlichen Zunahme bis zu einer starken Abnahme variiert. Tendenziell liegen jedoch mehr Ergebnisse im Bereich der abnehmenden Niederschläge für den Sommer.

Für die Untersuchungsregion Oberes Mittelrheintal wurden, wie auch für die Lufttemperatur die Analysen der Niederschläge separat durchgeführt. Es wurden auch die gleichen Zeitperioden sowie Signifikanztests verwendet.

Für die Evaluierung der Klimaänderungen zwischen 1960 und 2100 wurden acht Modellläufe ausgewählt und jährliche Niederschlagssummen kalkuliert. Die Ergebnisse aller Modelle sind in Abbildung 24 dargestellt. Insgesamt ist ein minimaler steigender Trend der Jahresniederschläge erkennbar.

Die Ergebnisse der Analyse sind anhand von 30-jährigen Mittelwerten, deren Differenzen zueinander sowie der vorliegenden Signifikanz in Tabelle 2 dargestellt. Lediglich zwei aus acht Modellläufen zeigen signifikante Ergebnisse: CLM A1B Lauf 2 und CLM B1 Lauf 1. Weder Zunahme noch Abnahme der jährlichen Niederschläge im Oberen Mittelrheintal sind somit unter dem gegebenen Ensemble statistisch eindeutig beweisbar. Es ist jedoch dringend zu beachten, dass es sich um Jahressummen handelt. Die Verteilung zwischen den Jahreszeiten wurde hierbei nicht beachtet. Es ist somit durchaus möglich, dass auch die vorliegenden Szenarien bei weiteren Auswertungen beispielsweise zu dem Ergebnis der zunehmenden Niederschläge im Winter und abnehmenden Niederschläge im Sommer kommen würden (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2 Mittlere Jahresniederschläge für die drei ausgewählte Klimaperioden (30-jährige Mittel) und die entsprechende Klimaänderungssignale für die nähere und ferne Zukunft nach unterschiedlichen Modell/Szenario Kombinationen.

Jahresniederschlag [mm]	CLM_A1B_1	CLM_A1B_2	CLM_B1_1	CLM_B1_2	Wettreg. Rcp26	Wettreg. Rcp85	CanESM2 rcp 85	MIROC5 rcp85
1971-2000	814,61	813,28	814,61	813,28	702,07	702,07	725,95	1985,50
2021-2050	821,95	881,27	887,00	825,21	726,82	721,56	690,59	2035,50
2071-2100	829,99	833,87	855,87	829,78	713,64	745,70	746,27	2085,50
Diff 2021-2050 zu 1971-2000	7,34	67,98	72,40	11,93	24,75	19,48	-35,37	50,00
Diff 2071-2100 zu 1971-2000	15,38	20,58	41,26	16,49	11,56	43,63	20,32	100,00
Signifikanz	nein	ja	ja	nein	nein	nein	nein	nein

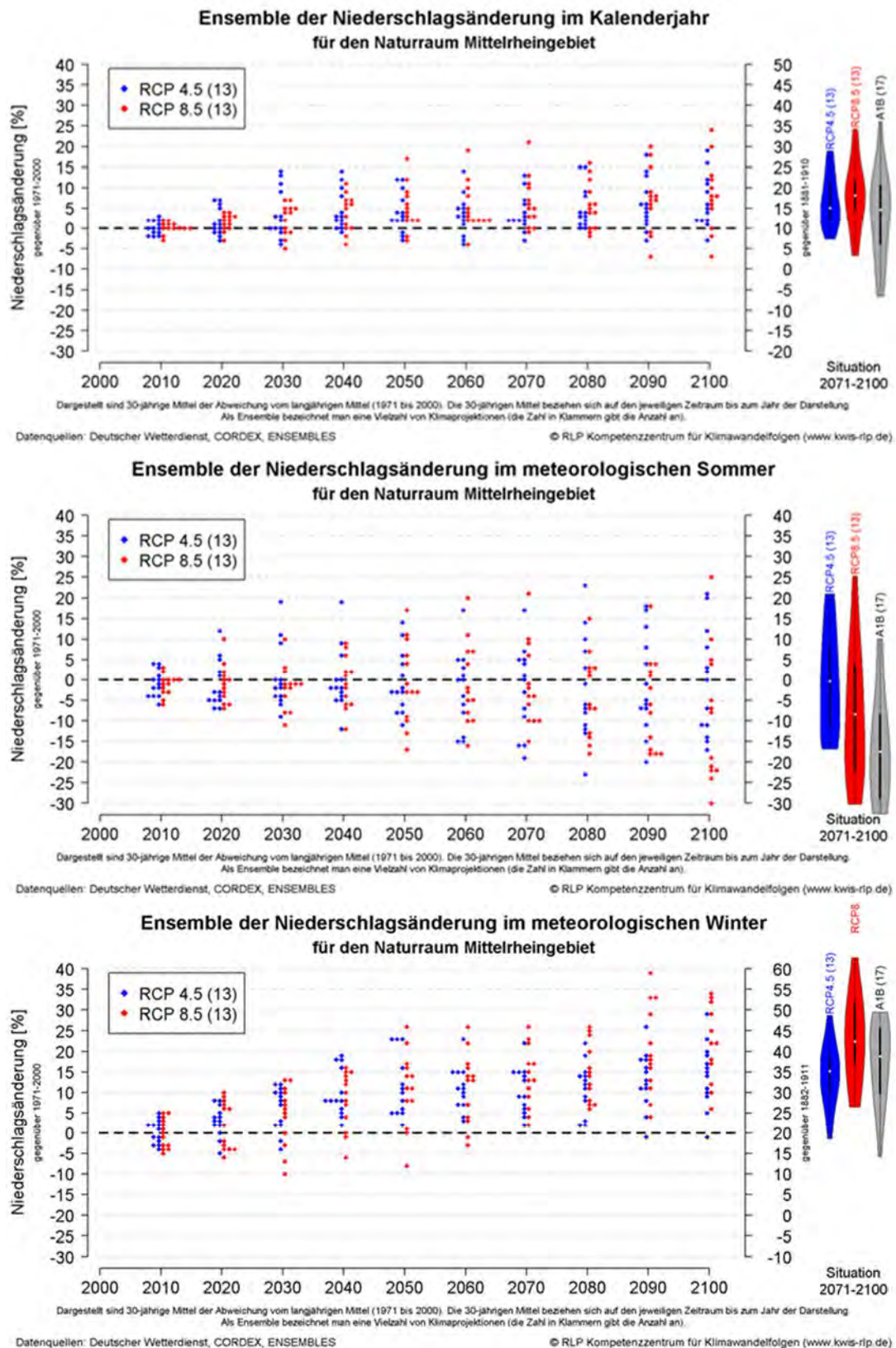


Abbildung 24 Entwicklung der Jahressumme des Niederschlags (a) sowie Niederschlagssummen für meteorologische Sommer (b) und Winter (c) im Mittelrheingebiet bis 2100 gemäß Klimaszenarien SRES A1B, RCP 4.5 und RCP 8.5 (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020)

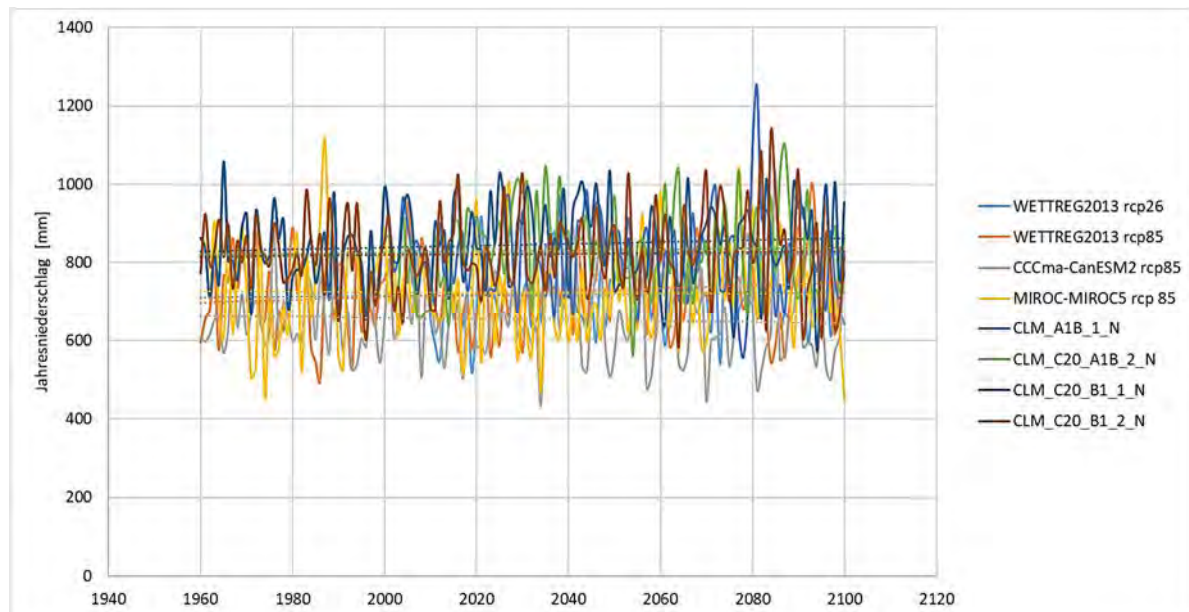


Abbildung 25 Entwicklung Jahresniederschläge im Oberen Mittelrheintal während der Periode 1961- 2100 gem. den Szenarien: A1B, B1, RCP 2.6 und RCP 8.5.

Auch innerhalb des Oberen Mittelrheintals gibt es lokale Unterschiede in der Entwicklung des Klimawandels (Abbildung 26). Es ist deutlich zu erkennen, dass am Ende des 21. Jh. in nördlichen und westlichen Teilen des Oberen Mittelrheintals die Niederschläge etwas zunehmen und im Süden und Osten gleichbleiben bzw. sehr leicht abnehmen.

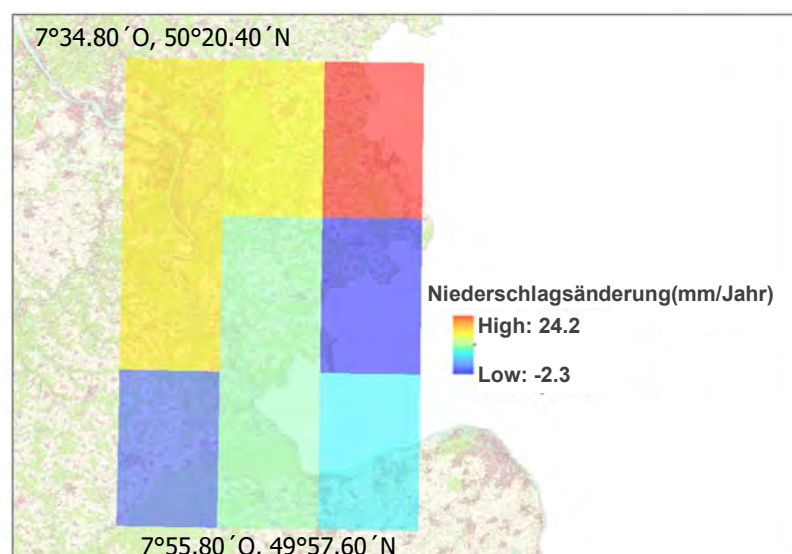


Abbildung 26 Beispiel der räumlichen Verteilung des Klimaänderungssignals für Jahressumme des Niederschlags im Oberen Mittelrheintal von 2071-2100 zu 1971-2000 unter dem Modell CLM Szenario A1B Lauf 1 (mm pro Jahr).

In Tabelle 16 (Seite D im Anhang) werden die jetzige Situation sowie die Klimaänderungssignale für die Anzahl der Tage mit Starkniederschlägen ($>20 \text{ mm Tag}^{-1}$) pro Jahr bzw. pro 30 Jahre dargestellt. **Als Beispiele für die Untersuchungsregion werden drei Stationen ausgewählt: Bacharach, Oberwesel und Boppard.** Es ist zu erkennen, dass in allen Szenarien die Anzahl der Tage mit Starkniederschlägen von 1971-2000 bis 2071-2100 leicht zunimmt. Am stärksten sind die Zunahme in den Läufen Miroc5 RCP8.5 ($+1,8 \text{ Tag Jahr}^{-1}$) und Wettreg2013 RCP 8.5 ($+2,2 \text{ Tag Jahr}^{-1}$).

Zusammenfassung

Der weltweit beobachtete Klimawandel von ca. +1 °C ist besonders stark in der Bundesrepublik Deutschland mit ca. +1,5 °C ausgeprägt. Die Sommer werden trockener und die Winter milder. In RLP ist der Klimawandel noch intensiver verglichen mit Deutschland mit einer signifikanten Zunahme von ca. 1,6 °C. Ebenso ist eine Zunahme der Winterniederschläge zu erkennen.

Das Mittelrheintal ist in RLP die wärmste Region. Die mittlere und maximale Temperatur nimmt seit Beginn der Wetteraufzeichnungen signifikant zu. Wie in Abbildung 15 verdeutlicht nehmen die heißen Tage ($T_{\max} > 30$ °C) und die Tropennächte ($T_{\min} > 20$ °C) signifikant zu. Bis zum Jahr 2100 wird eine Temperaturänderung von + 2,5 bis + 6 °C projiziert. Die Projektionen zeigen außerdem eine signifikante Abnahme der Eis- ($T_{\max} < 0$ °C) und Frosttage ($T_{\min} < 0$ °C) an (Abbildung 17).

Die Entwicklung der Niederschlagssummen zeigt eine signifikante Zunahme der Winterniederschläge. Für die Sommerniederschläge ist kein signifikanter Trend zu erkennen. Signifikant ist aber die Zunahme der Starkniederschläge (>20 mm/Tag) wie in Abbildung 23 dargestellt ist. Kein Trend kann für die Starkniederschläge über 30 mm/Tag dargestellt werden.

Die Abnahme der Schneetage ist signifikant zu erkennen. Die Projektionen der Niederschläge für das Obere Mittelrheintal bis 2100 zeigen eine Zunahme der Winter- und Jahresniederschläge bis 2100. Die meisten der Modelle geben jedoch kein signifikantes Ergebnis aus.

Klimaanpassung ist im Sinne der Vorsorge für Kommunen dringend zu empfehlen, damit die Schäden durch Temperaturextreme sowie Starkniederschläge (>20 und 30 mm) so gering wie möglich ausfallen.

3.5. FOLGEN DES KLIMAWANDELS FÜR DAS OBERE MITTELRHEINTAL

Wassertemperatur

Die gezeigte Erwärmung kann auch zur Erhöhung der Wassertemperatur im Rhein führen. So ist die Temperatur des Rheins bereits im Mittel von 1978 bis 2011 um rund 1-1,5 °C angestiegen, und die Tage, an denen die Wassertemperatur von 25° C überschritten wird, haben zugenommen (IKSR, 2015b, S. 11). Die Klimaprojektionen gehen auch auf die Temperaturen des Rheins ein: Für die nahe Zukunft (2021-2050) zeigen die Simulationen im August eine um etwa 1,5°C erhöhte Wassertemperatur, während in der fernen Zukunft (2071-2100) die Zunahme 3,5° C betragen kann – und zwar ohne den Einfluss von Wärmeeinleitungen (ebd.). Zunahmen der Temperaturen des Rheins bedeuten für die Orte am Rhein weniger Kühlung wie auch eine Veränderung der Ökosysteme und Biodiversität.

Starkniederschläge und Sturzfluten

Starkregenereignisse führen zu Erosionsschäden und Bodenverlust und zu großen Schäden an Infrastruktur wie Häusern, Fahrzeugen, Brücken, Straßen oder Schienenwegen. Gerade die steilen Hänge des Oberen Mittelrheintals sind für Erdrutsche besonders anfällig. In Kestert kam es im Jahr 2011 zu einem Erdrutsch, der sogar eine Zugentgleisungen zur Folge hatte (vgl. Abbildung 27).



Abbildung 27 Durch Sturzflut verursachte Schäden im Mittelrheintal: Erdrutsch und Zugentgleisung, Kestert (links, Quelle: Dedekind, 2011); Überschwemmung in St. Goar (Mitte, Quelle: Breitbach, 2019), Sturzflut in Fischbach (rechts, Quelle: Nitsch, 2018)

Die oben gezeigten Veränderungen der jährlichen Niederschlagssummen sowie die Zunahme von Starkregenereignissen, die auch zu der Zunahme von Sturzfluten führt. Die hohen Niederschlagsmengen des Starkregens überfordern kleine Bäche, Abwasser und Regenrückhaltesysteme. Damit bahnen sich Sturzfluten ihren Weg durch die Kommunen und führen somit zu ökonomischen und infrastrukturellen Schäden (Abbildung 27).

Hoch- und Niedrigwasser des Rheins

Das Abflussregime des Rheins – also die Schwankungen der pro Zeit abgeführten Wassermenge – ist sowohl von Niederschlägen geprägt als auch von Schnee und Gletschern der Alpen. Im Mittelrheintal dominiert der Einfluss der Gewässer, die die Mittelgebirge entwässern, wie Neckar, Main oder Nahe, und damit ein von Regen geprägtes Abflussregime (IKSR, 2015a). Die Winterniederschläge im 20. Jhd. haben im gesamten Rheineinzugsgebiet um 10-20% zugenommen (IKSR, 2015b, vgl. auch Abbildung 11 c).

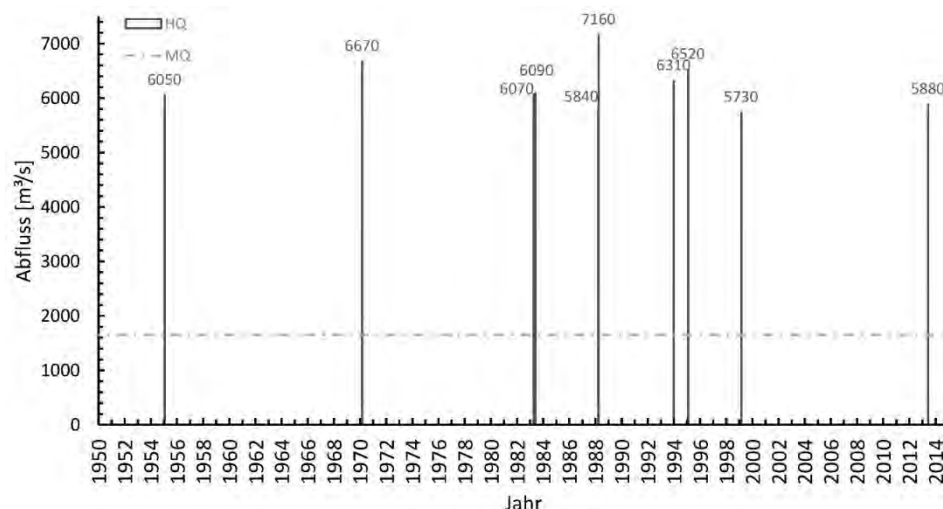


Abbildung 28 Abflüsse der zehn größten Hochwasserereignisse am Pegel Kaub, abgeleitet aus Tagesmittelwerten von 01.11.1930 bis 31.12.2018 (Hochschule Koblenz/Kimmel 2020, Datengrundlagen: BfG, 2020; LfU RLP, o.J.–b)

Die letzten größeren Hochwässer waren die von Dezember 1993 sowie Januar 1995 („Weihnachtshochwasser“). Die Hochwässer danach erreichten mit Ausnahme des Juni 2013 nicht mehr dieselben extremen Ausmaße (Abbildung 28 und Tabelle 3, (BfG, 2020)). Die zunehmenden Winterniederschläge können auch zu größeren Hochwasserabflüssen führen. Vor allem

kleine bis mittlere Hochwässer werden zunehmen. Für die nahe und ferne Zukunft (Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100) wird stromabwärts des Pegels Kaub für häufige Hochwasser mit Änderungen von -5% bis +15% gerechnet, für mittlere Hochwässer mit 0 -20% und für seltene Hochwässer mit -5% bis +25% (IKSR, 2011, 2015b).

Tabelle 3 Tabellarische Darstellung der zehn größten Hochwasserereignisse am Pegel Kaub, abgeleitet aus Tagesmittelwerten von 01.11.1930 bis 31.12.2018 (Hochschule Koblenz/Kimmel 2020, Datengrundlagen: BfG, 2020; LfU RLP, o.J.–b)

Rang	Datum	Abfluss [m ³ /s] (Tagesmittel)
1	29.03.1988	7160
2	27.02.1970	6670
3	30.01.1995	6520
4	23.12.1993	6310
5	29.05.1983	6090
6	13.04.1983	6070
7	19.01.1955	6050
8	05.06.2013	5880
9	19.03.1988	5840
10	24.02.1999	5730

Die Sommerniederschläge im Oberen Mittelrheintal zeigen keine signifikante Abnahme (Abbildung 11d). Trotzdem sind Abnahmen bis zu 8% für Mittelwasser und Niedrigwasser zu verzeichnen (IKSR, 2015b). Beim **Niedrigwasser** hat vor allem das Jahr 2018 gezeigt, welche ökonomischen Folgen durch die Einschränkungen der Schifffahrt und auch der Kraftwerke entstehen können. Niedrigwasser wie in 2018 gab es schon früher am Rhein – sie traten in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts häufiger auf (z.B. 1921, 1947). Niedrigwasser können durch stabile Großwetterlagen bewirkt werden, bei der zentrale Hochdruckgebiete z.B. durch verminderte Höhenwinde (Jetstream) nicht von Tiefdruckgebieten verdrängt werden (vgl. BfG, 2019; KLIWA, 2019a). Die Klimaprojektionen zeigen für Sommer eine Zunahme von stabilen Großwetterlagen wie in 2018, die zu längeren Niedrigwasserperioden führen können (BfG, 2019; KLIWA, 2019a). Projektionen für den Zeitraum 2071-2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990 gehen von einer Zunahme von im Mittel ca. 14 auf über 30 Tage Niedrigwasser am Pegel Kaub im Mittelrheintal aus (Schwankungsbreite für 2071-2100 von 21-55 Tage) (BfG, 2019, S. 19). Für denselben Zeitraum gehen Simulationen von einer Abnahme des sommerlichen Mittel- und Niedrigwasserabflusses von 10-25% aus (IKSR, 2015b, S. 10)



Abbildung 29 Hoch- und Niedrigwasser am Rhein: Hochwasser in St. Goar, 2011 (links, Quelle: Breitbach, 2011); Rhein-Niedrigwasser im Sommer 2018 – der Mäuseturm bei Bingen. (BfG, 2019, S. 12)

Abgeleitete Folgen für Grundwasserneubildung und Wasserversorgung

Die durch den Klimawandel verursachte saisonale Verschiebung der Niederschläge (weniger Wasser im Sommer und mehr Wasser im Winter) kann für die Grundwasserneubildung problematisch sein, da trockener und nasser Boden Wasser nicht so gut aufnimmt wie Boden mit mittlerer Feuchte. Es könnte also sein, dass sowohl im Winter als auch im Sommer die Niederschlagsmengen stärker zum Direktabfluss als zur Grundwasserneubildung beitragen. Umgekehrt könnten steigende Niederschläge im Winter, d.h. in einer Jahreszeit mit geringer Vegetationsdecke und Verdunstung, diesen Effekt durch steigende Grundwasserneubildung konterkarieren.

Das Mittelrheintal – v.a. der Rhein-Lahn-Kreis und der westliche Hunsrück - gehört zu den Regionen mit knappem Grundwasserdargebot. In Rheinland-Pfalz hat die Grundwasserneubildung von 1951 bis 2015 leicht abgenommen (Abbildung 126 auf Seite B im Anhang). Die mittlere Grundwasserneubildung über Zeiträume von jeweils 30 Jahren lag bisher zwischen 96 und 112 mm pro Jahr, je nach Bezugszeitraum (1951-1980 bzw. 1951-2010; KLIWA, 2017; MUEEF RLP, 2018). Für die Zukunft ist in Rheinland-Pfalz mit einem Rückgang der Grundwasserneubildung zwischen 15-25% zu rechnen, in Regionen wie Pfälzerwald und Oberrheingraben sogar von mehr als 25% (MUEEF RLP, 2018, S. 7).

Für die Trinkwassergewinnung könnte ein Rückgang der Grundwasserneubildung bedeuten, dass Brunnen versiegen und ggf. tiefer angelegt werden müssen. In Rheinland-Pfalz gibt es lokale Unterschiede der Betroffenheit: die Regionen Rhein-Lahn-Kreis und der westliche Hunsrück haben ein knappes nutzbares Grundwasserdargebot und sind damit potenziell durch den Klimawandel verwundbare Regionen, wohingegen die Pfalz mit mehr als 300 m/a eine vergleichsweise hohe Grundwasserneubildungsrate hat und damit weniger verwundbar ist (MUEEF RLP, 2018). Im Mittelrheintal erfolgt die Wassergewinnung in vielen Orten mit größeren Anteilen von Uferfiltrat aus dem Rhein. Dazu kommt die Wassergewinnung aus Brunnen ohne Uferfiltrat sowie die Nutzung von Quellwasser. Die Wasserwerke prüfen die Folgen des Klimawandels auf Wasserverfügbarkeit und Wasserqualität.

4 BEDEUTUNG VON LANDSCHAFTSELEMENTEN UND LANDNUTZUNGEN ZUR STEUERUNG DES REGIONALEN UND LOKALEN KLIMAS

In folgenden Kapiteln soll der Frage nachgegangen werden, welche Rolle einzelnen Elementen des Landschaftsraumes wie Grün- oder Vegetationsstrukturen, Gewässer- und Wassernutzung, Boden oder Frisch- und Kaltluftentstehung sowie -fließwegen bei der Beeinflussung des regionalen oder des lokalen Klimas zukommen kann. Über welche Landschaftselemente und Wasserangebote und -nutzungen lässt sich das Klima verbessern? Was leisten die Landschaftselemente bzw. Nutzungen in Bezug auf Klima und welche Handlungsoptionen bieten sich?

4.1 GRÜNSTRUKTUREN

Grünstrukturen wie Parks, Gärten, Grünflächen und vor allem Baumbestände sowie Fassaden- und Dachbegrünungen, aber auch die Art der Oberflächenausbildung (versiegelt oder offen) können das jeweilige Lokalklima maßgeblich beeinflussen (vgl. Abbildung 30). Grüne Infrastrukturen leisten als vernetzte Elemente und Teilflächen nicht nur einen Beitrag zur Sicherung von Biodiversität und Lebensraumerhalt sondern zur Verbesserung des Klimas. Das im urbanen, bebauten Bereich herrschende Lokal- und Kleinklima bestimmt stark die konkreten Wohn- und Lebensbedingungen sowie die Aufenthaltsqualitäten für Menschen im Freiraum. Hitze und Sonneneinstrahlung kann zu gesundheitlichen Belastungen führen.

Eine Erhöhung des Grünanteils im urbanen, besiedelten Raum kann dabei helfen, die Effekte von erwarteten Klimawandelfolgen, insbesondere im Hinblick auf Hitze und Starkregenereignisse, zu mindern. Im Hinblick darauf dient eine ausreichende Grünversorgung der Sicherung bioklimatischer und klimaökologischer Qualitätsansprüche der Kommunen und der Bevölkerung.

Im Hinblick auf die Klimawandelfolgen **Temperaturanstieg** und **Hitze** kann der Einsatz von Grünstrukturen auf zweierlei Arten für Kühlung sorgen (vgl. Abbildung 30 auf der Folgeseite): Einerseits durch Verschattung und folglich Abkühlung der Fläche, andererseits durch Verdunstung über die Blattmasse. Zusätzlich dient der offene Boden als Wasserspeicher.

Als relevante Prozesse im Wasserkreislauf seien hier Interzeption (Rückhalt von Wasser auf Vegetation), Transpiration (Verdunstung über die Blätter) sowie Evaporation (Verdunstung von der Bodenfläche) erwähnt.

SCHEMA: AUSWIRKUNGEN VON GRÜN AUF DAS STADTKLIMA

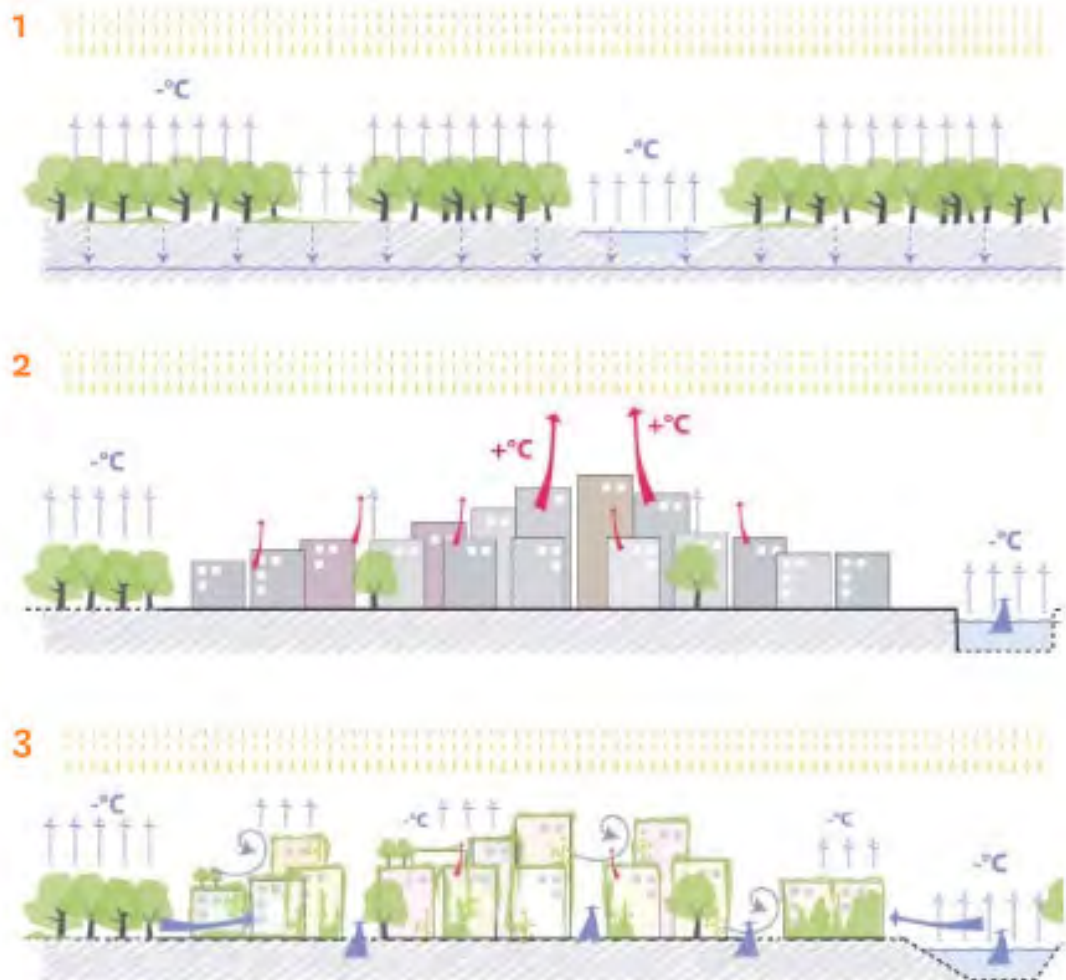


Abbildung 30 Schema: Auswirkungen von Grün auf das Stadtklima: 1) Verdunstungskühle von Vegetations- und Wasserflächen verringert die Erwärmung, 2) Bebaute Umwelt speichert die Wärme der Sonneneinstrahlung, 3) Vegetations- und Wasserflächen, Kaltluftbahnen, Fassaden- und Dachbegrünungen etc. wirken positiv auf das Stadtklima (Quelle: Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung [HMWVL], 2012, grafisch leicht verändert)

Insbesondere Stadtbäume führen zu einer merklichen Reduzierung der umgebenden Außenlufttemperatur um bis zu 6°C (Abbildung 31). Dies ist besonders relevant, da die Kühlungseffekte im unmittelbaren Aufenthaltsbereich des Menschen, d.h. bis zu einer Höhe von 2,50 m wirksam werden.

Fassaden- und Dachbegrünungen bergen neben einer Abkühlung der Umgebungsluft zusätzlich das Potenzial einer natürlichen Klimaanlage für das jeweilige Gebäude.

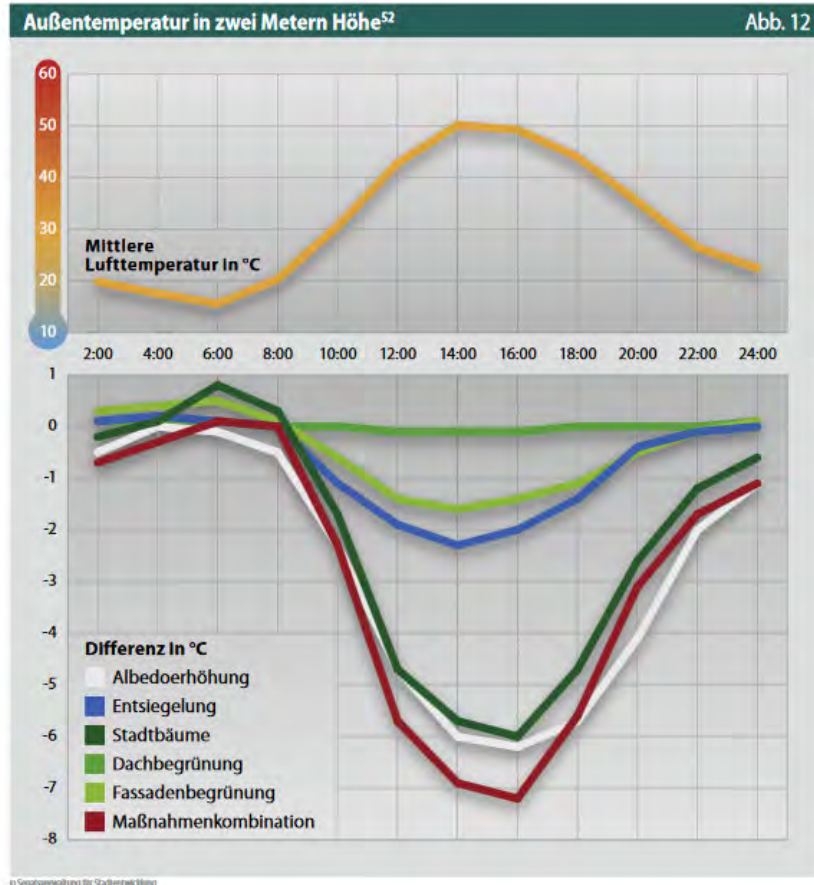


Abbildung 31 Einfluss verschiedener Klimaanpassungsmaßnahmen auf die lokale Außentemperatur (Quelle: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin, 2014)

In Bezug auf die erwartete Erhöhung von **Starkregenereignissen** gewährleisten Grünflächen gegenüber versiegelten Flächen einen besseren Abfluss bzw. ermöglichen die Versickerung und Rückhaltung von Niederschlägen (Abbildung 32). Darüber hinaus führt der Niederschlagsrückhalt, die verlangsamte Versickerung sowie Verdunstung zu einem Abkühlungseffekt.

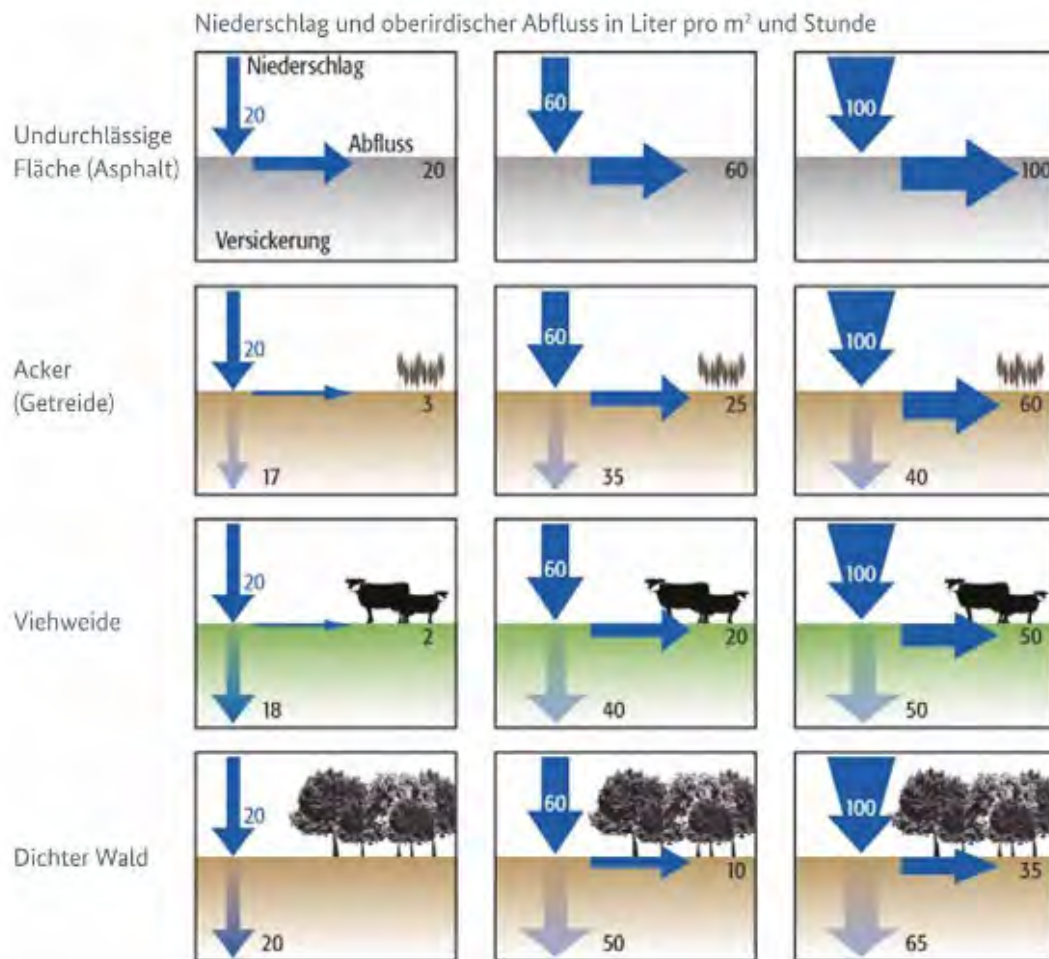


Abbildung 32 Niederschlag und oberirdischer Abfluss in Abhängigkeit des Untergrundes (Quelle: BMVI, 2017)

Klimaökologische Leistung verschiedener Grünstrukturen

Im Folgenden wird auf Stadtbäume sowie Fassaden- und Dachbegrünungen genauer eingegangen.

Stadtbäume tragen dank ihrer großen Blattmasse und damit einhergehenden Verdunstungsleistung in besonderem Maße zur Abkühlung der Umgebungsluft bei (Abbildung 31, Abbildung 33). Ein ausgewachsener Stadtb Baum verdunstet ca. 400 Liter Wasser am Tag und trägt dank Kohlenstoffbindung (18 kg CO₂/Tag) und Sauerstoffproduktion (13 kg O₂/Tag) ebenso zur Verbesserung der Luftqualität bei (Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau [LWG], 2015). Darüber hinaus wird die Oberflächentemperatur umliegender Flächen durch Schattenwurf um bis zu 15 °C reduziert (Gillner et al., 2015, zitiert in S. Böll et al., 2018). Sie stellen zudem einen wichtigen Lebensraum für die urbane Tierwelt, insbesondere Vögel und Insekten, dar. Für letztere konnte in einer Pilotstudie ein überraschend hoher Individuen- und Artenreichtum nachgewiesen werden (Susanne Böll et al., 2020).

Mein Freund der Stadtbaum



Ein ausgewachsener Stadtbaum ...

- ☺ nimmt an einem Sommertag 18 Kilo Kohlendioxid auf und gibt nur einen Teil davon nachts wieder ab
- ☺ produziert an einem Sommertag 13 Kilo Sauerstoff, etwas mehr als er nachts wieder verbraucht
- ☺ schafft Lebensraum für Tiere
- ☺ reduziert die Windgeschwindigkeit
- ☺ vermindert den Lärm
- ☺ bindet bis zu einer Tonne Staub pro Jahr



- ☺ spendet bis zu 150 m² Schatten und kühlt seine Umgebung im Sommer um bis zu 3°C ab

- ☺ verdunstet ca. 400 l Wasser am Tag

- ☺ verschönert das Stadtbild

- ⊗ wird regelmäßig stark beschnitten
- ⊗ ist häufig von Schädlingen befallen
- ⊗ wird bei Bauarbeiten und durch Autos verletzt
- ⊗ ist den Abgasen des Verkehrs ausgesetzt

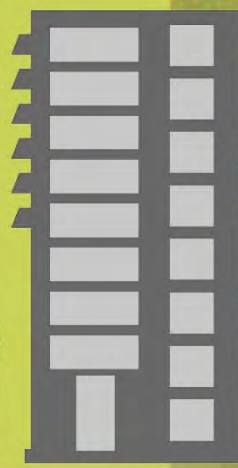


Abbildung 33 Leistungen eines Stadtbaumes in Zahlen (Auszug, Quelle: (LWG, 2015))

Fassadenbegrünungen verringern in erster Linie die Aufheizung des Gebäudes im Sommer sowie den Wärmeverlust im Winter. Für kübelgebundene Kletterpflanzen wurden tägliche Verdunstungsraten von 10 bis 15 l pro m² Kübeloberfläche gemessen (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin, 2010). Eine 20 m hohe Kletterpflanze erzeugt eine Verdunstungskälte von 280 kWh pro Fassade (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin, 2010, S. 35). Für die CO₂-Bindung ergaben sich im Durchschnitt 2,3 kg CO₂/m² für eine 1000 m² große und 20 cm tiefe Wandbegrünung (Bartfelder & Köhler, 1987, S. 419). Zusätzlich hervorzuheben ist die Fähigkeit zur Staubbindung. Am Beispiel des Wilden Weins ließen sich jährliche Staubbefälle bis zu 1 kg/m² an Blattoberseiten feststellen (Thönnessen, 2006 in Stadt Wien, 2019).

Darüber hinaus tragen Fassadenbegrünungen zum Schallschutz sowie Erhöhung der Biodiversität bei. In Bezug auf Starkregenereignisse können sie einen sinnvollen Beitrag zur Niederschlagsrückhaltung sowie Abflussverzögerung leisten. Diese lässt sich mit spezieller Substratauswahl, z.B. Pflanzenkohle, zusätzlich steigern. Pflanzenkohle bindet zusätzlich Schad- und Nährstoffe und trägt zur Bodendurchlüftung bei. Als nachteilig ist neben den Kosten der Wartungsaufwand zu nennen, der sich insbesondere durch die nötige Bewässerung während längerer Trockenzeiten erhöhen wird. Als Lösungsansatz ist hier eine Bewässerung mit Grauwasser denkbar.



Abbildung 34 Beispiel einer Fassadenbegrünung (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner)

Dachbegrünungen (Abbildung 35) stellen eine weitere Möglichkeit für Grünstrukturen an Gebäuden dar. Analog zur Begrünung der Fassade bewirken Dachbegrünungen eine unmittelbare Kühlung des darunterliegenden Gebäudes durch Verschattung und Verdunstung um ein Viertel (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin, 2010). Eine interessante Möglichkeit zur zusätzlichen Energiegewinnung stellt die Kombination mit Photovoltaik-Anlagen dar. Die Kühlung der umgebenden Begrünung führt zu einer verbesserten Leistung während die Module selbst einen Witterungsschutz für die umgebenden Pflanzen darstellen. Ein weiterer Nutzen im Hinblick auf Niederschlagsereignisse liegt im Wasserrückhaltevermögen des Substrates. Dieses kann den



Abbildung 35. Beispiel einer extensiven Dachbegrünung mit Sedum- und Kräutergesellschaften (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner)

Niederschlagsabfluss des Gebäudes um 60 bis 79 % reduzieren (Hietel et al., 2016). Ähnlich der Fassadenbegrünung tragen Dachbegrünungen sowohl zur Förderung der Biodiversität als auch Luftreinhaltung bei. Zu beachten ist bei der Installation einer Dachbegrünung jedoch die Vermeidung von dunklen, unbepflanzten Stellen, um eine lokale Erhitzung zu vermeiden. Die Abdeckung mit hellen Kieselsteinen könnte in solchen Fällen durch die erhöhte Albedo eine Aufheizung reduzieren bzw. verhindern.

Grünflächen, Parks und Gärten können potenziell als Kühlinsel (Urban Cool Island, UCI) wirken und die Umgebungs- sowie Oberflächentemperaturen in der (unmittelbaren) Umgebung abkühlen. Parkanlagen mit dichtem Baumbestand bleiben nicht nur tagsüber deutlich kühler als unmittelbar angrenzende Bebauung, sondern tragen durch nächtliche Kaltluftbildung zusätzlich zur Abkühlung der angrenzenden bebauten Umgebung dar. Im Tagesverlauf wurde in einer urbanen Parkanlage Temperaturmaxima um 27°C gemessen, wohingegen sich bebaute Stadtflächen auf über 40°C erwärmten (Fickert, 2017).

Im Gegensatz zu kühlenden Grünflächen stellen Stein- bzw. Schottergärten im privaten Bereich, deren Verbreitung in den vergangenen Jahren stark zugenommen hat, eine zusätzliche

Wärmequelle dar. Hier könnte die Bevölkerung aktiv mit einbezogen werden um die Entsiegelung privater Flächen zu erhöhen.

Abbildung 36 verdeutlicht die vorangestellten Informationen zur Temperaturreduktion durch verschiedene bauliche Maßnahmen inklusive Grünstrukturen. Es wird deutlich, dass in der für den Aufenthalt von Menschen relevantesten Umgebung bzw. Höhe bis ca. 2,50 m Stadtbäume und Entsiegelung den stärksten Effekt im Hinblick auf die Temperaturreduktion zeigen. Die Anlage von Fassadenbegrünungen an den Südseiten der Gebäude trägt ebenfalls zur Temperaturreduktion der unmittelbaren Umgebung bei. Zusammenfassend stellen Stadtbäume im dargestellten Szenario die effektivste bauliche Maßnahme aus der Gruppe der Grünstrukturen dar.

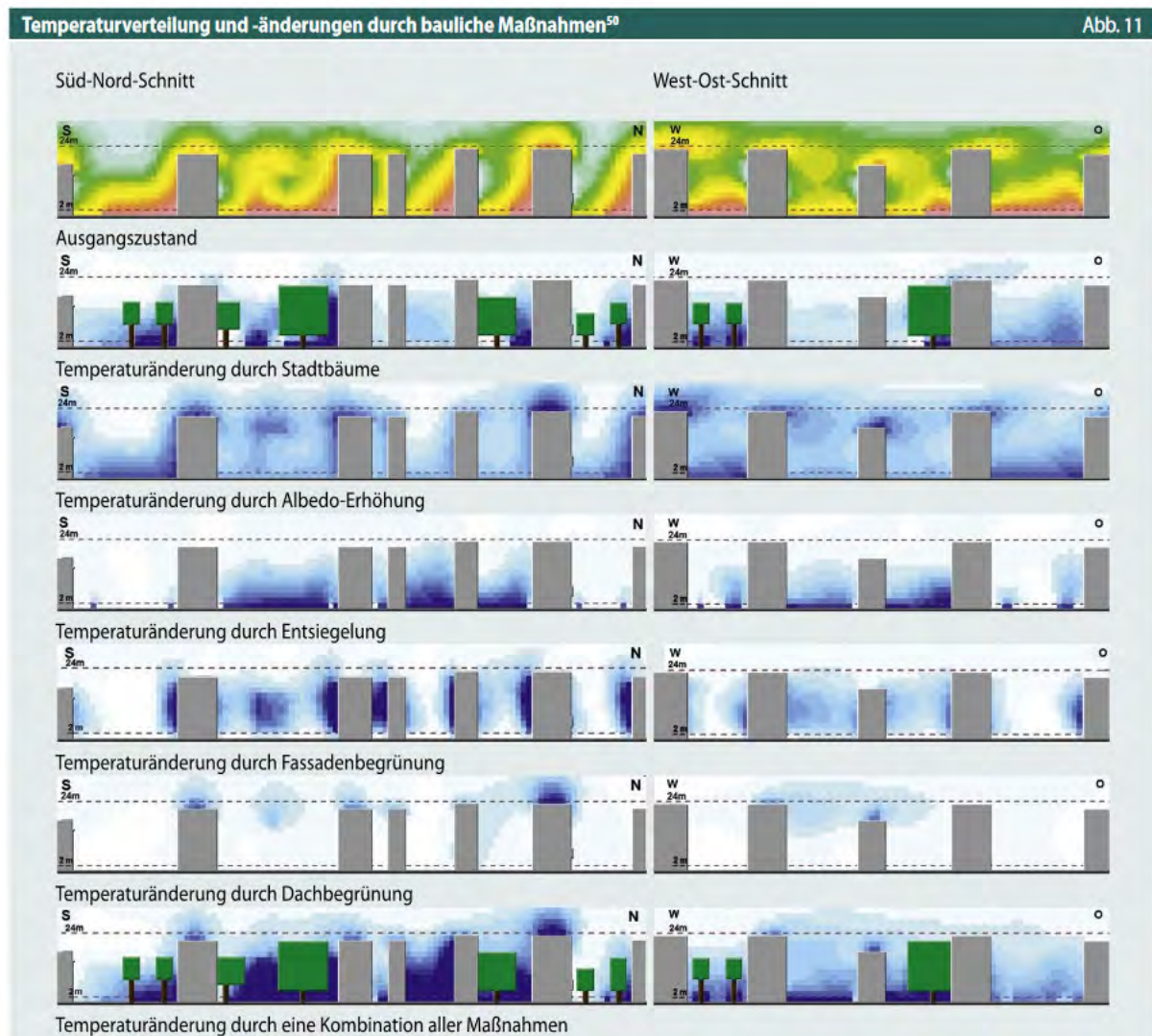


Abbildung 36 Temperaturverteilung und -änderungen durch bauliche Maßnahmen (Quelle: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin, 2010)

Grüne Infrastruktur bietet – ob in ihren Einzelementen oder als flächiges Netz - im Siedlungsbereich wesentliche Möglichkeiten der Klimaanpassung. Es ergeben sich aus den gezeigten Bedeutungen der Grünflächen für das Klima verschiedene Handlungsmöglichkeiten, um den Grünanteil in urbanen, bebauten Räumen zu sichern, zu erhöhen oder die Grünstrukturen zu verbessern.

Hierbei müssen die Kommunen handeln, Strategien entwickeln sowie Maßnahmen planen und umsetzen. Doch auch Privateigentümer sollten mit einbezogen werden und den Anteil an Begrünung auf ihren Grundstücken erhöhen.

Handlungsmöglichkeiten zur Erweiterung von Grünstrukturen

Im vorigen Abschnitt hat sich gezeigt, dass die größten Veränderungen und auch die größten Belastungen des Klimawandels in der zunehmenden Hitze und den zunehmenden Starkregenereignissen liegen werden. Die angeführten klimawirksamen und ökologischen Leistungen von Grünflächen können zu einer Minderung dieser Belastungen beitragen.

Im Folgenden werden Handlungsmöglichkeiten im Hinblick auf die Minderung der thermischen Belastung sowie der Auswirkungen von Extremwetterereignissen aufgezeigt. Es werden darüber hinaus relevante Handlungselemente in der kommunalen Bauleitplanung aufgegriffen.

Tabelle 4 Die Tabelle zeigt fünf Elemente Grüner Infrastruktur und deren Vorteile im Hinblick auf Wasserhaushalt und Lebensqualität (Quelle Jurleit, 2013)

Nutzen	reduziert Regenwasserabfluss					verbessert Lebensqualität												
	reduziert Aufwand der Wasseraufbereitung	verbessert Wasserqualität	reduziert Bedarf an Grauwasserinfrastruktur	reduziert Überschwemmungen	verbessert Wasserversorgung	fördert Grundwasserneubildung	reduziert Salzeinsatz	reduziert Energieverbrauch	verbessert Luftqualität	reduziert CO ₂ -Ausstoß	reduziert städtische Wärmeinsel	verbessert ästhetische Wirkung	schafft Erholungsmöglichkeiten	reduziert Lärmemissionen	stärkt Gemeinschaftsinn	Urbane Landwirtschaft	schafft Lebensräume	trägt bei zu öffentlicher Bildung
Maßnahme																		
Gründächer	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	◐	●	◐	◐	●	●
Baumpflanzung	●	●	●	●	○	◐	○	●	●	●	●	●	●	●	●	◐	●	●
Retention & Versickerung	●	●	●	●	◐	◐	○	○	●	●	●	●	●	◐	◐	○	●	●
Sickerfähige Beläge	●	●	●	●	○	◐	●	◐	●	●	●	○	○	●	○	○	○	●
Regenwasser-nutzung	●	●	●	●	●	◐	○	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	○	○	●

● Ja

◐ Vielleicht

○ Nein

Generell liegen die potenziellen Handlungsmöglichkeiten in den Aufgabenfeldern der so genannten Grünen Infrastruktur (als Netz von unterschiedlichen Grünflächen) insbesondere in Kombination mit blauer Infrastruktur (d.h. Wasserwirtschaft und Wasserhaushalt). Hier sind insbesondere die Auswirkungen auf (extreme) Niederschläge, das Lokal- und Kleinklima sowie das menschliche Wohlbefinden hervorzuheben (Tabelle 4). In dieser Kombination sprechen wir von der Grün-Blauen Infrastruktur, die insbesondere im Hinblick auf Klimaanpassungsmaßnahmen immer mehr Bedeutung gewinnt und für Kommunen unter dem Aspekt der Vorsorge statt Schadensbekämpfung auch wirtschaftlichen Mehrwert bedeuten kann.

Übergeordnet steht die Entwicklung differenzierter Systeme als Netz grüner Infrastrukturen. Dies umfasst einerseits die Erhaltung bestehender sowie Schaffung neuer Freiflächen und Grünstrukturen. Die Schaffung neuer Freiflächen zielt insbesondere auf die Entsiegelung großer Flächen wie beispielsweise Parkflächen ab (vgl. Kapitel 4.3. Bodenversiegelung). Andererseits ist eine Erhöhung des urbanen Grünanteils durch die Integration von Bäumen, Parks und

Grünflächen sowie Begrünungen von Hof-, Dach- und Fassadenflächen anzustreben (Abbildung 37).



Abbildung 37. Verschiedene Varianten zur Begrünung von Dach, Hof- und Fassadenflächen (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner)

Die Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen hängt hierbei von der baustrukturellen Typologie einer Stadt und Ihrer Quartiere ab. Je nach Stadtstrukturtyp ergeben sich deutliche Unterschiede im Anpassungspotenzial durch Grünstrukturen, wie es exemplarisch für verschiedene Berliner Quartiere in Tabelle 5 dargestellt ist.

Tabelle 5 Anpassungspotenziale verschiedener Stadtstrukturtypen am Beispiel Berlins (Quelle: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin, 2010)

Anpassungspotenziale der Referenzgebiete ⁵³							Abb. 13
Stadtstrukturtyp	Maßnahmen						
	Entsiegeln	Albedo erhöhen	Bäume pflanzen	gesamte Fassade begrünen	fensterlose Giebelwände begrünen	Dach begrünen	
1 Blockbebauung Gründerzeit mit Seiten- und Hintergebäuden (Referenzgebiet Charlottenburg)	●●	●●●●	●	●●●	●●	●●	
2 Blockrandbebauung der Gründerzeit mit wenigen Seiten- und Hintergebäuden (Referenzgebiet Friedenau)	●●	●	●	●	●●●●	●●	
3 Blockrand- und Zeilenbebauung der 1920er / 1930er Jahre (Referenzgebiet Friedrichshain)	●	●●●●	●●●●	●●●	●●	●●	
4 massiv veränderte Blockrandbebauung der Gründerzeit (Referenzgebiet Prenzlauer Berg)	●	●●	●●	●	●	●	
6 Hohe Bebauung der Nachkriegszeit (Referenzgebiet Hohenschönhausen)	●●●●	●●	●	●	●●	●	
14 Bebauung mit überwiegender Nutzung durch Handel und Dienstleistung (Referenzgebiet Friedrichstraße)	●	●●●●	●●●●	●●	●	●	
15 Geringe Bebauung mit überwiegender Nutzung durch Gewerbe und Industrie (Referenzgebiet Mariendorf)	●●●●	●●	●	●	●	●●●●	

Anpassungspotenziale der Referenzgebiete: ●●● hoch | ●● mittel | ● gering | ● Maßnahmen, die angesichts ihrer Wirksamkeit für das jeweilige Referenzgebiet zu empfehlen sind.

Hier bieten Stadtbäume abermals das größte Potenzial, da sie sich im Vergleich zu anderen Grünstrukturen für verschiedene Stadtstrukturtypen eignen und explizit empfohlen werden.

Dies gilt insbesondere auch für diejenigen Bebauungstypen mit geringen bis mittleren Anpassungspotenzialen für andere Maßnahmen im Hinblick auf Fassaden- und Dachbegrünung. Maßnahmen zur Verringerung der thermischen Belastung bzw. des Hitzestresses dienen primär der menschlichen Gesundheit und dem Wohlbefinden. Zu diesem Zweck sind die folgenden Maßnahmen von besonderer Bedeutung:

- Sicherung klimaaktiver Grün- und Brachflächen,
- Erhöhung des Grünvolumens in Wärmeinseln,
- Förderung der Verschattung durch Bäume, Hecken, etc.
- Verringerung der Versiegelung

Ersteres zielt insbesondere auf allgemeine Grün- und Brachflächen sowie Luftleitbahnen, Kaltluftentstehungsgebiete ab (vgl. Kapitel 4.4: Kaltluftentstehungsgebiete und -bahnen). In Bezug auf Wärmeinseln sind die Schaffung neuer Grünflächen und -strukturen wie Baumpflanzungen (Abbildung 38) sowie Dach- und Fassadenbegrünungen von besonderem Interesse. Die genannten Maßnahmen dienen der Verringerung der Aufheizung und der damit einhergehenden Verbesserung des thermischen Komforts.



Abbildung 38 Beispiele für Grünstrukturen (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner)

Als übergeordnetes Ziel im Hinblick auf den Einsatz von Grünstrukturen steht die Förderung von Verdunstung, Rückhalt und Versickerung im Wasserkreislauf. Empfohlene Maßnahmen zur Anpassung an Extremereignisse, insbesondere Starkregenereignisse, beinhalten insbesondere die Reduktion versiegelter zugunsten offener Grünflächen, einhergehend mit der Schaffung von Retentionsräumen innerhalb dieser Grünflächen. Ebenso sollte eine dezentrale Versickerung von Niederschlagswasser im Sinne eines integrativen, d.h. blau-grünen, Konzeptes, angestrebt werden (Abbildung 39). Das ausgebrachte Substrat von Fassaden- und Dachbegrünungen erhöht darüber hinaus die Wasserrückhaltekapazität.



Abbildung 39 Beispiele blau-grüner Infrastrukturen (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner)

Weitere Optionen zur Förderung von urbanen Grünstrukturen stellt deren Nutzung und Verwertung durch Bewohner im Sinne einer „Essbaren Stadt“ (Abbildung 40) sowie Urban Gardening dar. Derartige Konzepte bringen neben den bereits genannten positiven Effekten den Aspekt der direkten Nutzbarkeit mit ein, was die Lebensqualität der Bewohner zusätzlich steigert. Darüber hinaus kann der aktive Umgang mit den Pflanzen maßgeblich die Akzeptanz als auch Sorgsamkeit solcher Maßnahmen erhöhen, da Bewohner in die Gestaltung sowie Entwicklung der Projekte aktiv eingebunden werden. Entsprechende Initiativen wurden mittlerweile auch außerhalb der großen Metropolen erfolgreich umgesetzt. Hier ist insbesondere die ebenfalls im Mittelrheintal gelegene Stadt Andernach hervorzuheben, die sich selbst als „Essbare Stadt“ einen Namen gemacht hat.



Abbildung 40 Einsatz von Gemüsekulturen im öffentlichen Raum: „Essbare Stadt Andernach“ (Quelle: Andernach Tourismus, 2020)

4.2 WASSERNUTZUNG UND GEWÄSSER

Wasser und Gewässer werden in vielfältiger Weise vom Menschen genutzt, was Auswirkungen auf das lokale Klima haben kann: Fernwasserleitungen oder Stauseen können die Wasserverfügbarkeit und die Verdunstung örtlich stark beeinflussen. Auch die Landschaftsgestaltung und Stadtentwicklung wirken sich auf die Wassernutzung aus: So können Gewässer von Menschen durch Rohre oder Mauern ferngehalten oder ihnen über Freiflächen zugänglich gemacht werden. Lokal kann Wasser über örtliche Versickerung gespeichert oder aber auch in Kanalsysteme abgeleitet werden. Global beeinflusst der Klimawandel die Wassernutzung und die Gewässer im Mittelrheintal – was steigende Herausforderungen für Kommunen bedeutet bezogen auf Folgen wie mehr Hochwasser und Starkregen oder auch verstärkte Perioden von Trockenheit und Niedrigwasser.

Im Folgenden werden die Zusammenhänge zwischen der Gestaltung der Wassernutzung und der Gewässer und dem lokalen Klima sowie den Klimawandelfolgen verdeutlicht. Daraus ergeben sich konkrete Handlungsmöglichkeiten zur Gestaltung der Wassernutzung und der Gewässer, damit sich v.a. Kommunen an künftige Klimawandelfolgen anpassen können. Um die Folgen von zunehmendem Starkregen zu entschärfen, werden die Gewässerrenaturierung sowie der Umgang mit Regenwasser und die Starkregenvorsorge erläutert. Wegen der absehbaren Zunahme von Hitzeperioden werden Möglichkeiten dargestellt, mit Wasser zu Kühlung beizutragen. Schließlich wird nochmals auf die Hoch- und Niedrigwassersituationen des Rheins eingegangen, die die städtische Infrastruktur beeinträchtigen können, und wie die Verwundbarkeit der Kommunen im Oberen Mittelrheintal gesenkt werden kann.

Umgang mit Starkregen

Renaturierung von Fließgewässern

Fließgewässer sind natürlicherweise so beschaffen, dass sie auch für größere Sturzfluten Überflutungs- und Rückhalteflächen bereithalten. Aus diesen natürlich schwankenden Abflüssen ergeben sich eine Strukturvielfalt und daraus folgende Biodiversität an Fließgewässern. Für das Obere Mittelrheintal können die natürlichen Gewässerstrukturen über den Fließgewässertyp des grobmaterialreichen silikatischen Mittelgebirgsbachs (UBA, 2014) beschrieben werden. Ein natürliches Flussbild kann beispielhaft der Abbildung 41 (Brühlbach/Mörsbach) entnommen werden.



Bruehlbach/Mörsbach (RP), Foto: LUWG, Mainz



Abbildung 41 Natürlicher Mittelgebirgsbach: Brühlbach/ Mörsbach (links, Quelle: UBA, 2014, Foto: LUWG, Mainz) sowie verändertes, hier mit Mauern eingefasstes Gewässer: Eingemauerter Abschnitt des Eschbachs in Waldesch bei Koblenz (Savin, 2017)

Die Überprägung kleiner Gewässer durch Stadtentwicklung, Infrastruktur und Landwirtschaft schränkt die Entwicklungsmöglichkeiten der Gewässer meist stark ein. So werden Gewässer teilweise unterirdisch verlegt oder verrohrt, außerdem werden sie in enge Bachbetten „eingemauert“ (vgl. Abbildung 41, rechts).

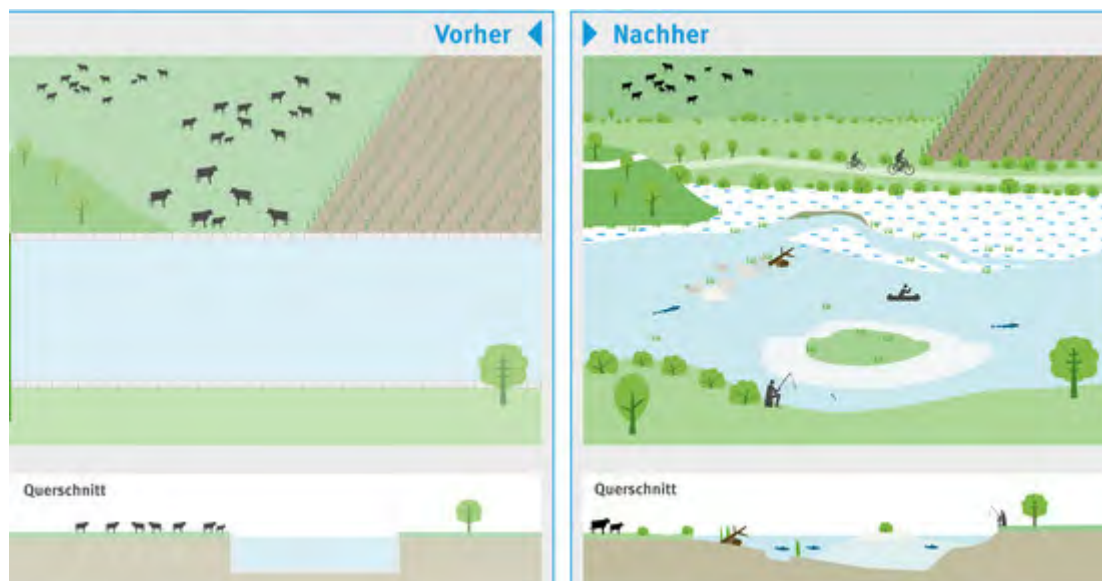


Abbildung 42: Beispiel der Umgestaltung eines Gewässerquerschnitts, um den Hochwasserschutz und die biologische Vielfalt zu verbessern (UBA, 2020b)

Das nimmt dem Gewässer den Entwicklungsraum, begrenzt den Hochwasserrückhalt und führt zu einem Verlust von Biodiversität und Artenvielfalt. Auch wird den Menschen die Möglichkeit genommen, Gewässer zu „erleben“- und sich z.B. in heißen Sommern an Gewässern abzukühlen.

Renaturierungen von Gewässern sollen den Gewässern die erforderlichen Entwicklungskorridore zurückgeben und damit auch den Hochwasserschutz verbessern. Durch Renaturierungen können Schäden von Sturzfluten an Gebäuden, Straßen, Brücken oder Schienenwegen ver-



mieden werden. Außerdem wird durch Renaturierungen die Biodiversität bereichert – meist siedeln sich unterschiedliche Tierarten an wie Libellen, Frösche oder Vögel sowie vielfältige Pflanzen. Eine gelungene Renaturierung am Oberen Mittelrhein findet sich in der Verbandsgemeinde Rhens, Ortsteil Brey, wo der Zugang zu Wasser wieder möglich ist (vgl. Abbildung 43). Konkrete Förderinstrumente zur Renaturierung von Fließgewässern sind in Kapitel 7.2 Fördermöglichkeiten aufgeführt.

Abbildung 43: Renaturierter Gewässerabschnitt mit Zugang zum Gewässer in der Verbandsgemeinde Rhens, Ortsteil Brey (Paulus, 2012)

Integrierte Starkregenvorsorge im Wassereinzugsgebiet

Die Renaturierung von Fließgewässern ist im Rahmen einer übergreifenden Vorsorge vor Sturzfluten nur eine von vielen möglichen Optionen. Eine integrierte Betrachtung erfordert eine nähere Untersuchung der Wassereinzugsgebiete dieser Gewässer. Dabei sollte analysiert werden, welche Wasserrückhaltoptionen es noch gibt neben Optionen der Renaturierung, wie z.B. veränderte Flächennutzungen (Wald oder Wiese statt Ackerflächen) oder die Schaffung von Mulden und Rückhaltebecken. Außerdem sollten Gebäude, Straßen, Tunnel oder Bahnstrecken untersucht werden, um festzustellen, welche Maßnahmen zur Vorsorge und zur Verringerung möglicher Schäden möglich sind. So ist z.B. eine vorausschauende Flächennutzungs- und Bauleitplanung wichtig, damit in potenziellen Überschwemmungsgebieten keine kritische Infrastruktur⁵ gebaut wird wie z.B. Krankenhäuser, wichtige Verbindungsstraßen, Trafostationen oder auch Feuerwehreinrichtungen. Außerdem können durch einfache Maßnahmen an Gebäuden oder Tiefgaragen Überschwemmungen vermieden werden – zum Beispiel durch den Einbau von Schwellen oder kleinen Mauern.

Zur Vorsorge bzw. zum Management von Starkregen gibt es eine Vielzahl an Leitfäden und Informationen. Einen guten Überblick über ein umfassendes Starkregenmanagement gibt zum Beispiel der Leitfaden von Rheinland-Pfalz „Starkregen. Was können Kommunen tun?“ (Informations- und Beratungszentrum Hochwasservorsorge Rheinland-Pfalz [IBH] & WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH [WBW], 2013), oder auch die Broschüre „Starkregen und kommunale Vorsorge“ vom hessischen Umweltministerium (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie [HLNUG], 2018). Insbesondere

⁵ „Kritische Infrastrukturen sind Organisationen und Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden.“ (BMI KRITIS)

große Städte wie Hamburg, Berlin oder Köln haben vielfältige Maßnahmen getroffen, um die Risiken von Starkregen zu minimieren. So hat z.B. Köln eine Starkregengefahrenkarte im Internet veröffentlicht (Stadt Köln, 2017). Berlin hat im Jahr 2018 die Berliner Regenwasseragentur gegründet und vielfältige Maßnahmen ergriffen, die dem sogenannten „Schwammstadt“-Prinzip folgen (vgl. Berliner Regenwasseragentur, 2020). Dabei soll die Stadt das Wasser „aufsaugen“ statt es abzuleiten. Unter anderem wird dazu die Erst-Begrünung von Dachflächen im Bestand gefördert. Sowohl in Hessen als auch in Rheinland-Pfalz werden zur Vorsorge gegen Starkregen Hochwasserkonzepte durch das Land gefördert (vgl. Kapitel 7.2 Fördermöglichkeiten).



Abbildung 44: Leitfäden zum Umgang mit Starkregen (HLNUG, 2018; IBH & WBW, 2013)

Bei der Starkregenvorsorge unterscheidet das Umweltbundesamt UBA (2019b, S. 53) die flächenwirksame Vorsorge, die Bauvorsorge, die verhaltenswirksame Vorsorge und die Risikovorsorge. Zur flächenwirksamen Vorsorge gehören die Schaffung von Flächen und Räumen zum Wasserrückhalt, die Renaturierung von Gewässern, und der Rückhalt von Niederschlag auf Flächen z.B. durch Entsiegelung. Diese Maßnahmen müssten entsprechend in Flächennutzungs- und Bauleitplänen integriert werden. Bei der Bauvorsorge geht es um den Schutz von Gebäuden vor eindringendem Wasser. Vorbeugende Maßnahmen gegen Schäden sind feste oder mobile Schutzeinrichtungen wie Rückschlagklappen oder auch die Verwendung wasserbeständiger Baustoffe (vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [BMVBS], 2013a).

Im Folgenden sollen einzelne Maßnahmen zur flächenwirksamen Vorsorge und zur Bauvorsorge nochmals erläutert werden.

Das Schwammstadt-Prinzip

Das Schwammstadt-Prinzip vereint die Maßnahmen zum Rückhalt von Regenwasser unter einem für Bürger gut verständlichen Begriff. Die Stadt als „Schwamm“ soll Wasser aufsaugen und nicht – infolge einer hohen Versiegelung – ableiten. Dazu dienen grüne Straßen und Dächer wie auch versickerungsfähige und/ oder Regen speichernde Flächen. Das Prinzip wurde u.a. in Berlin und in China prominent aufgegriffen. China will so 70% seines Regenwassers auffangen.

Verbesserter Rückhalt von Regenwasser

Regenwasser kann durch dezentrale Versickerung zurückgehalten werden. Im städtischen Raum sind entsiegelte Flächen zur dezentralen Regenwasserversickerung geeignet. Dazu bieten sich zum Beispiel begrünte Parkplätze oder grüne Seitenstreifen an Straßen und Wegen an. Unterschiedliche Flächen bieten sehr unterschiedlichen Wasserrückhalt – so sind z.B. Beton- und Asphaltflächen undurchlässig und können Starkregenabflüsse verstärken. Umgekehrt bieten teil- oder ganzdurchlässige Flächen einen guten Rückhalt: Beispiele sind hier Pflasterflächen mit hohen Fugenanteilen, Sportflächen mit wasserdurchlässigen Belägen oder auch wasserdurchlässige Einfahrten, die z.B. mit Rasengittersteinen oder kleineren Steinen belegt werden (Abbildung 45). Untersuchungen haben gezeigt, dass durch Dachbegrünungen, Versickerungsmaßnahmen und Regenrückhaltebecken die Abflussspitze um mehr als 80% reduziert werden kann (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung [BBSR], 2018; Matzinger et al., 2017). Dazu steigt der Anteil der Wasserverdunstung, was zur Kühlung beitragen kann.

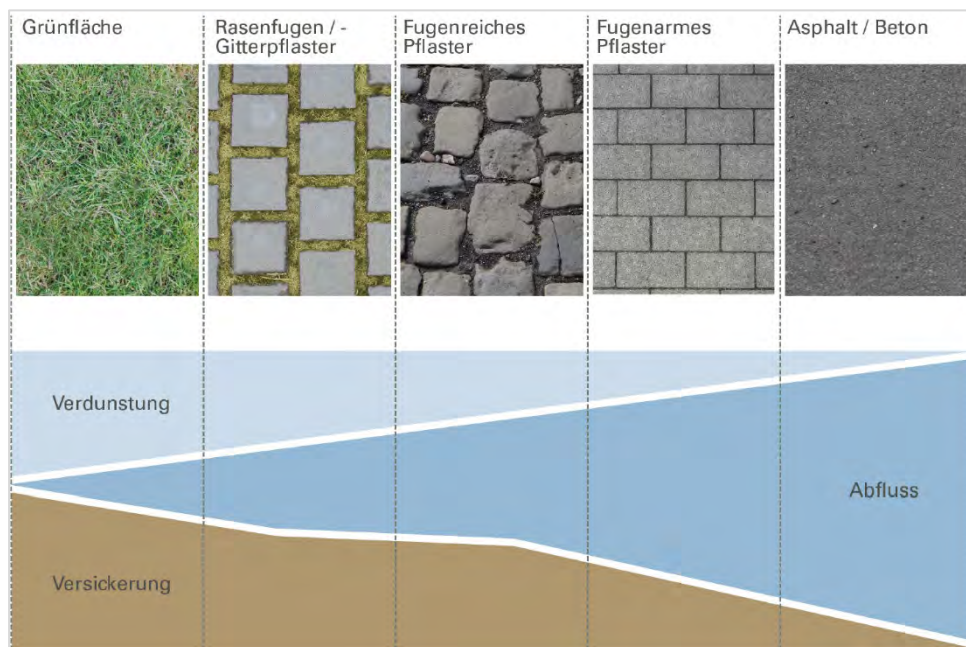


Abbildung 45: Einfluss der Oberflächen auf die Abflussbildung (Ingenieurbüro Reinhard Beck, in BBSR, 2018)

Auch Gründächer führen zum Rückhalt von Wasser und verringern damit die Gefahr von Sturzfluten. Der Rückhalt von Regenwasser kann je nach Gründach von 0% bei versiegelten Flächen wie Straßen oder Dächern auf bis zu 95 % erhöht werden (z.B. Bundesverband GebäudeGrün e.V. [BuGG], 2019, S. 8, vgl. Abbildung 47). Weitere positive Effekte von Gründächern sind Kühlungseffekte durch Verdunstung, dadurch entstehende Energieeinsparpotenziale, eine Erhöhung der Biodiversität, weil sich z.B. Insekten und Bienen ansiedeln, sowie Effekte der Lärminderung (BuGG, 2019).



Abbildung 46: Mulden und Mulden-Rigolensysteme zum Wasserrückhalt (Quelle: Matzinger et al., 2017, S. 12–13; Fotos: IPS)

Ebenfalls einen sehr guten Regen-Rückhalt bieten Mulden oder Mulden-Rigolen-Systeme (Abbildung 46). Mulden füllen sich bei Niederschlag zunächst mit Wasser und halten es dezentral zurück. Mulden-Rigolen-Systeme sind Mulden, die mit unterirdisch verlegten „Speicherräumen“ kombiniert sind, den sogenannten Rigolen. Solche Systeme sind teurer, aber bieten auch einen höheren Wasserrückhalt. Es gibt Baumrigolen oder auch Beetrigolen (Matzinger et al., 2017).

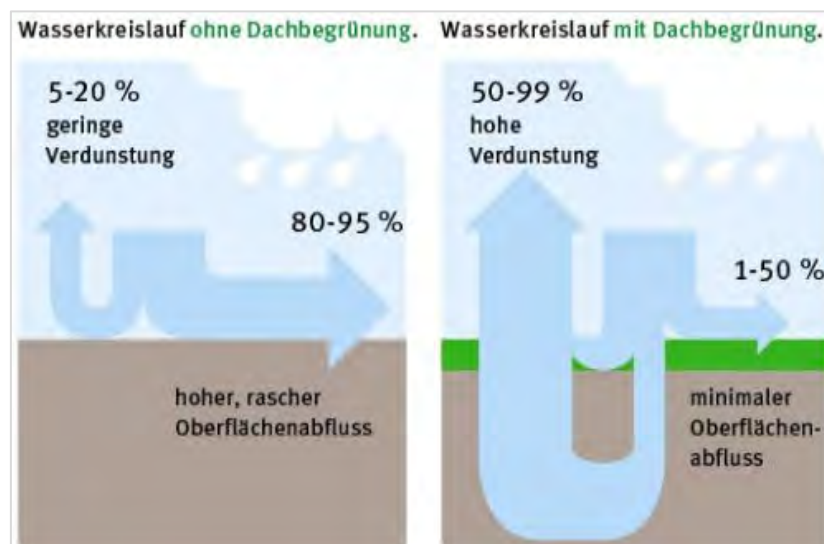


Abbildung 47: Wasserkreislauf mit und ohne Dachbegrünung (Optigrün International AG, 2020)

Durch die Vertiefung von Sport- und Spielplätzen sowie Plätzen kann der Wasserrückhalt in der Fläche weiter erhöht werden, da sich die Flächen bei Starkregen füllen können. Auch wassergefüllte Gräben können Regen zurückhalten und Wasser erlebbar machen (s. Abbildung 48). Die Füllung mit Regen findet meist nur an wenigen Stunden im Jahr statt bei einem Wetter, bei dem meist keine Menschen die Plätze nutzen. So können Multifunktionsflächen gestaltet werden, die das Wasser aus Starkregenereignissen zwischenspeichern und Schäden vermeiden helfen. Beispiele dazu finden sich in vielen Städten wie Berlin, Frankfurt, Köln, Amsterdam oder Stockholm bis hin zu Singapur.



Abbildung 48: Wasserführende Gräben (links, Quelle: Matzinger et al., 2017, Foto: Dreiseitl) und tiefergelegte Freiflächen zum Wasserrückhalt (Mitte, rechts): Frankfurt Riedberg, rechts nach starkem Regen (Fotos: Hochschule Koblenz/Ziegler 2018, Stadtentwässerung Frankfurt am Main, 2016)

Der Flächenbewirtschaftung an Hängen kommt für den Rückhalt von Regenwasser ebenfalls eine zentrale Aufgabe zu, vor allem an den steilen Hängen des Oberen Mittelrheintals. Die Bodenart hat einen Einfluss auf die Versickerungsleistung wie auch der Bewuchs. Wald- und Grünflächen halten bei gleichem Boden vergleichsweise mehr Wasser zurück als z.B. unbewachsene Flächen oder Flächen unter Folie. Auch die Querterrassierung und Anlage von Terrassen ist vorteilhaft für den Wasserrückhalt. Bei geneigten Hängen, die z.B. mit Mais oder unter Folie bewirtschaftet werden, kann je nach Niederschlagsereignis eine Sturzflut entstehen, die in tiefergelegenen Ortsteilen zu Folgeschäden führt.

Neben den flächenbezogenen Maßnahmen ist der Umgang mit Niederschlagswasser zentrale Aufgabe der Generalentwässerungsplanung. Im Entwässerungssystem kann der Niederschlag durch erweiterte Kanal-Stauräume oder Regenrückhaltebecken verstärkt zurückgehalten werden.

Kommunale Förderung von örtlichem Regenwasser-Rückhalt

Kommunen können in unterschiedlicher Form den örtlichen Rückhalt und die Versickerung von Regenwasser fördern: So kann insbesondere die Bauleitplanung Festsetzungen treffen, dass neue Baugebiete keinen Niederschlag mehr in die Kanalisation abgeben sollen. Auch über Gebührensatzungen wie Niederschlagsgebühren können Anreize zur Entsiegelung und zum Rückhalt gegeben werden: Für eine versiegelte Fläche von z.B. 300 m² können im Jahr Unterschiede zwischen 140 und 370 Euro entstehen. Weiterhin können Förderprogramme aufgelegt werden wie z.B. Förderungen zur Dachbegrünung (Berlin) oder zur Entsiegelung von Flächen.

Private Bauvorsorge als Starkregenvorsorge

Bei Starkregen können große Schäden an Gebäuden und Grundstücken entstehen. Garagen und Keller können sich mit Wasser füllen, was zu weiteren Schäden führen kann. Für die schadensfreie Ableitung von Niederschlägen im öffentlichen Raum ist die Kommune verantwortlich, aber nur bis zu einem „seltenen“ Starkregenereignis (BBSR, 2018). Ein vollständiger Schutz vor außergewöhnlichen Starkregen ist aus wirtschaftlichen Gründen nicht möglich. Alle Eigentümer sind also gefragt, ihr Eigentum und damit auch ihre Gebäude vor Starkregen zu schützen. Dazu gehören Maßnahmen wie hochgelegte Eingänge, Schwellen an Tiefgaragen und Kellerfenstern, ggf. mobile Dammbalkensysteme, wasserdichte Fenster, wasserfeste Anstriche, mobile Pumpen oder Rückschlagventile. Auch Vorsorge durch entsprechende Versicherungen sollte getroffen werden. Eine gute Übersicht über mögliche Maßnahmen der privaten Bauvorsorge geben der Leitfaden des BMVBS (2013a) und der Leitfaden des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR, 2018). Bürger können Sachkundige heranziehen, um sie zu entsprechenden Maßnahmen zu beraten. Das HochwasserKompetenzCentrum in Köln schult Sachkundige zur Erstellung des Hochwasserpasses (Hochwasser Kompetenz Centrum [HKC]).

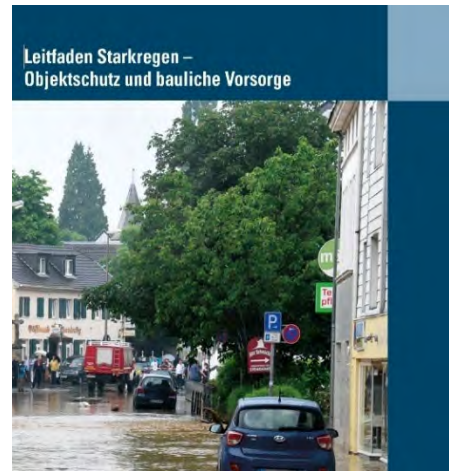


Abbildung 49 Leitfaden Starkregen – Objektschutz und bauliche Vorsorge (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung [BBSR], 2018)

Wasser zur Kühlung

Wasser wirkt temperaturnausgleichend, da es sich langsamer als Luft oder Beton erwärmt oder abkühlt. Wenn es also schnell heiß wird, so können Wasserkörper zur Kühlung beitragen. Umgekehrt erhalten Wasserkörper die Wärme, wenn sie einmal höhere Temperaturen erreicht haben. Kühlende Wirkungen gehen auch von Wassertropfen wie Nebel oder Regen aus, da sie Verdunstungskälte freisetzen. Auch Gewässer führen zu feuchter Luft und Taubildung, und Böden in Gewässernähe bleiben länger feucht. Stillgewässer tragen zur Kühlung um 1-2° C am Tag bei, Wind wirkt sich dabei günstig aus (Warmuth & Goeldner, 2018). Auch die Renaturierung von Gewässern bewirkt eine Zunahme der Kühlleistung durch Verlängerungen des Gewässerlaufs sowie die Aufweitung von Gewässerbetten und die Zunahme von Auenflächen (Mehl et al., 2018).

Für Städte ist also ein hoher Anteil von Gewässern und Wasserflächen positiv, um dem Wärmeinseleffekt entgegenzuwirken. Auch genießen Menschen den Zugang zu Wasser besonders bei hohen Temperaturen, um sich abzukühlen und sich so Erholung zu verschaffen. Gartenanlagen wie die Alhambra in Granada zeigen, wie schon vor Hunderten von Jahren Gartenarchitekten die Kühlwirkung des Wassers nutzten, um den Garten auch an heißen Tagen genießen zu können.

Mit den steigenden Temperaturen wird auch im Oberen Mittelrheintal die Kühlung von Städten immer wichtiger. Neben der Anlage von Gewässern und Wasserflächen gibt es noch eine Vielzahl weiterer Optionen. So werden die öffentlichen Trinkwasserspender wiederentdeckt: seit 2019 fördert das Land Rheinland-Pfalz die Errichtung von zwei Spendern pro Kommune – insgesamt sollen 100 Spender in Rheinland-Pfalz errichtet werden mit Zuschüssen von mehreren

Tausend Euro. Apps zum Auffinden von Wasser werden gestaltet wie z.B. trinkwasser-unterwegs.de, Refill Station. Geschäfte sind durch Aufkleber oder App-Einträge auffindbar und bieten hierüber kostenloses Wasser an.



Abbildung 50: Nebelduschen (links, Quelle: Stadt Wien) Trinkwasserspender (Mitte, Quelle: (Stadt Remagen, 2020) und Wasserspielplätze zur Kühlung (rechts, Quelle: Stadt Bingen, 2020)

Für besonders heiße Tage hat die Stadt Wien Nebelduschen errichtet, indem Hydranten mit entsprechenden Einrichtungen ausgerüstet wurden (vgl. Abbildung 50). Andere Kommunen nutzen Sprühschläuche oder Waschfahrzeuge und kühlen so versiegelte Flächen an heißen Tagen. Auch Wasserspielplätze und Fontänen tragen zur Kühlung und zum Erleben von Wasser bei und machen damit die zunehmenden heißen Tage erträglicher.

Auch Badezugänge und Stadtstrände erleichtern den Menschen die Hitze und tragen zur Kühlung bei. Städte, deren Gewässer dafür nicht immer geeignet sind, haben Badeschiffe eingerichtet wie z.B. Berlin, Wien oder Kopenhagen. Wenn die Stadt schon verbaut ist, können auch Dächer mit Wasser und sogar mit Stränden versehen werden wie z.B. auf dem Science Center „Nemo“ in Amsterdam (vgl. Abbildung 51).



Abbildung 51: Badeschiff in Berlin (Foto: mauritius images/ travelstock44/Alamy über GEO.de, Wasserlauf und „Strand“ auf dem Science Center „Nemo“ in Amsterdam (Quelle: www.amsterdam.info)

Die Kühlung von Städten wird nicht nur durch Wasser, sondern auch durch Grünstrukturen bewirkt (vgl. Kapitel 4.1 Grünstrukturen). Wasser kann aber auch direkt zur Gebäudekühlung beitragen: So kann z.B. eine Dachkühlung mit Regenwasser zu einer Abkühlung von 4°C beitragen. Auch Kühldecken in Gebäuden sind interessante, weil energiesparende Lösungen als Alternative zur Klimaanlage.

Folgen für die Wasserbereitstellung und mögliche Maßnahmen

Heißere Temperaturen führen zu einem höheren Wasserverbrauch. Zum einen wird mehr gewaschen und geduscht, zum anderen werden Grün- und Gartenflächen an heißen und trockenen Tagen bewässert. Der Wasserverbrauch, der in Deutschland bei durchschnittlich 121 Litern pro Einwohner und Tag liegt (UBA, 2016), kann so in Städten an einem heißen Sommertag auf das Doppelte ansteigen (Rautenberg et al., 2014). Als Folge des Klimawandels ist also mit einem Anstieg des Wasserbedarfs an heißen Tagen bzw. im Sommer zu rechnen.

Rheinland-Pfalz hat die Auswirkungen des Klimawandels auf die Trinkwasserversorgung näher untersucht und eine Anpassungsstrategie veröffentlicht (MUEEF RLP, 2018). Trinkwasser, aber auch gewerbliches Wasser und Wasser zur Bewässerung wird in Rheinland-Pfalz überwiegend aus Grundwasser gewonnen. Da Rheinland-Pfalz viele Regionen mit nur knappen nutzbaren Grundwasserdargebot aufweist und der Klimawandel die Grundwasserneubildung vermutlich beeinträchtigen wird, ist demnach eine Anpassung der bisherigen Grundwasserbewirtschaftung erforderlich. Unter anderem werden Wasserrechte und Erlaubnisse zur Wassernutzung restriktiver vergeben werden. Auch sollen Wasserverbünde, d.h. die Verbindung von Wassergewinnungsgebieten, weiter ausgebaut werden, damit Wassermangelgebiete durch Wasserüberschussgebiete versorgt werden können. Weitere Maßnahmen sind unter anderem der Schutz bestehender und die Erkundung potenzieller Wassergewinnungsgebiete, die Förderung der ökologischen Landwirtschaft zum qualitativen Schutz des Wassers oder die Ausweisung von Vorrang- und Vorbehaltsgebieten zur Trinkwassergewinnung (MUEEF RLP, 2018).

Für Kommunen sollte die Wasserverfügbarkeit in Trockenzeiten geprüft werden, z.B. mit Hilfe des Stresstests von KLIWA (KLIWA, 2019b). Insbesondere zur Bewässerung von Grünflächen kann in Trockenzeiten ggf. auf Oberflächenwasser oder sogar auf gereinigtes Abwasser zurückgegriffen werden. Die **Wasserwiederverwendung** von gereinigtem Abwasser ist schon lange in z.B. Kalifornien oder Israel üblich, sie ist saisonal aber beispielsweise auch in Braunschweig anzutreffen. Durch den Klimawandel ist die Wasserwiederverwendung in weiteren Regionen Deutschlands wie in Oldenburg, Brandenburg oder Nürnberg in der Diskussion.

In Regionen mit Wassermangel werden Regenwasserspeicher und das so genannte „**Rainwater harvesting**“ gefördert, damit Grundwasserressourcen geschont und durch Regenwasser ersetzt werden können. Aus den Wasserverbrauchszahlen des Umweltbundesamtes (UBA, 2016) lässt sich schließen, dass mit Zisternen für die Gartenbewässerung bis zu 6% Wassereinsparung möglich sind, saisonal ist es wesentlich mehr. Mit der Nutzung von Regenwasser für Waschmaschine und Toilettenspülung sind bis zu 39% Wassereinsparung möglich. Darüber hinaus kann bei der häuslichen Trinkwassernutzung über 60 % Wasser durch eine so genannte „**Grauwassernutzung**“ eingespart werden (vgl. Nolde, 2012). Bei der Grauwassernutzung wird Wasser aus Duschen und Waschmaschinen nach einer einfachen Aufbereitung nochmals für Toilette und/oder eine Bewässerung verwendet. Konzepte wie der „Hamburg Water Cycle“ setzen die geschilderten wassersparenden Ansätze um und können so neben der Wassereinsparung auch Energie aus biogenen Reststoffen gewinnen (Hamburg Wasser, 2020).

Umgang mit Hoch- und Niedrigwasser

Wie bereits geschildert, ist die Region des Oberen Mittelrheintals von Hochwasser- und Niedrigwasserperioden des Rheins unmittelbar betroffen. Zum **Hochwasserrisikomanagement**

sind durch das Land vielfältige Maßnahmen bereits umgesetzt worden, auch im Zuge der Umsetzung der entsprechenden EU Richtlinie aus dem Jahr 2007. Unter anderem sind inzwischen Hochwassergefahren- und -risikokarten erstellt worden, die die entsprechenden Überschwemmungsflächen und Hochwasserrisiken am Mittelrhein ausweisen (MUEEF RLP, o.J.–a, o.J.–c). Im gesamten Rheineinzugsgebiet wird der Ausbau von Hochwasserrückhaltebecken auf insgesamt 540 Mio m³ weiterverfolgt. Hierüber soll eine Minderung der extremen Hochwasserstände um bis zu 70 cm erreicht werden (IKSR, 2020). Hochwasserschutzmaßnahmen wurden im Oberen Mittelrheintal kaum umgesetzt, da die beengten Verhältnisse am Mittelrhein meist keine Errichtung von Dämmen, Deichen oder Hochwasserschutzwänden zulassen. Zu einem umfassenden Hochwasserrisikomanagement gehört neben dem technischen Hochwasserschutz aber auch die Flächen-, Bau- und Informationsvorsorge. Zudem muss das Katastrophenschutz- und Alarmsystem funktionieren wie auch die Maßnahmen zur Bewältigung eines Hochwasserereignisses. Das Hochwasserrisikomanagement hat vielfältige Maßnahmen angestoßen, auch in den Kommunen des Oberen Mittelrheintals.

Im Rahmen der Gestaltung von Ufern und Überflutungsbereichen sind noch vielfältige Maßnahmen auf kommunaler Ebene möglich, um die Bewältigung von Hochwasserereignissen zu verbessern. Denkbar sind dabei Maßnahmen des Objektschutzes und der Bauvorsorge (vgl. Kapitel 4.2 Private Bauvorsorge als Starkregenvorsorge), oder auch Maßnahmen der Bürgerinformation wie z.B. Hochwasserinformationstafeln.

Niedrigwassersituationen am Rhein waren vor dem Jahr 2018 eher in Vergessenheit geraten. Das Dürrejahr 2018 hat die Folgen von Niedrigwasser wieder ins Bewusstsein gerückt – von den vielfältigen ökonomischen Schäden (vgl. BfG, 2019) bis hin zu ökologisch positiven Folgen wie dem Auftreten von seltenen Pflanzen und verbesserten Vogelzugbedingungen (Egeling, 2019). Durch den Klimawandel ist zukünftig häufiger mit Niedrigwassersituationen zu rechnen.

Für die Kommunen am Mittelrhein bedeutet Niedrigwasser vor allem eine Einschränkung des Schiffsverkehrs. An der Mittelrheinstrecke ergaben sich für Fährbetriebe nach ersten Schätzungen Umsatzeinbußen von knapp 1 Mio. € (BfG, 2019). Mögliche Maßnahmen gegen die negativen Folgen sind ggf. alternative Wasserfahrzeuge, damit der Ausflugs- und Fährverkehr auch bei Niedrigwasser stattfinden kann. Welche weiteren Auswirkungen sich ergeben, müsste an den jeweiligen Orten näher untersucht werden.

Auf der Ebene der Wasserversorger und im Zuge des süddeutschen Projektverbundes KLIWA werden die klimawandelbedingten Folgen von Niedrigwassersituationen näher untersucht (KLIWA, 2019a). Eine Maßnahme, die den Mittelrhein unmittelbar betrifft, ist das Projekt „Abladeoptimierung Mittelrhein“ im Bundesverkehrswegeplan 2030 (Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes [WSV], 2017). Hierbei soll die Fahrrinntiefe bei Niedrigwasser zwischen Mainz/ Wiesbaden und St. Goar von 1,90 m auf 2,10 m erhöht werden. Dabei sollen örtlich wasserspiegelstützende Maßnahmen und moderate Sohlpassungen durchgeführt und dabei Natur- und Umweltschutz einbezogen werden (WSV, 2017).

Weitere Folgen von Niedrigwasser sind erhöhte Wassertemperaturen, was für Fischbestände kritisch sein kann: Im Jahr 2018 wurde an 31 statt normalerweise nur 9 Tagen der für Fische kritische Wert von 25°C im Rhein bei Koblenz überschritten (BfG, 2019).

Auch erhöhen sich die Abwasseranteile in den Gewässern und Flüssen, da die Abwassermenge relativ konstant ist, die Oberflächengewässer aber viel weniger Wasser mit sich führen. So liegen die Anteile von gereinigtem Abwasser bei Niedrigwasser zwischen 10 und 20%. In der Lahn und der Nahe liegen sie sogar teilweise über 50% (UBA, 2018). Wenn Niedrigwassersituationen länger auftreten, ist anzunehmen, dass die Risiken für die Trinkwassergewinnung und die Ökosysteme der Gewässer steigen. Die Arbeitsgemeinschaft der Rhein-Wasserwerke (ARW) hat in 2018 ein Sonder-Untersuchungsprogramm hierzu durchgeführt (Roepke, 2019) und sich für die Einführung der vierten Reinigungsstufe auf Kläranlagen im Rahmen der Internationalen Rheinschutzkommission eingesetzt. Die Wasserversorger am Rhein haben Multibarrieren-Systeme eingeführt, um die Folgen des Klimawandels für die Wasserqualität zu beherrschen.

Zusammenfassend können Kommunen vor allem in der Hochwasser- und Starkregenvorsorge aktiv werden, mit Ansatzpunkten in der Bauleit- und Flächennutzungsplanung. Wichtig sind Gewässer-Renaturierungen und verbesserter Regenwasserrückhalt. Weiterhin kann Wasser zur Kühlung für die Menschen bereitgestellt werden während Hitzeperioden. Schließlich können Ansätze zum Wassersparen gefördert werden einschließlich der Wasserwiederverwendung. In Zusammenarbeit mit Wasserversorgern und Kläranlagen können Folgen des Klimawandels für die Wasserwirtschaft diskutiert und Ansatzpunkte für erhöhte Resilienz identifiziert werden. Die Folgen von Trockenperioden und Niedrigwasser können ebenfalls örtlich analysiert werden, um Ansatzpunkte zur Verringerung der Risiken für Mensch, Wirtschaft und Ökosysteme zu identifizieren.

4.3. BODENVERSIEGELUNG

Bodenversiegelung ist die dauerhafte Abdeckung eines Landschaftsausschnitts und dessen Boden durch undurchlässiges künstliches Material, wie z.B. Asphalt und Beton⁶ (European Commission [EC], 2012c). Der Sachverständigenrat für Umweltfragen konzertiert in seinem Umweltgutachten 2016: „Der zu hohe Flächenverbrauch ist nach wie vor eines der schwerwiegenden ungelösten Umweltprobleme in Deutschland. Die Schäden an Natur und Umwelt durch Versiegelung und Zerschneidung sind erheblich und zumeist unumkehrbar“ (Sachverständigenrat für Umweltfragen [SRU], 2016).

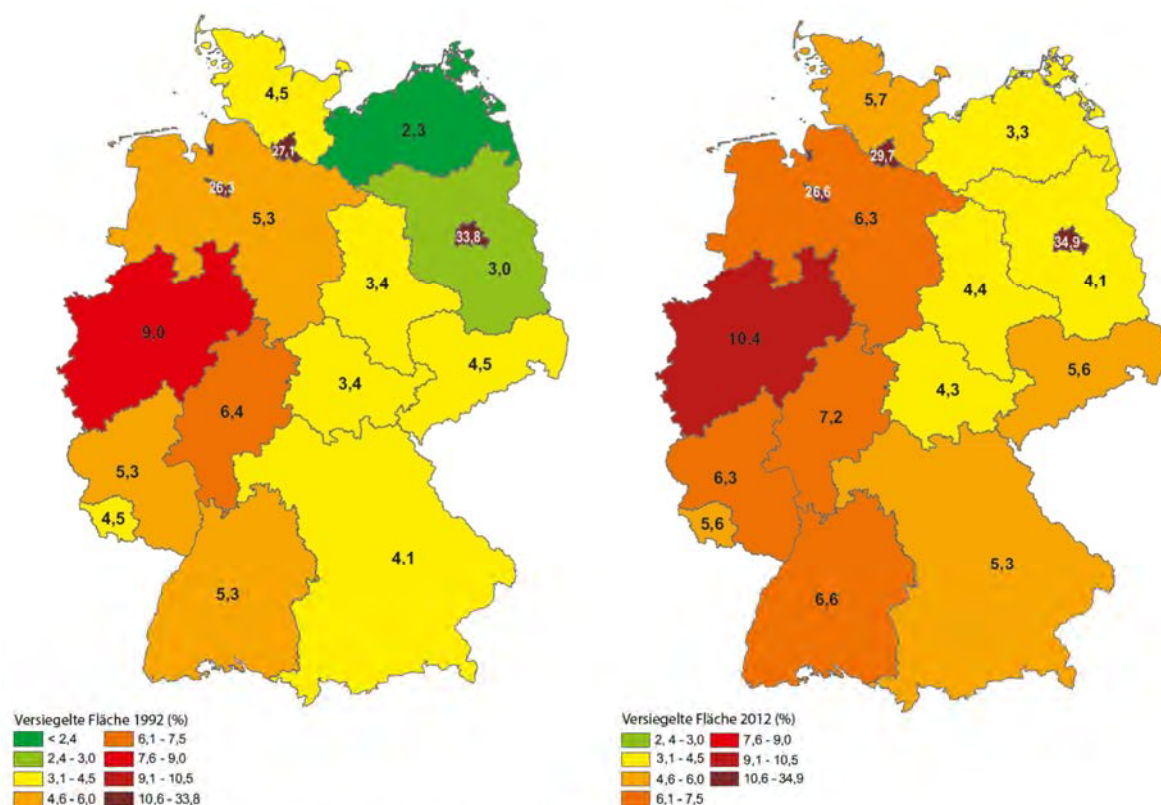
Bodenversiegelungen sind ein erheblicher Eingriff in Böden und stellen eine Degradation der natürlichen Bodenfunktionen dar. Die natürlichen Bodenfunktionen stehen in enger Beziehung zu der Nutzung der Böden. Böden werden als Rohstofflagerstätte, Fläche für Siedlung und Erholung, Standort für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung sowie Standort für sonstige wirtschaftliche und öffentliche Nutzungen, Verkehr, Ver- und Entsorgung genutzt. Darüber hinaus erfüllen Böden ebenso eine Funktion als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte. Es ergibt sich zwischen natürlichen Bodenfunktionen und den Nutzungsfunktionen der Böden ein Spannungsfeld in der räumlichen Planung, den es gilt im Bodenschutz abzuwägen. Rechtliche Grundlage ist im Wesentlichen das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG, 1998/27.09.2017) sowie die entsprechenden Bodenschutzgesetze der Bundesländer in Deutschland.

⁶ „Soil sealing is the permanent covering of an area of land and its soil by impermeable artificial material, such as asphalt and concrete“ (im Original)

Der Begriff der Bodenversiegelung sollte nicht gleichgesetzt werden mit dem Begriff Flächenverbrauch, denn der Flächenverbrauch gibt die Flächenneuanspruchnahme an, die durch Neu-Ausweisung von Siedlungsflächen und Verkehrsflächen erfasst wird (SRU, 2016). Nicht alle neu ausgewiesenen Flächen werden zwangsläufig versiegelt. Allerdings ist der Flächenverbrauch eine Datengrundlage zur Kennzeichnung der Boden-Inanspruchnahme, da ein flächenbezogenes Bodenversiegelungskataster nicht existiert (Frie & Hensel, 2009; UBA, 2020a). Eines der sieben prioritären Handlungsfelder in der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie ist die Minderung der Flächeninanspruchnahme für Siedlungen und Verkehr, wobei als eine Maßnahme zur Umsetzung dieser Ziele die Reduzierung der Bodenversiegelung gesehen wird (Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz [LABO], 2010; UBA, 2003). Bodenversiegelung selbst ist ein Indikator der Nachhaltigkeitsstrategie Deutschland (Bundesregierung, 2016), wobei hierunter der Anteil der real versiegelten Böden an der Siedlungs- und Verkehrsfläche bzw. an der Gesamtfläche oder Fläche der versiegelten Böden zu verstehen ist (Penn-Bressel, 2009).

Formen und Entwicklung der Bodenversiegelung

Der Bundesraumordnungsbericht 2012 (BBSR, 2012) geht von einem Bodenversiegelungsgrad von 46% der Siedlungs- und Verkehrsfläche aus, wobei hier ein statistisches Schätzverfahren angewendet wird (Frie & Hensel, 2009). In Deutschland werden täglich rund 58 Hektar (ca. 82 Fußballfelder) als Siedlungsflächen und Verkehrsflächen neu ausgewiesen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit [BMU], 2020), d.h. knapp 27 Hektar (ca. 38 Fußballfelder) Bodenfläche werden täglich versiegelt. Allerdings sind darin beispielsweise land- und forstwirtschaftliche Gebäude sowie Erholungsgebiete oder Friedhöfe nicht berücksichtigt (Röpke & Lippelt, 2014).



Quelle: Umweltbundesamt (2013), aus Abb. 1 der Quelle geschätzt; UGRDL (2013).

Abbildung 52 Flächenversiegelung in Deutschland 1992 und 2012. (Quelle: (Röpke & Lippelt, 2014))

Bodenversiegelung ist eine Folge steigender Flächeninanspruchnahme und kann in verschiedenen Formen auftreten. Eine Unterteilung von Bodenversiegelungen wird wie folgend vorgenommen (EC, 2011):

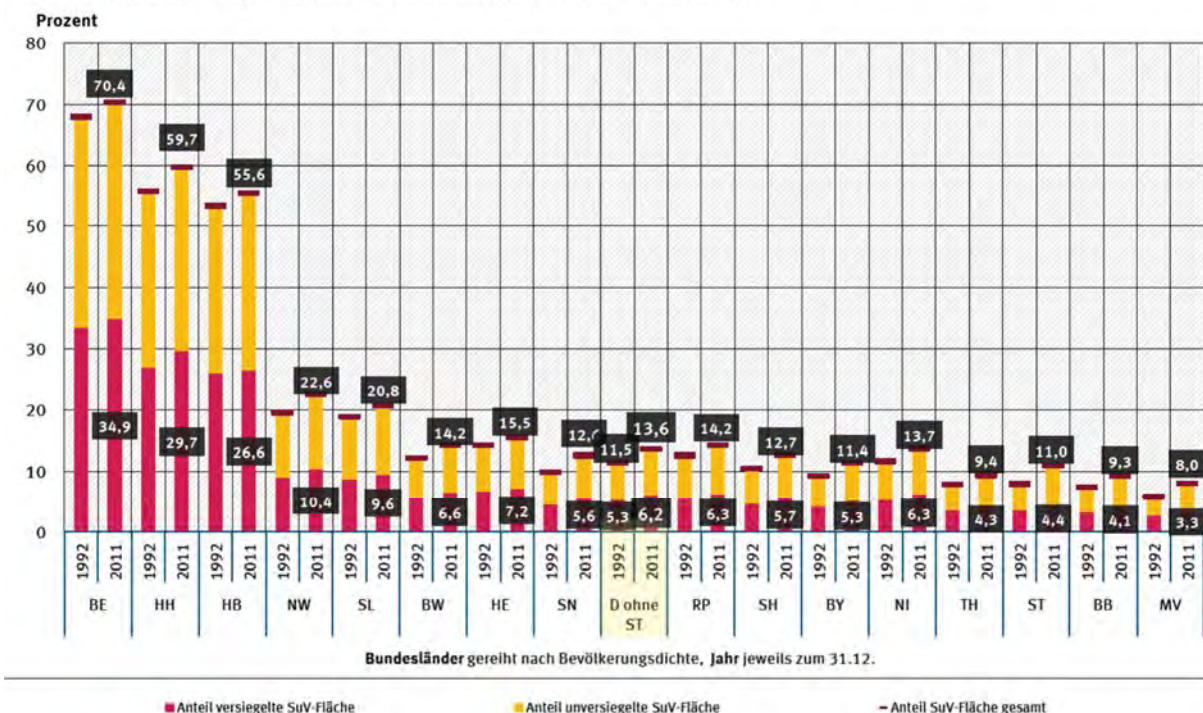
- Teilversiegelung
- Vollversiegelung

Diese Einteilung in voll- und teilversiegelte Flächen wird vor allem zur Ermittlung von Abwasser- bzw. Niederschlagswassergebühren in Kommunen genutzt, d.h. es wird von unterschiedlichen Möglichkeiten der Versickerung von Niederschlagswasser ausgegangen. Denn nicht alle versiegelten Flächen sind vollständig wasserundurchlässig. Vollversiegelte Flächen sind flächendeckend mit Asphalt, Beton, Plattenbelägen oder Pflaster mit engen bzw. geschlossenen Fugen wasserundurchlässig. Teilversiegelte Flächen sind dahingehend teilweise Pflaster mit offenen Fugen (mit Fugenanteil > 15 %), wassergebundene Decken oder Tartanbahnen. Unabhängig zu dieser Einstufung zur Kostenermittlung wird Bodenversiegelung von der European Environment Agency (EEA; Europäische Umweltagentur) als eine wesentliche Ursache für den Verlust des Bodens in der EU verstanden (EC, 2012c).

Die zeitliche Entwicklung des Grades an Bodenversiegelung in Deutschland ist in Abbildung 52 flächenhaft nach Bundesländern dargestellt. Abbildung 53 zeigt den Anteil von versiegelter und unversiegelter Flächen der jeweiligen Bundesländer sowie die zeitliche Entwicklung zwischen 1992 und 2012.

Anteil der Siedlungs- und Verkehrsfläche an der Gesamtfläche, davon unversiegelt und versiegelt

Daten für Deutschland insgesamt (ohne Sachsen-Anhalt) sowie für die Bundesländer



Quelle: Umweltbundesamt, eigene Berechnungen unter Benutzung der Fachserie 3, Reihe 5.1, Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung 2011, Hrsg. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden

Abbildung 53 Vergleich unversiegelter und versiegelter Flächen der Bundesländer (außer Sachsen-Anhalt) 1992 und 2012 (Quelle: UBA, 2020a)

Insgesamt ist eine Zunahme der Anteile der Siedlungs- und Verkehrsflächen an der Gesamtfläche von Deutschland in allen Bundesländern zwischen 1992 und 2012 zu verzeichnen. Betrachtet man das Maß der Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche in Hektar pro Tag (Abbildung 54), so sinkt dieser Trend ab 2007 stetig.

Die Nachhaltigkeitsstrategie für Deutschland (Bundesregierung, 2016) sieht bis 2030 vor, dieses Maß der Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche auf 30 Hektar pro Tag zu bekommen (vgl. Abbildung 54). Die Bedeutung dieser Zielerreichung wird ersichtlich, wenn die Trend-Entwicklungen z.B. von Rheinland-Pfalz betrachtet werden. Hier gibt es seit 2010 eine Trendumkehr, d.h. die Flächeninanspruchnahme von Siedlungs- und Verkehrsflächen nimmt im jährlichen Trend wieder zu (MWKEL RLP, 2014). Damit einhergehend ist ein Anstieg der täglichen Zunahme von Bodenversiegelungen festzustellen. Ein Problem ist allerdings fortan die Vergleichbarkeit der Daten, da im Oktober 2016 in Rheinland-Pfalz eine Umstellung in der statistischen Erfassung und Auswertung der Daten zur Flächeninanspruchnahme erfolgte (MWKEL RLP, 2010). Bezogen auf Nutzungsarten ist aber festzustellen, dass im Jahr 2015 ein Anstieg der durch Wohnen (1,4 ha pro Tag) und Gewerbe (0,2 ha pro Tag) neu in Anspruch genommenen Flächen zu verzeichnen ist.

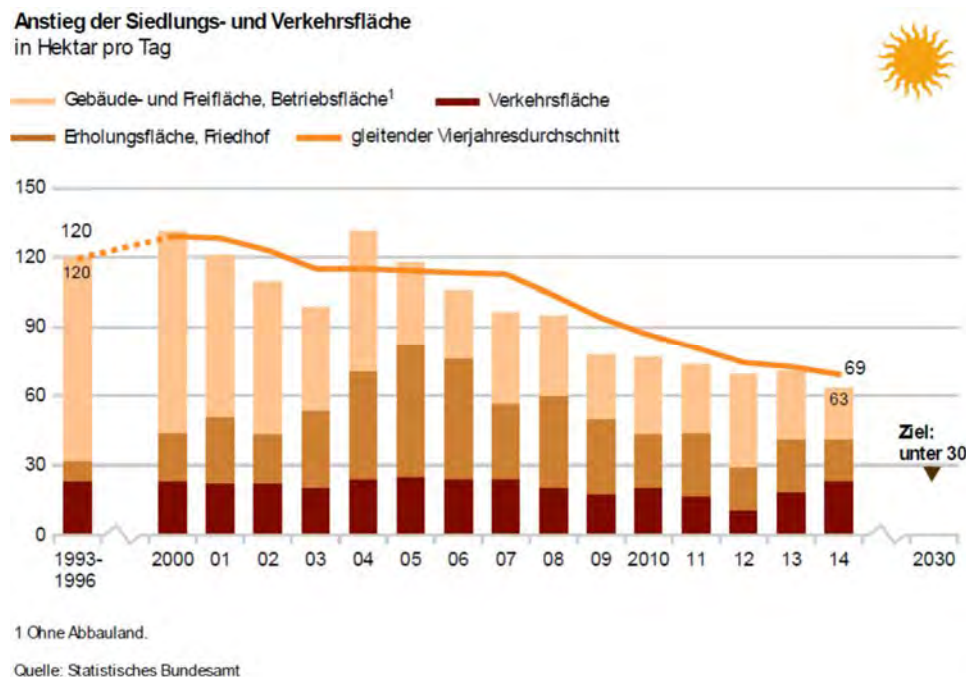


Abbildung 54 Trend-Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsfläche in Deutschland in Hektar pro Tag mit dem Ziel der Nachhaltigkeitsstrategie 2030 (Quelle: Bundesregierung, 2016)

Es müssen demnach weiterhin Bemühungen und Umsetzungen zur Reduzierung von Bodenversiegelungen unternommen werden. Damit hat Rheinland-Pfalz mit dem Projekt „Raum+ Rheinland-Pfalz 2010“ den planungsrechtlichen Rahmen geschaffen (MWKEL RLP, 2010). Das heißt, die Grundlage für ein Siedlungsflächenmanagement ist vorhanden. Die Umsetzung einer für jede Kommune optimal gestalteten nachhaltigen Siedlungsentwicklung liegt in der Hand der Gemeinden. Dabei wird die Erarbeitung einer geeigneten Strategie in interkommunaler und regionaler Abstimmung einen der nächsten maßgeblichen Schritte darstellen (MWKEL RLP, 2010). Das Bundesland Hessen hat ein Konzept zum vorsorgenden Bodenschutz erstellt, welches die Kommunen berät bzw. motiviert, sich um entsprechende Maßnahmen zur Reduzie-

rung des Flächenverbrauchs und der praktischen Umsetzung zur Vermeidung und Kompensation von Bodenversiegelungen zu bemühen (Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz [HMuKLV], 2016a, 2016b).

Bedeutung von Bodenversiegelungen in urbanen Ökosystemen (Boden- und Wasserhaushalt sowie Klima)

Die negativen Effekte der Bodenversiegelung und damit auf wichtige ökologische Funktionen von Böden sind bezüglich der Umsetzung von Strategien zur ökologischen Nachhaltigkeit in der Planung, insbesondere in Stadtökosystem, hinlänglich anerkannt (Artmann, 2014). Der Einfluss von Bodenversiegelungen kann wie folgend zusammengefasst werden (vgl. Abbildung 55; vgl. EC, 2012a; Scalenghe & Marsan, 2009):

- **Infiltrationsminderung** (Teilversiegelung) bis **Infiltrationshemmnis** (Vollversiegelung) von Wasser (vgl. Abbildung 56) sowie **Absinken des Grundwasserspiegels**
- **erhöhter Oberflächenabflusses** (Beitrag zu schnell hochwasserwirksamem Abfluss: Hochwasser- und Sturzflutgefahr)
- **hohe und schnelle Verdunstung** (Interzeptionsverdunstung) in direkter Abhängigkeit der Benetzungskapazität von versiegelten Flächen
- **geringere Luftfeuchte**
- **fehlende kühlende Wirkung** der Luft durch fehlende Verdunstung
- höhere Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität und somit langfristiger Beitrag zur **Erwärmung der Luft** (erhöhte Lufttemperatur auch nachts)
- höhere Erwärmung oberflächennaher Bodenschichten unterhalb der Versiegelungsfläche; **erhöhte Bodentemperatur**
- **kein oder stark verringerter Gasaustausch** zwischen Boden und Atmosphäre (fehlende Bodenbelüftung, d.h. Risiko der Anaerobiose: Gärprozesse = Anreicherung von Methan, CO₂ und/oder hochgiftiger Schwefelwasserstoff)
- Erhöhung des Stadt-Umland-Temperatur-Gradienten (d.h. **klimatische Stadt-Umland-Effekte**, wie erhöhte Niederschlagswahrscheinlichkeiten im Stadt-Umland auf der windabgewandten Seite von Städten (vgl. Henninger & Weber, 2019))
- **Akkumulation von Schadstoffen**, insb. Schwermetallen durch versiegelte Flächen durch sich konzentriert sammelnden Oberflächenabfluss auf umliegende, nicht-versiegelte Böden und Flächennutzungen (Charzyński et al., 2017)
- Boden als Lebensraum für Organismen (insb. Bodenlebewesen) und als Standort für Pflanzen geht verloren; **Verlust an Biodiversität**
- **Verlust der Bodenfruchtbarkeit** (Produktivität des Bodens, Ertragsfähigkeit oder Ertragspotential)
- **Verlust des Speicher- und Puffervermögens**, z.B. Speicherung von Kohlenstoff, Um- und Abbau in Stoffkreisläufen, z.B. zur Bereitstellung pflanzenverfügbarer Nähr- und Spurenstoffen
- **Verbreitung und Ausweitung eines monotonen Stadtbildes** (ästhetische Einförmigkeit, abnehmende Attraktivität und Lebensqualität)

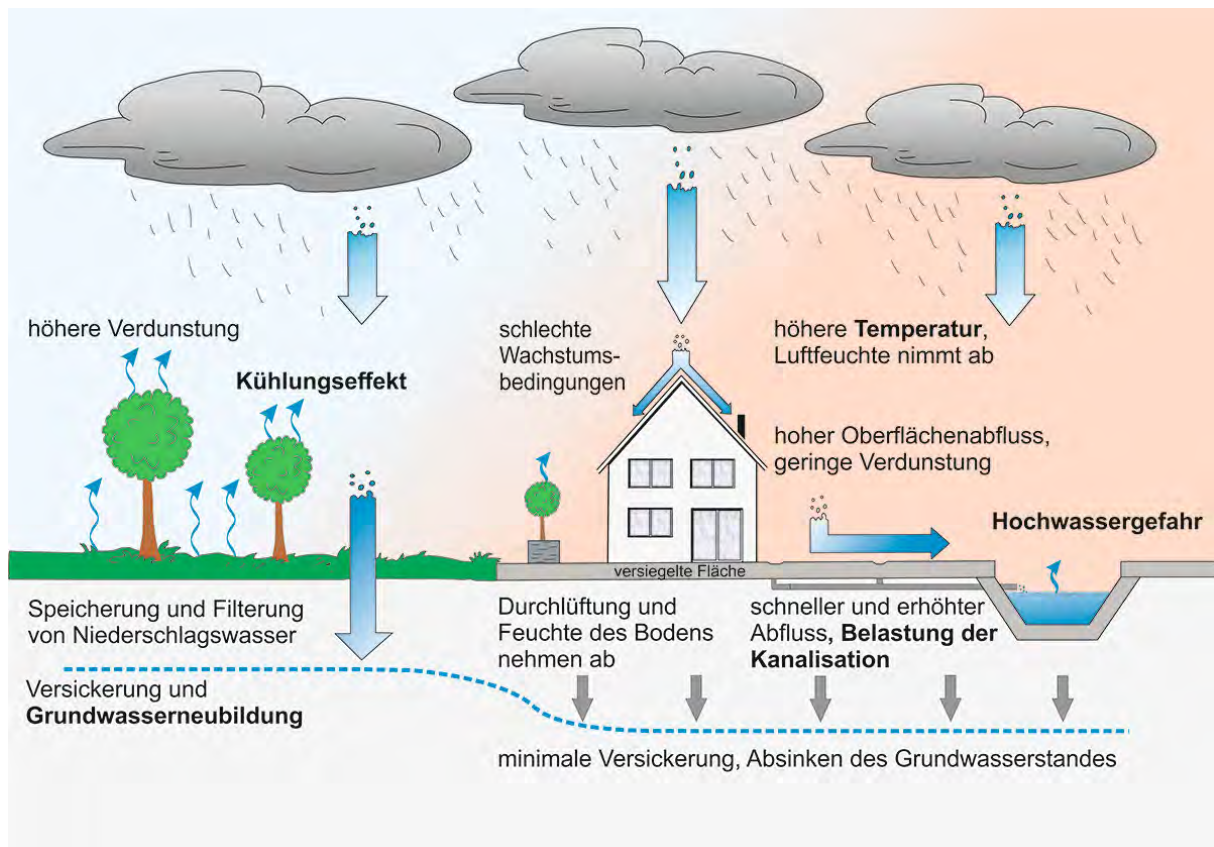


Abbildung 55 Bodenversiegelung im Wasserhaushalt (Quelle: (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen [LBEG NI], 2019)

Eine Auswirkung der physikalischen Faktoren wie höhere Oberflächen- und Lufttemperatur, urbane Hitzeinseln und geringe Luftfeuchte ist, dass negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit zunehmen, d.h. das gesundheitliche Risiko der Stadtbevölkerung ist höher, wenn es hitzebedingtem Stress – auch in Folge von Bodenversiegelung – ausgesetzt ist (Dugord et al., 2014).

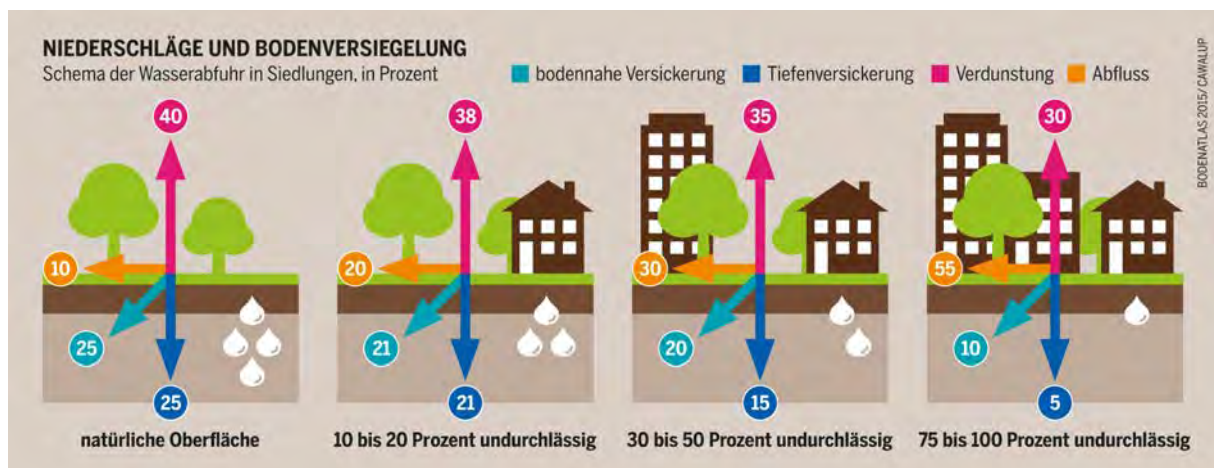


Abbildung 56 Einfluss von Bodenversiegelungen auf die Versickerung von Niederschlagswasser. (Quelle: Heinrich-Böll-Stiftung et al., 2015)

Eine grafische Zusammenfassung der Auswirkungen der im hier beschriebenen Kapitel der Bodenversiegelung im Welterbegebiet Oberes Mittelrheintal ist in Abbildung 57 dargestellt. Welche Handlungsmöglichkeiten für die Kommunen im Welterbegebiet Oberes Mittelrheintal möglich sind, wird in Kapitel 6.3 dargestellt.



Abbildung 57 Grafische Zusammenfassung der Auswirkungen der Bodenversiegelung im Welterbegebiet Oberes Mittelrheintal.

4.4 KALTLUFTENTSTEHUNGSGEBIETE UND -BAHNEN

Für die klare Darstellung und Verständnis der Vulnerabilitäten und Maßnahmen sollen zuerst die Begriffe „Kaltluft“ und „Frischlufte“ kurz definiert werden. Kaltluft - ist die Luft, die kälter ist als die Umgebung. Sie entsteht in so genannten Entstehungs- oder Quellgebieten, die im Kapitel 4.4.1 definiert und beschrieben werden, und fließt unter der Wirkung der Schwerkraft durch die Kaltluftabflussbahnen. Wenn diese Luft schadstoff-unbelastet in die Stadt kommt, dann kann es für die Stadt als eine Frischlufte betrachtet werden. Diese Studie fokussiert sich primär auf die mikrometeorologischen/bioklimatischen Aspekte der Luftzufuhr (Kaltluftzufuhr) und nicht auf die lufthygienischen Aspekte (Frischluftezufuhr). Deshalb wird im Weiteren nur den Begriff Kaltluft verwendet. Es muss aber bemerkt werden, dass im betrachteten Bereich des Mittelrheintals die Kaltluftentstehungsgebiete (z. B. Wälder, Weinberge) meistens schadstoff-unbelastet sind und so können die Kaltluftflüsse theoretisch auch als Frischlufteflüsse betrachtet werden. Die Eigenschaften der Quellgebiete sind also stark vom dort vorhandenen Landnutzungstyp abhängig.

Zuordnung von typischen Kaltluft- bzw. Kälteproduktionsraten in Quellgebieten mit unterschiedlichen Landnutzungen

Ein Quellgebiet oder Herkunfts- bzw. Entstehungsraum ist das Gebiet, in dem die Kaltluft gebildet wird, einschließlich der zugehörigen Transport- bzw. Leitbahnen. Als Herkunftsräume dienen z.B. land- und forstwirtschaftliche Flächen, aber auch Flüsse, Seen oder Täler. Allgemein ist der Herkunftsraum in der VDI-Richtlinie 3787 definiert. Demnach sind Gebiete für Kaltluftentstehung ein abgrenzbarer Raum, welcher aufgrund der momentanen Flächennutzung die Klimafunktion „Kaltluftentstehung“ aufweist (Verein Deutscher Ingenieure e.V [VDI], Richtlinie 3783 Blatt 9). Die „lokale Kaltluft“ ist nur qualitativ in der Richtlinie beschrieben (VDI, S. 10, Richtlinie 3783 Blatt 5)

Tabelle 6 Typische Kaltluft- bzw. Kälteproduktionsraten unterschiedlicher Landnutzungen (Quelle: BMVBS, 2013b, Tabelle 8)

Landnutzung	Kaltluftproduktionsrate $\text{m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$	Kälteproduktionsrate W / m^2
Grünland, Ackerland	15 – 20 (GEO-NET 2011a: Ackerflächen 10-15)	30
Wald	12 – 15 (Laubwald im Winter bis zu 20)	17 (über ebenem Gelände)
Gartenbau, Mischflächen	10 - 15	24
Siedlungsgebiete	1	0 – 8 (dichte – lockere Bebauung)
Wasseroberflächen	0	0 – minus 6 (flache – tiefe Gewässer)

Tabelle 6 stellt dar, mit welcher Kaltluftproduktionsrate und Kälteproduktionsrate bei den im Mittelrheintal vorkommenden Landnutzungen zu rechnen ist. Den besten Effekt für die Kaltluftproduktion und die Kälteproduktionsrate erzielen hierbei Acker und Grünland gefolgt von Wald und Mischflächen/Gartenbau. Die Wirksamkeit der Ausgleichsströmung ist in Tabelle 7 dargestellt. Je nach Kaltluftabfluss unterscheidet diese sich regional und lokal in der Stärke. Generell führen höhere Abflüsse in den Tälern zu einer höheren Wirksamkeit der Strömung.

Tabelle 7 Lokale und regionale Wirksamkeiten von Kaltluftabflüssen in Tälern nach Kaltluftabflussraten (Quelle: BMVBS, 2013b, Tabelle 9)

Kaltluftabfluss in Tälern [m^3/s]	Wirksamkeit der Ausgleichsströmung	
	Regional	Lokal
0 – 50	Nicht wirksam	Gering wirksam
> 50 – 100	Sehr gering wirksam	Wirksam
> 100 – 500	Gering wirksam	Hoch wirksam
> 500 – 2.500	Wirksam	Sehr hoch wirksam
> 2.500	Hoch wirksam	Sehr hoch wirksam

Die genaueren Auswirkungen des Kaltluftabflusses auf lokaler und regionaler Skala sind sehr stark von der lokalen Topografie, der Landnutzungsverteilung und der Bebauung abhängig. Um diese Effekte für praktische und wissenschaftliche Zwecke zu quantifizieren, werden zweidimensionale (2D) und dreidimensionale (3D) Abflussmodelle, wie KALM, KLAM 21 oder FITNAH verwendet (GEO-NET, 2004; Schädler & Lohmeyer, 1994; Sievers, 2005). Solche Modelle sind in der Lage die Einflüsse von Heterogenitäten der Oberfläche auf Luftströmungen adäquat zu berücksichtigen und zu quantifizieren. Abbildung 58 zeigt beispielhaft Kaltluftabflüsse mit KLAM und FITNAH Modellen, welche einen Überblick geben, wie sich Kaltluft im Belastungsraum verteilt und wo eventuelle Kaltluftschneisen entstehen müssten.

Beispiele:

Kaltluftabflüssen mit 3D Modellen FITNAH und KALM

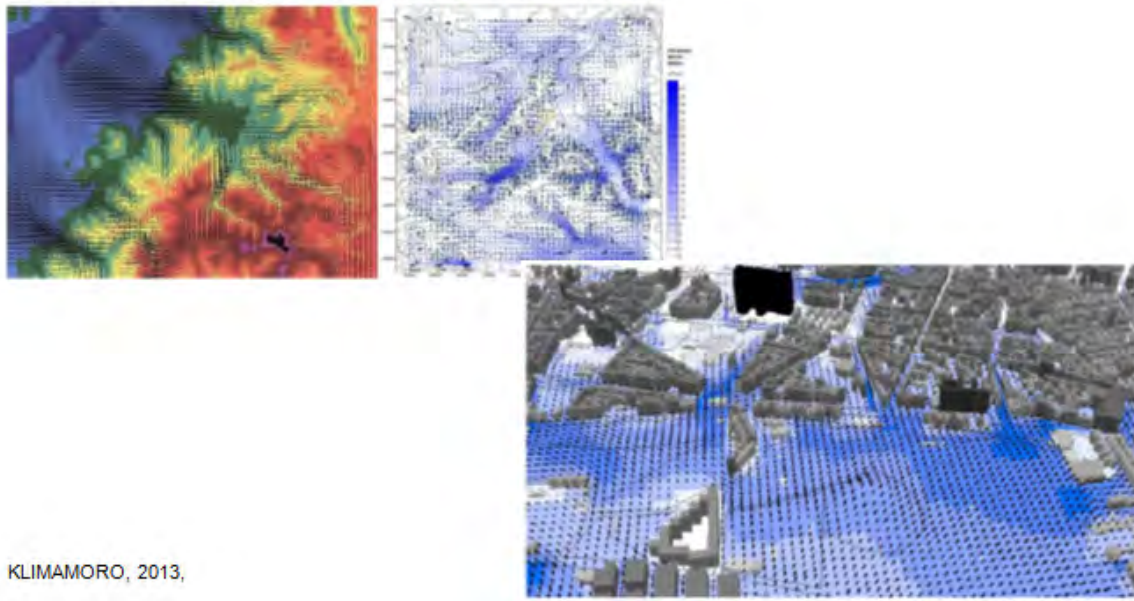


Abbildung 58 Modellerte Kaltluftabflüsse mit 3D Modellen FITNAH und KALM Quelle: BMVBS, 2013b , Abb. 10)

Bedeutung der Sicherung und Verbesserung von Kaltluftentstehungsgebieten und -bahnen für das örtliche Klima

Die Analyse des Klimawandels in Kapitel 3 zeigte eine deutliche Zunahme der Hitze- und Sommertage im Mittelrheingebiet (Abbildung 15). Zur Abmilderung und Begrenzung negativer Hitzefolgen sollen bei der Siedlungsentwicklung: a) die Kaltluftentstehungsgebiete erhalten bzw. neu bepflanzt werden sowie b) Ausgleichs- und Abflussbahnen für Kaltluft freigehalten werden (MWKEL RLP, 2013a). Dafür soll zunächst das betrachtete Gebiet analysiert werden und die bioklimatisch belasteten Wirkungsräume bzw. Belastungsräume, für die ein Bedarf an Entlastung besteht, sollen identifiziert werden. Außerdem sollen die für Entlastung bedeutsamen Kaltluftentstehungsgebiete und Kaltluftbahnen (mit Strömungssystem) identifiziert werden.

In Abbildung 59 ist schematisch dargestellt, wie Wirkungsräume und Belastungsräume von abfließender Kaltluft aus dem Herkunftsraum abgekühlt werden können.

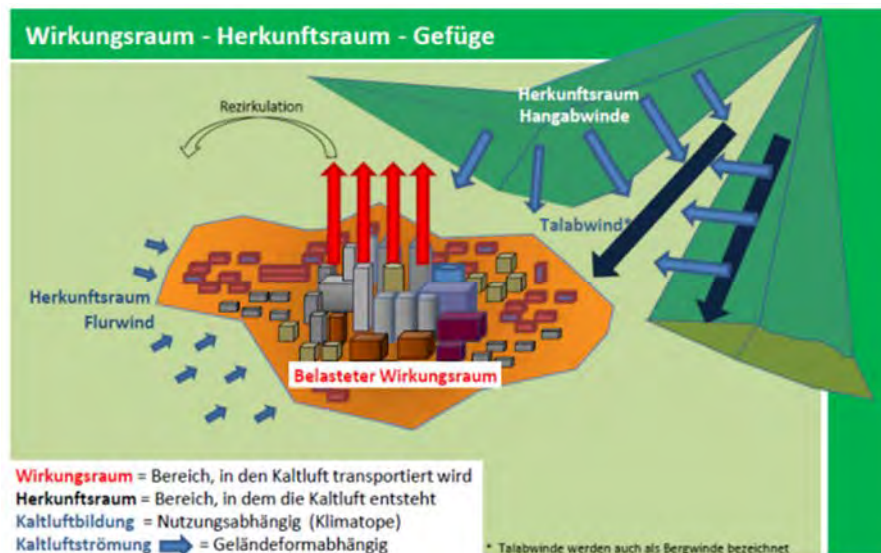


Abbildung 59 Schematische Darstellung der Herkunftsräume, des Transportes und des belasteten städtischen Wirkungsraums der kalten Luft (Quelle: BMVBS, 2013b KLIMAMORO, 2013, Abb. 4)

Die Belastungsräume im Mittelrheintal zeigen für das Schema unter Abbildung 60 typische Landschafts- und Siedlungsstrukturen: bei zu enger Bauweise und dunklen Oberflächen können städtische Wärmeinseln entstehen, d.h. die Lufttemperatur in der Stadt ist höher als über dem umgebenden Land. Dadurch entsteht in der Stadt ein lokales thermisches Tief, das die druckausgleichenden Flurwinde auslöst. Diese bringen die kühlere Luft aus der Umgebung in die Stadt. Die meisten Wohnräume (und Belastungsräume) im Mittelrheintal liegen unmittelbar im Rheintal, sind von Bergen und Hügeln umgeben und könnten somit auch von der Berg-Tal-Zirkulation profitieren, d.h. die Hitzebelastung wird abgemildert. Beim nächtlichen Hangabwind können die positiven Kühlungseffekte weiterhin durch die Landnutzung, die zum größten Teil auf Wald beruht, verstärkt werden. Wald als Flächennutzung bietet ein großes Potenzial an Kaltluftproduktion (siehe Tabelle 6), die durch Kaltluftströme in Belastungsräume transportiert wird und somit die Wärmeinseln auflöst oder abmildert.



Abbildung 60 Schematische Darstellung von urbanen Wärmeinseleffekt, Flurwinden und orographischen Kaltluftströmungen (Quelle: BMVBS, 2013b, Abb. 5).

Für die erfolgreiche Klimaanpassung in einer Region oder einer Stadt sollen entsprechend Maßnahmen durchgeführt werden für die Konservierung bzw. Neuentwicklung der Kaltluftentstehungsgebiete und -schneisen. Im Raumordnungsplan Mittelrhein-Westerwald wurden dazu bereits einige Maßnahmen vorgesehen, die im folgenden Kapitel zusammengefasst werden.

Maßnahmen nach dem Raumordnungsplan Mittelrhein-Westerwald

Im regionalen Raumordnungsplan Mittelrhein-Westerwald (Planungsgemeinschaft Mittelrhein-Westerwald, 2017) sind zahlreiche Maßnahmen beschrieben zur Steuerung der räumlichen Entwicklung in der Region. Das Ziel ist die Bewältigung der Herausforderungen aus dem demographischen Wandel und der Energiewende. Bezüglich des Klimas und der Reinhaltung der Luft, betreffend die zuvor beschriebenen Kaltluftentstehungsgebiete, sind die folgenden beiden Grundsätze G73 und G71 hervorzuheben:

„Grundsatz 73: Klimaökologische Ausgleichsräume und Luftaustauschbahnen sollen erhalten bleiben bzw. entwickelt werden.“

Begründung/Erläuterung:

Klimaökologische Ausgleichsräume und Luftaustauschbahnen sind im LEP IV dargestellt. Luftaustauschbahnen können vor allem Täler und offene Hanglagen sein. Sie weisen in der Regel talabwärts gerichtete Talabwindssysteme und Kaltluftströme auf, die zu einer besseren Versorgung von Siedlungen mit Kaltluft beitragen können. Flächen mit besonderer Bedeutung für die Klimaverbesserung und Lufthygiene (Kaltluftentstehungsbereiche, Kaltluftleitbahnen bzw. Luftaustauschbahnen) sind in die Festlegung und Abgrenzung der regionalen Grünzüge und Grünzäsuren eingegangen. Inwieweit Täler tatsächlich Bedeutung als Luftaustauschbahnen haben, kann in konkreteren Untersuchungen auf Ebene der Bauleitplanung ermittelt werden.“

„Grundsatz 71: Wälder sollen in ihrer Funktion als klimatische Regenerationsgebiete erhalten bleiben.“

Begründung/Erläuterung:

Waldgebiete erbringen in besonderem Maße bioklimatische Leistungen, insbesondere für Kaltluftproduktion, Staubfilterung und Temperatenausgleich.“

Raumordnungsplan Mittelrhein-Westerwald 2017 (Planungsgemeinschaft Mittelrhein-Westerwald, 2017)

5 BETROFFENHEIT DER KOMMUNEN IM OBEREN MITTEL-RHEINTAL DURCH DEN KLIMAWANDEL IN AUSGEWÄHLTEN TEILRÄUMEN

In den nachfolgenden Kapiteln geht es um die Identifizierung von Problemfeldern im Oberen Mittelrheintal anhand ausgewählter Teilräume, welche repräsentativen Charakter für das Tal haben. Für diese werden in Kap. 6 dann Lösungs- oder Handlungsvorschläge unterbreitet. Die Betroffenheit der ausgewählten Kommunen wird unter den Themenfeldern Boden (Versiegelung und Erosionsgefährdung), Hitze und Trockenheit, Wasser sowie der Frischluftsicherung betrachtet.

5.1 KRITERIEN UND METHODIK DER AUSWAHL EXEMPLARISCHER KOMMUNEN

Im Rahmen der Studie kann nicht das ganze Obere Mittelrheintal mit seinen Tal- und Höhen-dörfern untersucht werden. Ziel ist aber, für exemplarische Orte konkrete Aussagen treffen zu können, Handlungsbedarfe zu identifizieren und Optionen zur Anpassung zu konkretisieren. Dabei liegt das Interesse der weiteren Betrachtung auf den Siedlungsräumen, da diese als Lebensräume von Menschen am stärksten von zunehmender Hitze und möglichen Starkregereignissen betroffen sind.

Es entstand die Idee, als Untersuchungsraum ein Transekt festzulegen, das sowohl die Höhenlagen als auch die von Überwärmung stärker betroffenen Tallagen sowie beide Rheinseiten abbildet. Dieser Ausschnitt stellt den räumlichen Rahmen der weiteren Betrachtung dar, ohne alle im Transekt liegenden Orte zu bearbeiten.

Da für die beiden größten Siedlungsräume Koblenz und Bingen durch die vergangenen Gartenschauen schon viele Impulse und entsprechende Studien zur Klimaanpassung in Koblenz erarbeitet wurden, sollen diese Städte in der Studie nicht weiter betrachtet werden. Stattdessen werden zur Stärkung der Orte des Tales Siedlungsbereiche in der Mitte des Welterbe-Gebietes ausgewählt. Die Städte Boppard sowie St. Goar – linksrheinisch - und St. Goarshausen - rechtsrheinisch – werden im Weiteren vertiefend bearbeitet. Für die Frage der Frischluftversorgung und der Gewässer-Einzugsgebiete spielt dann auch der umgebende Landschaftsraum bis auf die Höhenlagen eine Rolle.

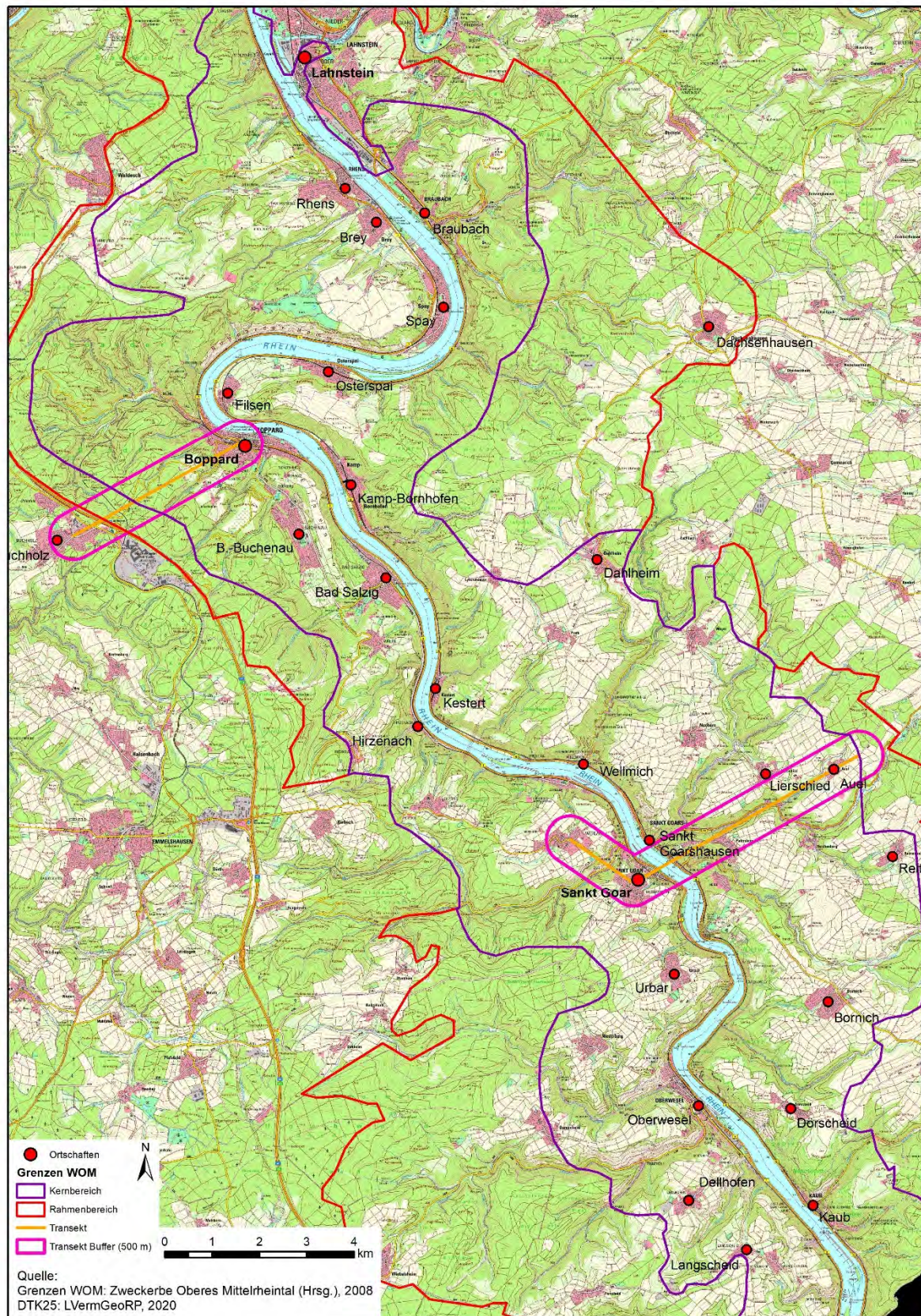


Abbildung 61 Übersichtskarte der gewählten Orte und Transekte im Mittelrheintal (Hochschule Koblenz/Kimmel 2020, Datenquellen: LVermGeoRPL, 2020a; Zweckverband Welterbe Oberes Mittelrheintal, 2008)

In den drei gewählten Orten Boppard, St. Goar und St. Goarshausen finden sich für viele Rheinorte typische Aspekte:

- Die Ortskerne sind je eng bebaut und weisen nur wenig Grünflächen auf. Schmale Gassen prägen die öffentlichen Räume, werden jedoch um steinerne Platzflächen als Aufenthaltsbereiche ergänzt. Je nach Tageszeit sind die steinernen Straßen und Gassen der Sonneneinstrahlung und damit Aufheizung mehr oder weniger stark ausgesetzt. Innerörtliches Grün oder private Gartenräume finden sich kaum, nur vereinzelt in den Übergängen zu den angrenzenden Steilhängen.
- Die Bundesstraßen (B9 rechtsrheinisch, B 42 linksrheinisch) trennen in St. Goar und St. Goarshausen den Ortskern von den Rheinanlagen, die Bahntrasse verstärkt beidseitig des Rheins Trennungswirkungen innerorts, in anderen Orten bildet sie die Zäsur/Barriere zwischen Ortslage und Rhein.
- Entlang der Bundesstraßen finden sich auf beiden Rheinseiten stark frequentierte Radwege mit durchaus unterschiedlicher Qualität. Über weite Strecken verlaufen diese ohne Bäume /Sträucher in praller Sonne. Auch hier benötigen die Radtouristen geschützte Pausenorte.
- Alle drei Orte haben Fähr- und Gastschiffanleger und sind von regelmäßigen Rheinhochwassern betroffen. Entsprechend sind die Rheinufer in den Ortslagen über große Strecken mit Kaimauern versehen und durch die fast jährlichen Überflutungen überwiegend befestigt ausgebildet. Die Uferanlagen müssen in vielen Orten auch den touristisch bedingten Stellplatzbedarf abdecken, d.h. hier finden sich auch häufig großflächige Pkw- und Reisebus-Stellplätze oder Wohnmobil- oder Campingplätze.
- Teile der Rheinufer sind aber auch als grüne, parkähnliche Anlagen ausgebildet, so in Boppard mit schönem Altbaumbestand. In St. Goar wurde dieser gefällt und die Anlagen sind dort gerade in der Neuentwicklung und im Umbau. In St. Goarshausen wurden sowohl die steinernen als auch die grünen Rheinuferbereiche erst vor wenigen Jahren neu angelegt, so dass hier die Grünstrukturen noch viel Zeit zur Entwicklung brauchen.
- Denkmalschutz und Welterbe sowie Erwartungen des Tourismus definieren in allen drei Orten Anforderungen an Entwicklung und Gestaltung. Touristisch spielen hierbei Tages-touristen der Gastschiffahrt ebenso eine Rolle wie Wanderer des Rheinsteigs, des Rheinhöhenwegs oder des Rheinburgenwegs. Zunehmend – mit wachsender Qualität des Radwegeausbaues – gewinnen auch Radtouristen an Bedeutung.

5.2 BETROFFENHEIT UNTER DEM ASPEKT VERSIEGELUNGSGRAD DES BODENS: FLÄCHENVERBRAUCH

Der Indikator zur Kennzeichnung der Inanspruchnahme und Nutzung von Böden wird als „Flächenverbrauch“ bezeichnet. Die Statistischen Ämter führen Siedlungs- und Verkehrsfläche als Umweltindikator zur Charakterisierung des Flächenverbrauchs und somit zur Beschreibung der Inanspruchnahme und Nutzung von Böden (Bodenversiegelungsgrad des Bodens) (Kramer, 2003). Eine wesentliche Zielvorgabe – z.B. mit Hilfe der Instrumente der Raumordnung (bspw. im Raumordnungsbericht) – ist deshalb die Flächenneuanspruchnahme zu reduzieren. Mit einer täglichen Flächenneuanspruchnahme von weniger als 1,5 ha (0,6 ha im Jahr 2014) hat

Rheinland-Pfalz bereits laut Raumordnungsbericht 2013 seit dem Jahr 2009 als eines der wenigen Flächenländer in Deutschland den auf die einzelnen Bundesländer umgelegten Flächensparzielwert des Bundes erreicht.

Im Folgenden werden Daten zur Siedlungs- (Tabelle 8) und Verkehrsfläche (Tabelle 9) für Sankt Goar, Boppard und Sankt Goarshausen auf Basis der Gemeindeebene dargestellt. Höher aufgelöste bzw. lokale Daten zur Bodenversiegelung, z.B. auf Grundlage von Katasterdaten der Gemeinden, liegen nicht vor.

Tabelle 8: Anteil der Siedlungsflächen an der gesamten Bodenfläche der Gemeinden (Daten: Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz, 2020)

Gemeinde	Bodenfläche insgesamt		Siedlung		davon							
	km ²	Einwohner je km ²	km ²	Anteil in %	Wohnbau		Industrie- und Gewerbe		Sport- und Freizeit		Sonstige	
					km ²	Anteil in %	km ²	Anteil in %	km ²	Anteil in %	km ²	Anteil in %
Sankt Goar, Stadt	23,17	117,8	1,25	5,4	0,61	2,6	0,12	0,5	0,35	1,5	0,17	0,8
Boppard, Stadt	74,88	204,7	6,17	8,2	2,78	3,7	0,98	1,3	1,78	2,4	0,62	0,8
Sankt Goarshausen	7,06	181,4	0,43	6,2	0,17	2,4	0,04	0,5	0,14	2	0,08	1,2

Tabelle 9: Anteil der Verkehrsflächen an der gesamten Bodenfläche der Gemeinden (Daten: Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz, 2020)

Gemeinde	Bodenfläche insgesamt		Verkehr		davon					
	km ²	Einwohner je km ²	km ²	Anteil in %	Straßenverkehr		Weg		Sonstige	
					km ²	Anteil in %	km ²	Anteil in %	km ²	Anteil in %
Sankt Goar, Stadt	23,17	117,8	1,27	5,5	0,56	2,4	0,53	2,3	0,18	0,8
Boppard, Stadt	74,88	204,7	5,43	7,3	2,94	3,9	1,83	2,4	0,66	0,9
Sankt Goarshausen	7,06	181,4	0,6	8,5	0,22	3,1	0,17	2,3	0,22	3,1

Versiegelungsgrad nach Siedlungs- und Verkehrsflächen

Der mittlere Flächenanteil von **Siedlungs- und Verkehrsflächen** liegt für **Deutschland insgesamt bei 14%** (Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz, 2020). Bei der Siedlungsfläche (33.268 Quadratkilometer) für Deutschland entfällt der größte Anteil mit 41 % auf die Wohnbaufläche, gefolgt von Flächen für Industrie und Gewerbe (19 %). Knapp 16 % der Flächen dienen Sport, Freizeit und Erholung. Die Flächen für Verkehr (18 047 Quadratkilometer) umfassen ganz überwiegend Flächen für Straßen und Wege.

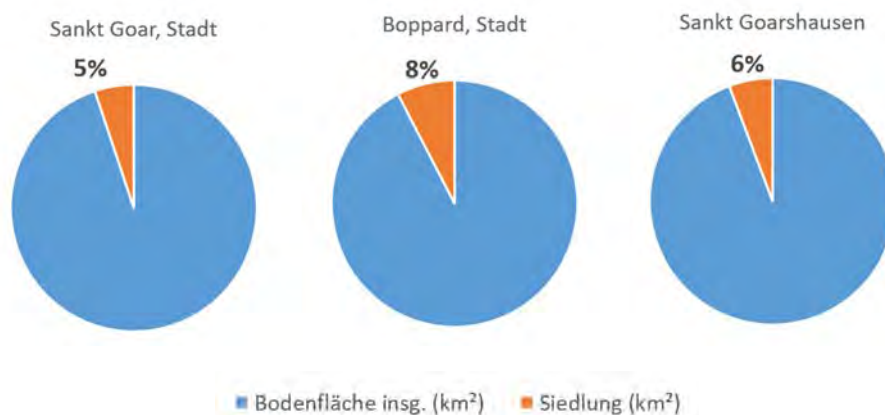


Abbildung 62: Anteil der Siedlungs- und Verkehrsflächen an der gesamten Bodenfläche der Gemeinden

Ein Vergleich der Gemeinden Sankt Goar, Boppard und Sankt Goarshausen zeigt, dass alle betrachteten Gemeinden unterhalb des Mittelwerts des Versiegelungsgrades Deutschlands liegen (Abbildung 62). Allerdings liegen Boppard und Sankt Goarshausen mit jeweils 13% Anteil Siedlungs- und Verkehrsfläche nur knapp unter dem bundesweiten Mittelwert des Versiegelungsgrades. Insgesamt zählen aber auch diese Gemeinden nicht zu den Verdichtungsräumen in Rheinland-Pfalz auf Gemeindeebene, z.B. im Vergleich zu Städten wie Ludwigshafen (45,9 % Siedlungs- und 12 % Verkehrsflächen), Mainz (36 % Siedlungs- und 14 % Verkehrsflächen) oder Koblenz (26, 1 % Siedlungs- und 10,6 % Verkehrsflächen). Im Vergleich zu anderen Gemeinden im Rhein-Hunsrück-Kreis sind Sankt Goar und Boppard sowie Sankt Goarshausen im Rhein-Lahn-Kreis in mittleren Bereichen bzgl. des Anteils der Siedlungs- und Verkehrsflächen an der gesamten Bodenfläche der Gemeinden zu finden (Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz, 2020).

Der Vergleich von statistischen Mittelwerten mit der Gesamt-Proportion von Siedlungs- und Verkehrsflächen in Bezug auf die Gesamt-Bodenfläche der Gemeinde liefert noch keine detaillierte Aussage zur räumlichen Verteilung der Bodenversiegelung bzw. des Versiegelungsgrades. Zur räumlichen Differenzierung des Bodenversiegelungsgrades dient ein erster Überblick mit Hilfe des Geowebdienstes Rheinland-Pfalz (siehe Abbildung 63, Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz, 2020).

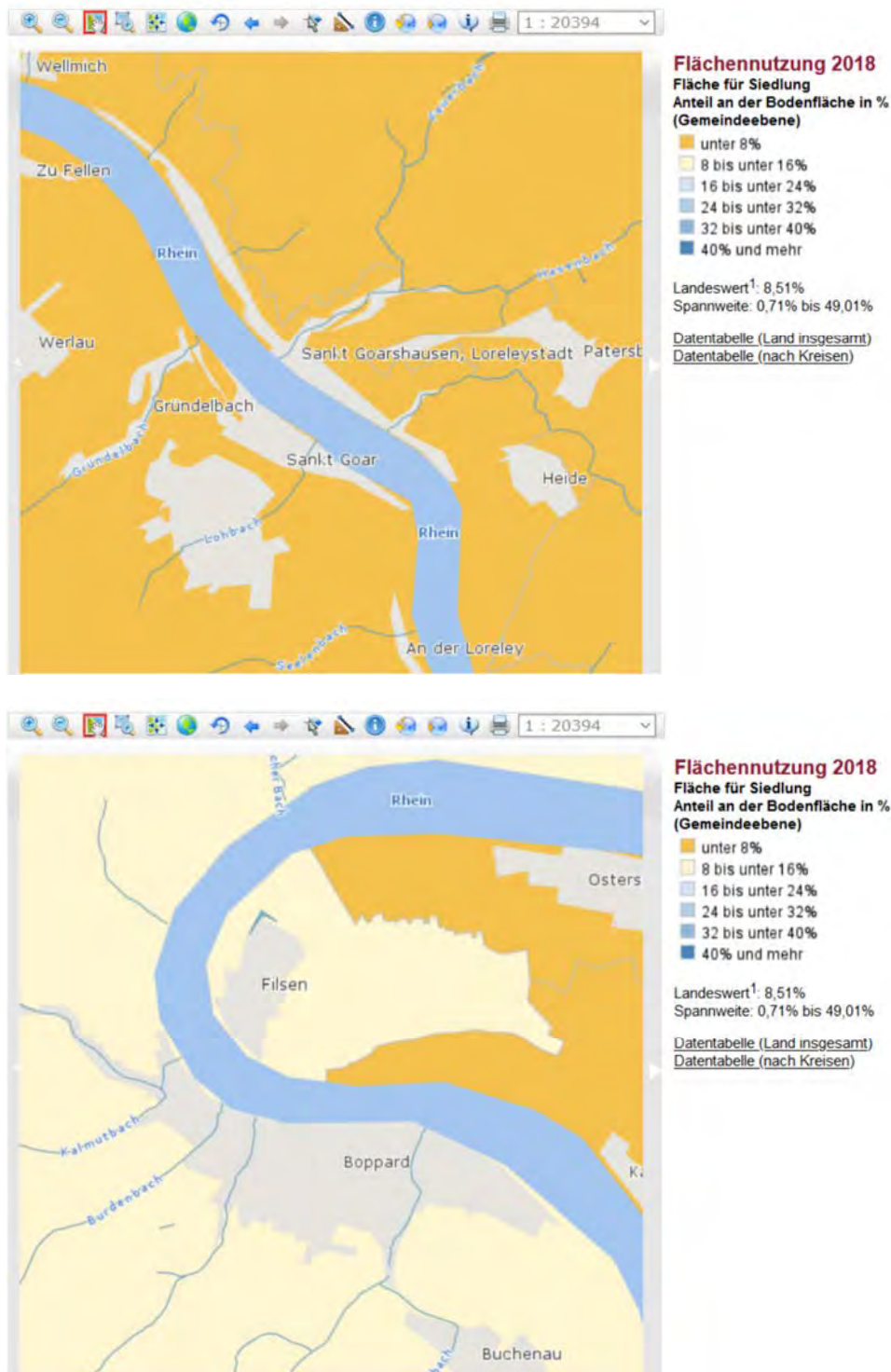


Abbildung 63: Anteil der Siedlungsflächen an der Gesamt-Bodenfläche der Gemeinde Sankt Goar und Sankt Goarshausen (oben) sowie der Gemeinde Boppard (unten) (Quelle: Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz, 2020)

Die höheren Bodenversiegelungsgrade finden sich bei allen drei untersuchten Gemeinden vor allem unmittelbar in den Tallagen, insbesondere entlang des Rheins, aber auch entlang der Seitentäler bzw. Zuflüsse des Rheins. Die „Hochflächen“, also die der Talung anschließenden höher gelegenen Flächen zeigen dagegen einen geringen Bodenversiegelungsgrad, insbesondere in den Gemeinden Sankt Goar und Sankt Goarshausen (unter 8 % Anteil Siedlungsfläche an der Gesamt-Bodenfläche). Die in der Gemeinde Boppard anschließenden Hangbereich (unter 8 bis unter 16 % Anteil Siedlungsfläche an der Gesamt-Bodenfläche) sind gegenüber den

„Hochflächen“ noch etwas mehr versiegelt, was mit der Landnutzung durch den Weinbau zu erklären sein dürfte.

Der höhere Versiegelungsgrad in den Tallagen ist vor allem unter dem Aspekt präferenzieller Fließwege bei Starkregenereignissen sowie zur mikroklimatischen Einschätzung von Hitzeinseln in der Ortslage zu berücksichtigen.

Im Folgenden wird eine statistische Analyse getrennt nach Siedlungs- und Verkehrsflächen dargestellt, um weitere, qualitative Interpretationen zur Bodenversiegelung der betroffenen Gemeinden zu ermöglichen.

Siedlungsflächen

Im Vergleich der drei Gemeinden Sankt Goar, Boppard und Sankt Goarshausen (Abbildung 64) dominiert jeweils der Anteil des Wohnbaus in der Gegenüberstellung der Siedlungsflächen, wenn auch Sankt Goar und Boppard einen höheren Anteil bei Wohnbauflächen gegenüber Sankt Goarshausen aufzeigen. In diesen drei Gemeinden ist auch der Anteil von Sport- und Freizeitflächen zwar von zweitrangiger, aber recht hoher Bedeutung. Industrie- und Gewerbeflächen nehmen in Sankt Goar und Sankt Goarshausen gegenüber Boppard eine eher untergeordnete Rolle ein.

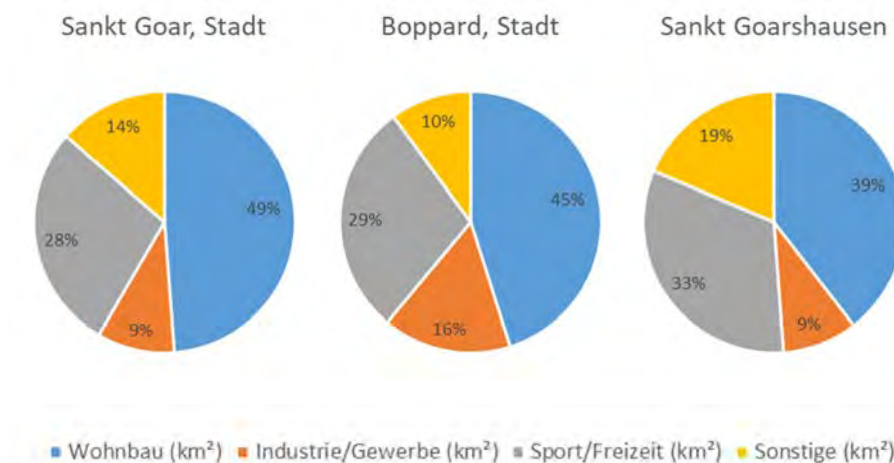


Abbildung 64 Zusammensetzung der Siedlungsflächen in Sankt Goar, Boppard und Sankt Goarshausen (Daten: Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz, 2020).

Wichtig ist festzuhalten, dass eine Einzelfallbetrachtung der Zusammensetzung der Siedlungsflächen zu berücksichtigen ist, vor allem vor dem Hintergrund der Planung von Maßnahmen zur Minderung und Kompensation von Bodenversiegelung.

Verkehrsflächen

Im Vergleich der drei Gemeinden Sankt Goar, Boppard und Sankt Goarshausen bezüglich der Verkehrsflächen (Abbildung 65) fällt auf, dass vor allem der Anteil des Straßenverkehrs in Boppard eine hohe Bedeutung hat. In Sankt Goar ist der Anteil des Straßenverkehrs ebenfalls am höchsten, jedoch ist der Anteil von Wegen fast gleich hoch. In Sankt Goarshausen ist der Anteil der Zusammensetzung der Verkehrsflächen auf den ersten Blick fast paritätisch verteilt, wobei auch hier der Straßenverkehr den insgesamt höchsten Anteil hat.

Sankt Goar, Stadt

Boppard, Stadt

Sankt Goarshausen

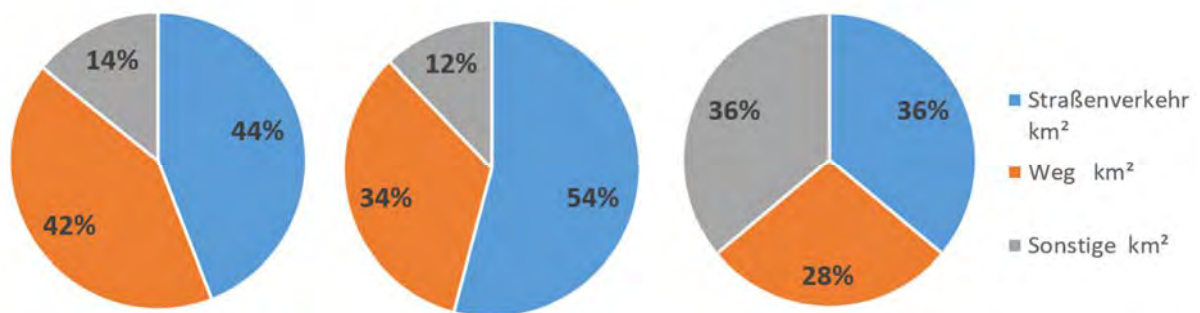


Abbildung 65: Zusammensetzung der Verkehrsflächen in Sankt Goar, Boppard und Sankt Goarshausen (Daten: Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz, 2020).

Auch hinsichtlich der Vergleiche der Verkehrsflächen ist festzuhalten, dass eine Einzelfallbetrachtung wichtig ist zu berücksichtigen, da hier ebenso eine fallbezogene Planung von Maßnahmen zur Minderung und Kompensation von Bodenversiegelung von Bedeutung ist.

Fazit

Der Flächenverbrauch und die damit einhergehende Bodenversiegelung sind auch im Welterbegebiet Oberes Mittelrheintal von Bedeutung, vor allem wenn es darum geht, Maßnahmen zur Klimaanpassung in Bezug auf die Versickerung von Wasser in Siedlungsflächen zu ermöglichen. In den drei exemplarisch betrachteten Gemeinden Sankt Goar, Boppard und Sankt Goarshausen zeigt sich, dass insbesondere für die Siedlungsflächen im Tal eine Betroffenheit bezüglich hoher Versiegelungsgrade des Bodens bestehen. Geeignete Maßnahmen zur Verminderung bestehender und zur Vermeidung zukünftiger Bodenversiegelungen lassen sich nur nach Analyse des zu betrachtenden Einzelfalls effektiv und zielführend lösen. Hierzu bedarf es allerdings detaillierterer Flächeninformationen auf der lokalen Ebene – wie sie z.B. durch ein Bodenversiegelungskataster gegeben wären – um eine entsprechende Managementplanung zur kommunalen Klimaanpassung im Welterbegebiet Oberes Mittelrheintal durchzuführen.

5.3 BETROFFENHEIT UNTER DEM ASPEKT DER HITZEBELASTUNG

Unter Bezug auf den in Kapitel 3 näher erläuterten Anstieg der Lufttemperatur und der Zunahme der Anzahl heißer Tage sprechen wir im Weiteren von Hitzebelastung bezogen auf die Folgen für die Umwelt und den Menschen.

Für den Naturhaushalt, Böden, Pflanzen und Tierwelt bedeutet Hitzebelastung Stress durch Temperatur und Trockenheit. Für den Menschen / die Bevölkerung stellen anhaltend hohe Lufttemperaturen in Hitzeperioden ein gesundheitliches Risiko dar. Die Hitzebelastung kann bei Menschen zur Dehydratation und damit zu erhöhter Wahrscheinlichkeit thromboembolischer Ereignisse und auch zu Nierenbelastung führen. Außerdem können als Folgen die Atemwegenerkrankungen, Regulationsstörungen und Kreislaufprobleme auftreten. Typische Symptome sind Kopfschmerzen, Erschöpfung und Benommenheit. Besonders gefährdet sind ältere Menschen und Personen mit Vorerkrankungen (UBA, 2015a, 2019a).

Der Deutsche Wetterdienst gibt Hitzewarnungen heraus, „wenn eine starke Wärmebelastung für mindestens 2 Tage in Folge vorhergesagt wird und eine ausreichende nächtliche Auskühlung der Wohnräume nicht mehr gewährleistet ist.“ Für eine starke Wärmebelastung relevante, „gefühlte Temperaturen“ sind am frühen Nachmittag 32° C resp. 38° C für eine extreme Wärmebelastung (vgl. DWD).

Kriterien zur Einschätzung der Hitzebelastung

Als Kriterien für die Beurteilung der möglichen Betroffenheit durch zunehmende Hitze, Trockenheit und gesundheitliche Belastungen für die Menschen werden nachfolgende Teilaspekte betrachtet und bewertet. Dabei stehen die roten und grünen Markierungen für ☹ = negative und 😊 = positive Auswirkung:

1. Versiegelungsanteil – z.B. Oberflächenbeschaffenheit von Flächen, fehlende Wasserdurchlässig- und -speicherfähigkeit, fehlende Verdunstung, dunkle Flächen / helle Flächen → versiegelt ☹, durchlässig 😊, Dunkel ☹, Hell 😊
2. Grünstrukturen – z.B. Beschattungs- und Kühlungspotenzial durch Bäume und andere Grünelemente, Verdunstungskühle → Grünbestand 😊, fehlend ☹
3. Verschattung - z.B. durch Bäume und Grünelemente, oder auch bauliche Maßnahmen wie Pergolen, Laubengänge, Dächer, Sonnensegel → Beschattung 😊, fehlend ☹
4. Kühlungspotenzial – z.B. Verdunstung (Grünstrukturen, offene Böden), Schattenbildung, Kaltlufttransport → s.o.
5. Albedo-Werte – Aufheizungspotenzial von Flächen, Gebäuden und Dächern insb. Flachdächern, aber auch Beläge und Fassaden → Aufheizung dunkler Flächen ☹
Helle Flächen heizen sich weniger stark auf 😊
6. Durchlüftung / Frischluftzufuhr - z.B. Bebauungsstruktur, Höhe und Dichte, Freihaltung der Frischluftschneisen und Sicherung von Kaltluftentstehung und -transport (offene Flächen, Wald, Gewässer) → Sicherung von Frischluftschneisen 😊, Verbauung ☹
7. Aufenthalts-/ Nutzungsqualität – z.B. Wahlfreiheit (Sonne/Schatten), Kühleffekte, Trinkwasser-brunnen, Wetterschutz (Sonne und Regen) Repräsentanz → entsprechende Angebote, Bänke etc. 😊, fehlend ☹
8. Qualität des Grüns unter Aspekten von Klimaanpassung, Wärme- und Trockenheitsverträglich, Klimabäume, Unterhaltung, Wasserverbrauch, Regenwassernutzung → angepasster Grünbestand 😊, ungeeignete Baumarten und schlechte Standortbedingungen ☹

Betroffenheit von Boppard

Boppard - linksrheinisch im hier weiter werdenden Tal der Bopparder Schlingen gelegen -, ist mit 15.413 Einwohnern nach Koblenz und Bingen der größte Ort im Tal und hat die Funktion eines Mittelzentrums. Die Stadt ist sowohl von der Höhe mit Anbindung an die A61, mit dem Stadtteil Buchholz, als auch vom Tal über die B 9 gut erschlossen. Boppard ist Luftkurort und vor allem – geprägt von den Hängen des Bopparder Hamms – ein berühmter Weinort. Boppard liegt 74 m ü. NN, seine höchste Erhebung im Stadtgebiet liegt auf 531 m ü. NN. Zu Boppard gehören 10 Stadtteile, die Flächenausdehnung der Gesamtgemeinde beträgt ca. 75 km².

Für die weitere Betrachtung der Handlungsfelder Hitze und Wasser ist der Anteil der Versiegelung im Stadtkern interessant. Wie in Kapitel 5.2 differenzierter dargestellt, liegt der Siedlungsanteil an der gesamten Bodenfläche in Boppard bei 8,2 %, der Verkehrsflächenanteil bei 7,3%, zusammen also bei 15.5%.

Betroffenheit und Handlungsbedarfe in Boppard für das Themenfeld „Hitze“

Aufgrund der vorgenannten Kriterien für das Themenfeld „Hitze“, insbesondere der hohen Dichte der Bebauung, des hohen Anteils an befestigter, versiegelter Fläche und des geringen Anteils an innerörtlichen Grünstrukturen wird die Innenstadt Boppard – ähnlich wie auch andere Städte im Oberen Mittelrheintal – als stark vom Temperaturanstieg und seinen Folgen betroffen eingeschätzt. Die genannten Kriterien begründen für Boppard ein vermutlich hohes Potenzial für Hitzebelastung.

Zur Feststellung möglicher Handlungsbedarfe und Defizite werden nachfolgend Teilräume der Innenstadt exemplarisch unter dem Aspekt des möglichen Hitzepotenzials mit Hilfe der vorgenannten Kriterien betrachtet und im Hinblick auf eventuelle Handlungsbedarfe bewertet. Die roten und grünen Markierungen stehen dabei für

☹ = negativ/kritisch = hoher Handlungsbedarf und

😊 = positiv/unkritisch = geringer bis kein Handlungsbedarf.

Dabei konzentriert sich die durchgeführte Defizitanalyse auf Bereiche, die beispielhaft für Boppard stehen können.

1. Rheinufer – Promenade und Uferpark

Der Kern der Bopparder Rheinpromenade – zwischen Bahnhof- und Burgstraße – weist im zentralen Bereich befestigte Flächen auf (Asphalt und wassergebundene Decke), die zu einem großen Teil auch als Pkw-Stellplätze genutzt werden. Die geschnittenen, doppelreihig angeordneten Bäume sind hier nicht nur markantes Gestaltungselement der Uferpromenade, sondern gute Schattengeber und wirken der Aufheizung von Flächen und Autos entgegen. 😊

Lediglich im Bereich der Alten Burg dominiert auf der Uferseite und im Innenhof der rein steinerne Eindruck. Wärme speichernder, dunkler Basalt verstärkt hier das Aufheizungspotenzial. In der heißen Jahreszeit spendet hier - je nach Tageszeit - auf der Rheinseite nur das Gebäude selber etwas Schatten. Das Aufheizungspotenzial ist groß und nur die mächtige, schatten spendende Linde auf der Platzseite der Burg ist ein angenehmer und Kühlung spendender Aufenthaltsort. ☹

Auch am Fähranleger haben Fußgänger oder Radfahrer keine Chance an heißen Tagen im Schatten auf die Fähre zu warten. ☹️

Die Rheinanlagen entwickeln sich Flussaufwärts – und auch in einem Teilstück Flussabwärts – parkähnlich mit offenen Rasenflächen und großem Baumbestand, der zu Hitzezeiten ein angenehmer und kühlender Ausgleichsraum ist. Starke Hitzeschäden konnten hier am Vegetationsbestand noch nicht registriert werden. 😊



Abbildung 66 Steinernen Flächen um die Alte Burg (links), Warten am Fähranleger in praller Sonne (rechts) (Quelle: Hochschule Koblenz/ Kirchner 2020)

Abschließende Bewertung / Handlungsbedarf: für die Rheinpromenade werden keine gravierenden Hitzepotenziale identifiziert, auch wenn der Versiegelungsanteil hier in Teilen hoch ist. Wärmespeicherungspotenziale sind durch dunkle Materialien gegeben, fehlende Schattenspenden oder fehlendes Grün wurde in Teilen (um die Burg und am Fähranleger) identifiziert. Grundsätzlich sorgt die Nähe zum Wasser für ausreichende und Temperatur ausgleichende Durchlüftung und leichte Kühlung. Insgesamt wird dieser Bereich aber *als ausbau- oder verbesserungsfähig* im Sinne der Klimaanpassung eingeschätzt.

2. öffentlicher Raum, Plätze und Gassen – das Beispiel Marktplatz:

Die Gassen und Plätze in der Innenstadt sind i.d.R. vollflächig gepflastert, nicht immer damit auch voll versiegelt, aber als steinerne Fläche und durch dunkles Material stellen sie potenzielle Aufheizungsflächen dar. ☹️

Die Enge vieler Gassen sorgt jedoch je nach Tageszeit auch für eine Beschattung durch die Bebauung. Dort wo Weinranken die Gassen überspannen oder Fassadenbegrünung zu finden ist, wird der Aufheizungseffekt stark gemildert, z.B. in der Korngasse (vgl. auch Messergebnisse in Kapitel 5.5). 😊

In breiteren, aber baumlosen Straßenzügen, in denen der Schattenwurf nicht bis zur anderen Fassade reicht, wie in der Fußgängerzone, sind die Anwohner und Fußgänger je nach Tagesverlauf der Sonne und damit der Aufheizungsgefahr ausgesetzt. ☹️

Der Marktplatz als vollständig befestigter Stadtplatz (dunkles Pflaster), umgeben von Gebäuden mit dunklen Dächern, birgt ein hohes Aufheizungspotenzial. Gemäß durchgeführten Messungen (vgl. Kapitel 5.5) ist er der wärmste Ort innerhalb von Boppard. ☹️

Der untere, als Parkplatz genutzte Marktplatzteil weist immerhin in der Mitte eine große alte Linde auf und an den Seiten zur Bebauung je kleinkronige Bäume, die in geringem Maße die

durch die Autos noch zunehmende Aufheizung der Flächen etwas mildern können. Auf dem oberen Marktplatz werden die noch recht neu gepflanzten Bäume erst in einigen Jahren für erforderlichen Schatten und kühlende Wirkung sorgen. Hier sind die steinernen gastronomischen Flächen mit Schirmen überspannt und ein Brunnen bietet Kühlung. 😊



Abbildung 67 Zwei Bereiche des steinernen Marktplatzes; im rot markierten Bereich wurde hier seitens der TH Bingen die höchste Temperatur in der Stadt gemessen (vgl. Kapitel 5.5, Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)

Abschließende Bewertung / Handlungsbedarf: für die Gassen und Plätze werden aufgrund des hohen Befestigungsanteils mit dunklem Pflaster Aufheizungspotenziale identifiziert, die, dort wo Schattenspenden (ob Grün oder Segel) fehlen, als problematisch einzuschätzen sind. Grundsätzlich sind hier von Fall zu Fall Lösungen zu suchen, die entweder durch Beschattung, offene Beläge oder durch höhere Grünanteile für Kühlung sorgen.

3. Straßenräume - Mainzer Straße incl. Parkplatz an der Mainzer Straße

Für viele Straßenräume in Boppard gilt ähnliches wie für die öffentlichen Räume: mit Asphalt vollversiegelte Flächen, Autos als Fahrverkehr plus parkende Wagen bilden zusätzliches Hitze-potenzial. Insbesondere in den Straßen, in denen es weder Straßenbäume noch öffentliches oder privates Grün in Form von Vorgärten gibt, tragen diese Räume zur Aufheizung der Stadt bei. Die baumlose Mainzer Straße mit Gegenverkehr und einseitigem Parken auf der 7 m breiten Fahrbahn steht hierfür als Beispiel. Aber auch "Querstraßen" wie die Andreas-Schüller-Straße mit Vorgärten, aber ohne Frischluftzirkulation zeigen höhere Temperaturen. ☹️



Abbildung 68 Mainzer Straße in zwei Richtungen, breit und ohne Bäume (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)

Abschließende Bewertung / Handlungsbedarf: diese Art Straßenräume werden aufgrund des hohen Aufheizungspotenzials als kritisch eingeschätzt. Grundsätzlich sind hier *Verbesserungen* des Kleinklimas durch Baumpflanzungen, Beschattung und wo möglich einen höheren Anteil an offenen Belägen und Grünanteil erforderlich.

4. Stellplätze und Parkhäuser – Bsp. Parkhaus Marienberg

Boppard weist viele oberirdische Stellplätze auf, zum Teil kleinräumig in der Innenstadt verteilt oder wie am Parkhaus Marienberg als Stapelbau mit einem der Sonne ausgesetzten Parkdeck.



Oberirdische Pkw-Stellplätze jeder Art stellen auf Grund der i.d.R. versiegelten Stellfläche und auf Grund der Aufheizung der Fahrzeuge und Abgabe der Wärme an die Umgebung ein sehr großes Aufheizungspotenzial dar, das das Stadtklima belastet. Wie stark sich dies auswirkt, hängt davon ab, wie die Stellfläche ausgebildet ist: wassergebundene Decken oder Fugenpflaster, die beide auch Wasser aufnehmen, speichern und langsam durch Verdunstung wieder abgeben und dadurch kühlen können, sind weniger gravierend als vollasphaltierte oder betonierte Flächen. Das wichtigste ist aber die Überdachung der sich stark aufheizenden Autos, ob durch ein gebautes Dach, ein Solardach, ein Rankgerüst oder Bäume.



Abbildung 69 Aufheizungspotenzial Parkdeck Marienberg (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)



Abbildung 70 Groß- und kleinräumige Stellplätze ohne Bäume; Ausnahme: Parken am Ufer (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)

Abschließende Bewertung / Handlungsbedarf: Die meisten der in Boppard anzutreffenden Stellplätze stellen als voll versiegelte und nicht beschattete Flächen ein großes Aufheizungspotenzial dar und werden daher als kritisch eingeschätzt. Das Parkdeck steht als Beispiel. Grundsätzlich wird hier Verbesserungsbedarf i.S. der Klimaanpassung, durch Stärkung der Beschattung und der Kühlung gesehen.

Betroffenheit von St. Goar

St. Goar – ebenfalls linksrheinisch, gegenüber dem Loreleyfelsen gelegen – gehört zur Verbandsgemeinde Hunsrück-Mittelrhein im Landkreis Rhein-Hunsrück. Das Gemeindegebiet umfasst drei Ortsbezirke, mit den Stadtteilen Werlau und Biebernheim, die je ca. 130 m höher gelegen sind als die Gemarkung St. Goar. St. Goar übernimmt mit ca. 2.756 Einwohnern (Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz, 2020) im Rahmen der zentralen Orte die Funktion eines kooperierenden Mittelzentrums.

Bei St. Goar befindet sich mit dem Fels der Loreley die engste Stelle des Rheintales. Das topografische Relief der Stadt St. Goar ist von steilen Hängen geprägt, mit einer Höhendifferenz von 440 m für die Klimaanpassung nicht unerheblich. Vier Gewässer III. Ordnung – der Gründelbach, der Lohrbach, der Seelenbach und der Galgenbach – bilden hier in schmalen Tälern Zuflüsse zum Rhein.

Die Stadt von St. Goar weist eine Bodenfläche von insgesamt 23,17 km² auf. Für die weitere Betrachtung der Handlungsfelder Hitze und Wasser ist der Anteil der Versiegelung im Stadtkern je interessant. Wie in Kapitel 5.2 differenzierter dargestellt, liegt der Siedlungsanteil an der gesamten Bodenfläche in St. Goar bei 5,4%, der Verkehrsflächenanteil bei 5,5%, zusammen also bei 11%.

Die St. Goarer sind bislang vorwiegend vom regelmäßig auftretenden Rheinhochwasser betroffen und hierauf auch eingestellt. Mittlerweile kommt es im statistischen Mittel mindestens alle 2 Jahre zu einem Wasserstand der die Ufer überflutet. Das letzte stärkere Ereignis hat am 08.01.2018 stattgefunden. Entsprechende Vorsorge wird individuell an den Häusern bereits getroffen. Starkregenereignisse wie zuletzt im Jahr 2017 sind dagegen im Bewusstsein der Bürger noch nicht verankert.

Betroffenheit und Handlungsbedarfe in St. Goar für das Themenfeld „Hitze“

In St. Goar erscheint die Betroffenheit auf den ersten Blick aufgrund bisheriger Vorereignisse eher im Themenfeld „Wasser“ zu liegen. Zudem ist in St. Goar flächenmäßig der Anteil sich aufheizender, versiegelter Flächen vergleichsweise geringer als in anderen Orten.

Trotzdem muss die Betroffenheit durch Hitze auch hier näher betrachtet werden, vor allem in den Bereichen, die nicht nur von den St. Goarer Bürgern sondern auch von vielen Touristen vor allem in den Sommermonaten besucht werden. Der Ortskern selber ist auch hier gekennzeichnet durch eine dichte Bebauung und geringen Anteil an Grünstrukturen. Der Stadtkern weist aufgrund der direkten Lage am Rhein, der damit verbundenen häufigen Überschwemmungen durch Hochwasser, dem Stellplatzbedarf, der Bundesstraße einen hohen Versiegelungsgrad auf. Die Gebäude sind häufig als geschlossene Bebauung ausgebildet und werden von engen Gassen durchkreuzt, sodass Frisch- und Kaltluftzufuhr sowie Durchlüftung eingeschränkt sind.

Aufgrund des hohen Versiegelungsgrades und eingeschränkter Durchlüftung besteht in St. Goar ein großes Hitzepotenzial, welches durch den Klimawandel künftig noch stärker ausfallen kann. Zustand und Qualitäten des Stadtkerns sowie der Uferanlagen, d.h. der stark frequentierten Bereiche werden daher im Hinblick auf ihre Hitzepotenziale gemäß der zuvor beschrie-

benen Kriterien weitergehend untersucht. Die Bewertung der jeweiligen Situation und möglicher Handlungsbedarfe erfolgt auch hier mit roten und grünen Markierungen für kritische oder weniger kritische Teilräume wie bereits bei Boppard beschrieben.

1. Rheinufer – Promenade und Uferpark

Ein Umbau der Rheinuferanlagen in St. Goar ist bereits in Vorbereitung. Unmittelbar im Abschnitt der Innenstadt, von dieser getrennt durch die B 9, ist das Ufer zwischen Hafenplatz und Rheinbalkon mit Rasenflächen grundsätzlich als grün angelegter Uferpark zu verstehen. Allerdings fehlen jetzt die in 2019 wegen Schäden gefälltten Großbäume. Die Aufenthaltsqualitäten dieser Flächen sind sehr eingeschränkt, da man kaum geschützte oder schattigere Plätze finden kann. Auch der gut angenommene neue Rheinbalkon ist voll besonnt. Mildernd wirkt hier im Hitzefall möglicherweise die flussbedingte, kühlende Luftbewegung. Besondere Bedeutung kommt daher der prächtigen, Schatten werfenden, alten Linde am Hansen-Platz zu.



Insgesamt stellt sich dieser zentrale Uferpark incl. des neuen, steinernen Rheinbalkons und der Rheinstufen an heißen Sommertagen als völlig der Sonne und Hitze ausgesetzter Bereich dar. Die grundsätzlich kühlende Wirkung des nahen Wassers und die Rasenflächen können dies nicht ausreichend mindern. Schattenspenden, vor allem Bäume, fehlen derzeit in diesem Bereich fast völlig.



Ab dem Rheinbalkon weiter rheinaufwärts ist auch in St. Goar das Ufer weitgehend versiegelt bzw. steinern. Schiffsanleger, Bundesstraße, Parkplätze und ein gepflasterter Uferweg prägen diesen Abschnitt. Neu gepflanzte Kastenlinden entwickeln sich gut und überstellen zusammen mit vereinzelt Bestandsbäumen kleine Teile der versiegelten Flächen. Ein großes Aufheizungspotenzial stellen in diesem Uferabschnitt bis zur „Schönen Aussicht“ die vielen Stellplätze dar.



Abbildung 71 Aufheizungspotenzial am Rheinbalkon; Stellplätze entlang der B9 (Bildquelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)

Abschließende Bewertung / Handlungsbedarf: Die Rheinuferanlagen in St. Goar weisen Hitzepotenziale in unterschiedlicher Stärke auf. Der grüne Parkbereich bedarf im Rahmen des Umbaus neuer Grünstrukturen, vor allem raumbildende und schattenspendende Bäume. Insbesondere der hohe Anteil der versiegelten Stellplatzflächen wird im Hinblick auf das hohe Hitzepotenzial als kritisch eingestuft.

2. Öffentlicher Raum, Plätze und Gassen – Bahnhofs- und Kirchvorplatz

Auch in St. Goar ist der enge Stadtkern überwiegend steinern. Da die Gassen eng sind, werden sie je nach Lage aber durch die Gebäude gut verschattet. Die blockartige Baustruktur in St. Goar mit einer Ausrichtung der engen Gassen Richtung Rhein, d.h. in SW-NO Richtung, sorgt teilweise für ausreichende Zufuhr kühlerer Luft von den Hängen, so dass Durchlüftung hier also gesichert ist. 😊

An einzelnen Häusern sowie am Rathaus findet sich Fassadenbegrünung. 😊

Als Plätze sind der neu gestaltete Marktplatz und Rathausplatz relevant. Beide sind als zentrale und viel genutzte Orte voll versiegelt, aber von großen alten Bäumen überstellt oder umrahmt. Allerdings weist der Rathausplatz selber als baumloser Platz, mit der Sonne ausgesetzten Aufenthaltsangeboten ein hohes Hitzepotenzial und wenig Aufenthaltsqualität auf. Das hier liegende neue Wasserbecken reicht nicht um für Kühlung und angenehme Atmosphäre zu sorgen. ☹️

Kritisch sind auch der Kirchplatz hinter der Stiftskirche und vor allem der Bahnhofsumfeld mit -umfeld zu sehen. Starkes Aufheizungspotenzial, fehlende Beschattung, fehlender Wetterschutz am Bahnsteig und mangelnde Aufenthaltsqualität durch fehlende Sitzmöglichkeiten begründen hier erhöhten Handlungsbedarf. ☹️



Abbildung 72 Aufheizungspotenziale Rathausplatz und Bahnhofsumfeld (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)



Abbildung 73 Kirchenumfeld (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)

Abschließende Bewertung/ Handlungsbedarf: Vor allem der Bahnhofsumfeld und das Bahnhofsumfeld oder der Kirchplatz sind von hohen Hitzepotenzialen und geringen Aufenthaltsqualitäten gekennzeichnet, so dass dieser Bereich kritisch und mit hohem Verbesserungsbedarf eingeschätzt wird.

3. Straßenräume – Bsp. Einkaufsstraße Heerstraße

Die breiteren, von SO nach NW, parallel zum Rhein verlaufenden Straßen – die Oberstraße und die Heerstraße – sind stärker der Sonneneinstrahlung ausgesetzt und weisen damit ein stärkeres Aufheizungspotenzial auf. ☹️

Als Beispiel dient hier die Einkaufsstraße Heerstraße, die die zentrale Achse zwischen Rathaus und der Stiftskirche am Bahnhof bildet. Die von Fassade zu Fassade befestigte Straße ist mit Pkw als Einbahnstraße befahrbar und bietet auch Stellflächen für PKW an. Klimatisch wirksames Grün ist hier nur wenig zu finden, die wenigen kleinkronigen Bäume können nicht für Kühlung oder Schatten sorgen, andere Verschattungselemente fehlen. ☹️

Auffallend ist auch hier die Vollversiegelung der Flächen, der u.U. nicht nur der Befahrbarkeit geschuldet ist, sondern auf den Hochwassereinfluss durch den Rhein zurückzuführen ist. Einige Hauseingänge sind deutlich erhöht ausgeführt und unterhalb der Türschwelle ist keine Wohnnutzung zu finden. Dies lässt regelmäßig hohe Wasserstände in der Einkaufsstraße vermuten. 😊



Abbildung 74 stark besonnene Straßenräume (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)

Abschließende Bewertung/ Handlungsbedarf: Insbesondere in den genannten Straßenräumen ist die Verschattung gering, das Hitzepotenzial hoch und durch die damit verbundenen gesundheitlichen Belastungen auch an heißen Sommertagen die Aufenthaltsqualität gering. Entsprechend wird auch für diese Situationen der Handlungsbedarf zur Minimierung der Aufheizung als hoch eingeschätzt.

4. Stellplätze

St. Goar ist ein touristischer Anziehungspunkt. Entsprechend hoch ist in der Stadt der Stellplatzbedarf, der überwiegend entlang der B9 in den Uferbereichen gedeckt wird. Die Maximierung der Stellplatzzahlen opfert Qualität und verstärkt in Zeiten des Klimawandels die Überwärmungspotenziale der Stadt. Zur Aufheizung der baumlosen, überwiegend asphaltierten Flächen kommt die Aufheizung der Fahrzeuge hinzu. Handlungsbedarfe werden hier nicht nur in der Minderung dieses Hitzepotenzials sondern auch in alternativen Lösungen wie Parkgaragen gesehen. ☹️



Abbildung 75 Unbeschattete Parkflächen am Rheinufer (Quelle: Hochschule Koblenz/Ulrike Kirchner)

Abschließende Bewertung / Handlungsbedarf: Die vielen Stellplätze in St. Goar, ob entlang der B9 oder als Flächenparkplätze, sind alle voll versiegelt und nicht beschattet. Sie stellen damit für die Stadt ein großes Aufheizungspotenzial dar und werden daher als kritisch eingeschätzt. Grundsätzlich wird hier Verbesserungsbedarf i.S. der Klimaanpassung, durch Stärkung der Beschattung und der Kühlung gesehen.

Betroffenheit von St. Goarshausen

St. Goarshausen gehört zur Verbandsgemeinde Loreley. Die Kleinstadt mit einer Einwohnerzahl von 1.285 (31. Dez. 2019) erstreckt sich auf schmaler Fläche entlang des Flusses am Fuß des Felsens der Loreley an der engsten Stelle des Oberen Mittelrheintales. Zur Gemeinde St. Goarshausen gehören die Stadtteile Ehrenthal, Wellmich, Heide, Kernstadt und Rheinblick. St. Goarshausen übernimmt im Zentrale-Orte-System wie St. Goar auf der anderen Rheinseite die Funktion eines kooperierenden Mittelzentrums und ist als Loreleystadt ein touristischer Anziehungspunkt.

Die Stadt St. Goarshausen – als kleinster der betrachteten Orte - weist eine Bodenfläche von insgesamt 7,06 km² auf. Für die weitere Betrachtung der Handlungsfelder Hitze und Wasser ist der Anteil der Versiegelung im Stadtkern interessant. Wie in Kap. 5.2 differenzierter dargestellt, liegt der Siedlungsanteil an der gesamten Bodenfläche in St. Goarshausen bei 6,2%, der Verkehrsflächenanteil bei 0,6%, zusammen also bei 6,8%.

Aus den engen Seitentälern queren auch in St. Goarshausen vier Bäche die Stadt und bilden Zuflüsse in den Rhein: der Hasenbach, der Forstbach (12 km lang), der Wellmicher Bach (9 km lang) und der Feuerbach. Insbesondere bei den zunehmenden Starkregenereignissen stellen diese Bäche für St. Goarshausen ein besonderes Gefahrenpotenzial dar.

Im Hinblick Klimawandelbetroffenheit und auf bisherige Ereignisse stellen in St. Goarshausen besonders Hochwasser und Starkregenereignisse mit Sturzfluten ein Problem dar. So war der Ort im Bereich des Wellmicher Baches insbesondere von den Starkregen in 2018 besonders betroffen. Aber auch im Hinblick auf Hitzepotenziale müssen in St. Goarshausen kritische Bereiche näher betrachtet werden. Zustand und Qualitäten des Stadtkerns sowie der stark frequentierten Uferanlagen werden daher im Hinblick auf ihre Hitzepotenziale tiefer gehend untersucht. Die Bewertung der jeweiligen Situation und möglicher Handlungsbedarfe erfolgt auch hier mit roten und grünen Markierungen für kritische oder weniger kritische Teilräume wie bereits bei Boppard beschrieben.

1. Rheinufer – Promenade und Uferpark

Das Rheinufer mit Gastschiff- und mit Fähranleger, PKW- und Bus-Stellplätzen sowie einer Uferpromenade wurde erst vor wenigen Jahren neu hergestellt. Auch wenn in diesem Zuge durchaus neue Bäume gepflanzt wurden, ist die Gesamtfläche bis heute eine eher kahle Fläche, in der die Menschen an heißen Sommertagen kaum Schatten und Kühle finden. Im Verhältnis zur Größe der Flächen kommt die an sich kühlende Wirkung des Rheins hierbei kaum zur Wirkung. ☹️

Vor allem der hohe Anteil befestigter, versiegelter und gleichzeitig baumloser Pflaster- und Asphaltflächen weist in diesem besonders frequentierten Bereich der Uferanlagen ein Aufheizungspotenzial auf, das der Stadt zunehmend Probleme bereiten wird. Schon jetzt klagen hier Besucher, dass es keinen Schutz vor Sonne gibt, die Aufenthaltsqualität hier also suboptimal ist und das Aufheizungspotenzial hoch. ☹️

Auch einige der neuen Bäume leiden ebenfalls unter zunehmendem Hitzestress. So zeigt sich hier, dass neu gepflanzte Bäume und Gehölze vor allem in den ersten Jahren eine intensivere Pflege und Unterhaltung und vor allem höhere Wasserversorgung benötigen. ☹️

Verschärfend kommt im rechtsrheinischen St. Goarshausen hinzu, dass die Exposition des Ortes und seiner Rheinanlagen die Sonnenseite der Ufer ist, d.h. nach Südwesten ausgerichtet. Während also linksrheinisch Bereiche der Orte im Tagesverlauf vielleicht schon ab Mittag Schatten haben (z.B. durch Bebauung oder die anschließenden Steilhänge) sind insbesondere die rechtsrheinischen Rheinanlagen je nach Jahreszeit und Sonnenstand in den Sommermonaten sehr lange der intensiven Sonne ausgesetzt. Was in den Übergangszeiten Frühjahr und Herbst also ein Plus sein kann, kann in Sommermonaten zu einer enormen Belastung werden. ☹️

Flussabwärts, liegen Tennisplätze und ein Uferpark sowie weitere PKW-Stellplätze, miteinander verbunden durch eine Uferpromenade. Auch wenn hier der Versiegelungsgrad geringer ist, große Teile Rasenflächen sind, fehlen kühlende, schattenspendende Elemente. Gut gemeinte Pergolen-Elemente überstellen zwei Sitzgruppen, sind aber nicht tief genug, um die Bänke zu beschatten und damit sind sie nicht ausreichend wirksam. ☹️

Positiv ist in diesem Abschnitt aber die Zugänglichkeit des Rheins zu vermerken. Auch wenn baum- und strauchlos, so hat man hier die Möglichkeit unten direkt am Wasser zu sitzen, das Wasser zu hören und dies als erfrischend wahrzunehmen. 😊

Flussaufwärts werden die Ufer dann sehr schmal, so dass es hier kein nutzbares Rheinvorge-lände mehr gibt.



Abbildung 76 Die Uferanlagen: weitgehend steinern, wenig Großgrün, Pergolen funktionslos, ohne Schatten (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)

Abschließende Bewertung / Handlungsbedarf: Die Rheinuferanlagen in St. Goarshausen weisen ein sehr hohes Hitze Potenzial auf. Der grüne Uferpark bedarf ergänzender Elemente und Grünstrukturen, vor allem raumbildende und schattenspendende Bäume. Insbesondere der hohe Anteil der versiegelten Platz- und PKW-Aufstellflächen wird im Hinblick auf das hohe Hitze Potenzial als kritisch eingestuft.

2. öffentlicher Raum, Plätze und Gassen – Bahnhofs- und Kirchvorplatz

Der Stadtkern von St. Goarshausen erstreckt sich auf schmaler Fläche langgezogen zwischen Bahntrasse auf der Steilhangseite und B 42 auf der Flussseite, im Grunde ein steinerner kleiner Ort, mit minimalen Grünflächen und schönen alten Gassen. Während davon auszugehen ist, dass der südlich der L338, zwischen Rundem Turm und Historischem Stadtturm liegende, eng bebaute Ortsbereich keine Aufheizungsprobleme haben wird (enge Gassen, früh voll verschattet, mit Weinranken begrünt),



weist der zum Rhein und den vorbeschriebenen Uferanlagen offene Bereich, der der Süd-Westsonne ausgesetzt ist, durch seine Exposition ein Hitze Potenzial auf, dem entgegen zu wirken ist. Hier liegende PKW-Stellplätze oder auch der Kinderspielplatz sind von Aufheizungs-potenzial besonders betroffen.

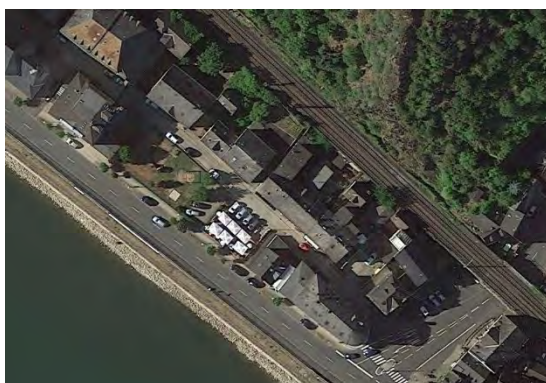


Abbildung 77 Unbeschatteter Spielplatz in der Dolkstraße neben Stellplätzen (Quelle: maps.google.com; Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)

Abschließende Bewertung/ Handlungsbedarf: Trotz des hohen Anteils befestigter Flächen ist im innerörtlichen Bereich der Kernstadt von St. Goarshausen nicht von erhöhten Hitze Potenzialen auszugehen, denn die bauliche Enge sorgt innerorts im Tagesverlauf schon früh

für Beschattung. Trotzdem wird hier von einem *Handlungsbedarf zur Verbesserung von Kleinklima* und Aufenthaltsqualitäten vor allem im Umfeld der Kirchen und im Bereich der unbebauten Flächen der Dolkstraße mit Spielplatz und PKW-Stellplätzen ausgegangen.

3. Straßenräume – Bsp. Bahnhofsstraße

Kritisch erscheint innerorts besonders der Bereich um den Bahnhof und vor allem die gesamte Bahnhofsstraße, die voll asphaltiert ist und kaum Fußwegeflächen, geschweige denn Grün oder andere das Stadtklima und die Aufenthaltsqualität fördernde Elemente aufweist. Dieser Bereich ist zwar nicht extrem von Aufheizung gefährdet, weist aber als Ortsdurchfahrt (B 42) klimatische und gestalterische Mängel auf, die zu verbessern wären. ☹️

Abschließende Bewertung / Handlungsbedarf: Insbesondere in der Bahnhofstraße wird von einem Handlungsbedarf zur Verbesserung von Kleinklima und Aufenthaltsqualität ausgegangen.

4. Stellplätze

Wie fast alle Orte im Tal hat auch St. Goarshausen aufgrund seiner touristischen Anziehung einen hohen Stellplatzbedarf. Aufgrund der geringen Flächenausdehnung und Enge des Ortes verteilen sich hier die Stellplätze kleinräumig an verschiedenen Stellen und nur in den Rheinglagen liegen große asphaltierte Stellplätze. Ohne Bäume oder andere Überdeckung stellen diese Flächen und die Autos ein Aufheizungspotenzial dar. ☹️



Abbildung 78 Versiegelte Stellplatzflächen als Aufheizungspotenzial (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)

Abschließende Bewertung / Handlungsbedarf: Für die diversen, versiegelten und baumlosen Stellplätze in St. Goarshausen werden Handlungsbedarfe zur Minderung der Aufheizung gesehen.

5.4 BETROFFENHEIT IM THEMENFELD WASSER

Kriterien zur Beurteilung von Wassernutzung und Gewässern

Zur Beurteilung der möglichen Betroffenheit der Kommunen des Oberen Mittelrheintals sollten die Klimawandel-Folgen Starkregen und Sturzfluten, Hoch- und Niedrigwasser sowie die Auswirkungen von Wassermangel in Trocken- oder Hitzeperioden betrachtet werden. Die mögliche Betroffenheit durch Starkregen, Hochwasser und Mangel von Wasser zur Kühlung in Hitzeperioden konnten näher untersucht werden. Dazu wurden Karten zur Gewässerstrukturgüte (LfU RLP, 2018) sowie Karten der Erosionsgefährdung herangezogen (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz [LGB RLP], 2017). Weiterhin wurden die Hochwassergefahrenkarten

des Rheins und Luftbilder zur Einschätzung der Landnutzung genutzt. Dazu kamen Ortsbegehungen im Mai und September 2020. Die Bewertung von Folgen von Niedrigwasser wie auch die Folgen von Wassermangel in Trockenperioden bedürfen einer weiteren Untersuchung und können derzeit noch nicht bewertet werden.

Zur Bewertung der Betroffenheit bezüglich Starkregen und Sturzfluten, Hochwasser sowie von Wasser zur Kühlung in Hitzeperioden werden die folgenden fünf Kriterien verwendet. Aus deren Bewertung lassen sich erste Rückschlüsse zur Verwundbarkeit der Kommunen, d.h. ihrer Anfälligkeit gegenüber nachteiligen Auswirkungen der Klimaänderung, ziehen.

1. Gewässerstrukturgüte

- a) Natürlicher Zustand von Fließgewässern: Betrachtung von Gewässerstrukturgütekriterien wie Gefälle (hoch: (-); gering: (+)), gekrümmter (+) oder gerader (-) Gewässerverlauf, Ufer- und Sohlmaterial vielseitig (Sand; Kies; Boden) (+) oder stark verbaut (Mauerwerk, Beton) (-), Bewuchs am Ufer vielseitig (+) oder nicht vorhanden (-), Ufergestaltung: Zugang möglich über flache Ufer (+) oder verbautes Ufer (steile Böschung; Mauer, Zaun) (-). (vgl. auch Gewässerstrukturgüte-Bewertung: Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser [LAWA], 1999; LfU RLP, 2005, 2018)
 - b) Durchgängigkeit der Gewässer: Betrachtung der Gewässerstrukturgüte-Aspekte wie Durchlässe [rund und eng (-); weit, unten natürliche Sohle (+)], Querbauwerke oder Abstürze (-), kleine Brücken [Querschnitt ausreichend für Starkregen (+), sonst (-)], verrohrte Abschnitte (-), Rechen [an Engstellen, enge Stababstände (-), im Wald, Fangrechen von Treibgut (+)]. (vgl. auch Gewässerstrukturgüte-Bewertung, siehe 1a).
 - c) Ausuferungs- und Entwicklungsmöglichkeiten von Gewässern: Uferstreifen bzw. Gewässerentwicklungskorridor vorhanden (+); Ufer natürlich (+) oder verbaut (-); Mulden oder Gräben zum Gewässerrückhalt vorhanden (+), Teiche oder Hochwasserrückhalteräume vorhanden (+), Auenflächen vorhanden (+). (vgl. auch Gewässerstrukturgüte-Bewertung, siehe 1a)
2. Retention im Einzugsgebiet der Gewässer bzw. in Hanglagen: Gefälle bzw. Hangneigung hoch (-), niedrig (+), Versiegelungsgrad hoch (-), niedrig (+), Einleitungen in Gewässer aus versiegelten Flächen (-), Wassererosionsgefahr hoch (-), Flächennutzung: hoher Abflussbeiwert (-), z.B. Mais oder Fläche unter Folie; Weinhang mit Bewirtschaftung in Längsrichtung (-); Wald (+); Grünland (+), Terrassenanbau (+), Bankette oder Querrinnen im Hang (+). (vgl. LGB RLP, 2017)
 3. Potenziell von Überschwemmungen betroffene Infrastruktur und Gebäude: Hochgelegte Eingänge (+); Schwellen (+), wasserbeständige Fassaden (+), Schottsysteme (+), Öltanks (-), Hochwasserpas vorhanden (+). Ausführliche Prüfkriterien liefert z.B. der Hochwasserpas (HKC).
 4. Sensibilisierung der Bevölkerung und sonstiger Akteure: Pegellatten mit Hochwasserständen sichtbar angebracht (+), Hochwasserinformationen für Bürger (+), Warnsysteme wie Apps bekannt (+), Hochwasser- und Starkregengefahrenkarten verfügbar und bekannt (+). Versicherungen abgeschlossen (+), Akteure für Hochwasserfall geschult (+).

5. Zugang zu Wasser zur Kühlung: (vgl. Handlungsfeld Hitze): Zugang zu Badegewässern (+); Wasserspiele oder Springbrunnen (+); Wasserspielplätze (+); Aufenthaltsmöglichkeiten an bzw. Zugang zu Fließgewässern (+); Trinkwasserspender bzw. Zugang zu Trinkwasser (+); weitere Möglichkeiten wie Nebelduschen (+).

Aus den Kriterien zur Gewässerstrukturgüte, zur Retention im Einzugsgebiet und zur potenziell von Überschwemmungen betroffenen Infrastruktur lassen sich erste Rückschlüsse auf die mögliche Verwundbarkeit bezogen auf Starkregen und Sturzfluten sowie Hochwasser ziehen. Darüber hinaus bestehen Zusammenhänge mit den Handlungsfeldern Bodenschutz, da Wassererosion zu Bodenverlust führt, und zum Handlungsfeld Biodiversität, die durch stark veränderte Gewässer beeinträchtigt wird. Die Retention im Einzugsgebiet beeinflusst die Wasserspeicherung und die Kühlleistung infolge von Verdunstung. Dadurch kann eine verbesserte Retention die Verwundbarkeit bezüglich Hitze und Trockenheit reduzieren.

Wie erwähnt, wurden Risiken durch Niedrigwasser oder Wassermangel in Trockenperioden hier nicht weiter untersucht. Der Tourismus in den Sommermonaten ist auf Fährverbindungen angewiesen, die bei Niedrigwasser teilweise zum Erliegen kommen. Im Zusammenhang mit bestehenden und neu anzulegenden Grünflächen sollte der Bewässerungsbedarf und die Möglichkeiten der nachhaltigen Wasserbereitstellung geprüft werden. In den weiteren Prozess zur Anpassung an den Klimawandel im Oberen Mittelrheintal sollten auch diese Aspekte diskutiert werden. Nach näherer Analyse der Betroffenheit können entsprechende Maßnahmen abgeleitet werden.

Betroffenheit von Boppard

Der Ort Boppard hat – typisch für die Orte des Mittelrheintals – die Gewässer im Ort selbst sehr stark oder vollständig verändert. In weiter oben gelegenen Abschnitten sind die Gewässer teilweise noch mäßig oder gering verändert, aber auch hier finden sich stark veränderte Bereiche. Es finden sich Flächen auch mit starker Bodenerosionsgefährdung. Versiegelte und steile Hänge beeinträchtigen den Wasserrückhalt. Umgekehrt kann Niederschlagswasser in den höheren nicht bebauten Ortslagen zurückgehalten werden. Die Infrastruktur ist wie an allen Orten am Mittelrhein von Hochwassergefahr betroffen, darauf aber auch weitgehend eingestellt. Eine Sensibilisierung der Bevölkerung zu Risiken wie Hochwasser, Starkregen oder Hitze findet bis auf die historischen Hochwassermarken im Ort nicht statt. Der Zugang zu Wasser ist in Boppard kaum möglich, weshalb kühlende Effekte schwer zu erreichen sind. Im folgenden Text werden die einzelnen Kriterien genauer erläutert.

Tabelle 10 Mögliche Betroffenheit von Boppard bezogen auf Klimawandelfolgen im Handlungsfeld Wasser und Gewässer

Kriterium	Bewertung
1. Gewässerstrukturgüte	
2. Retention von Wasser	 
3. Von Überschwemmungen betroffene Infrastruktur	 
4. Sensibilisierung der Bevölkerung	 
5. Zugang zu Wasser zur Kühlung	

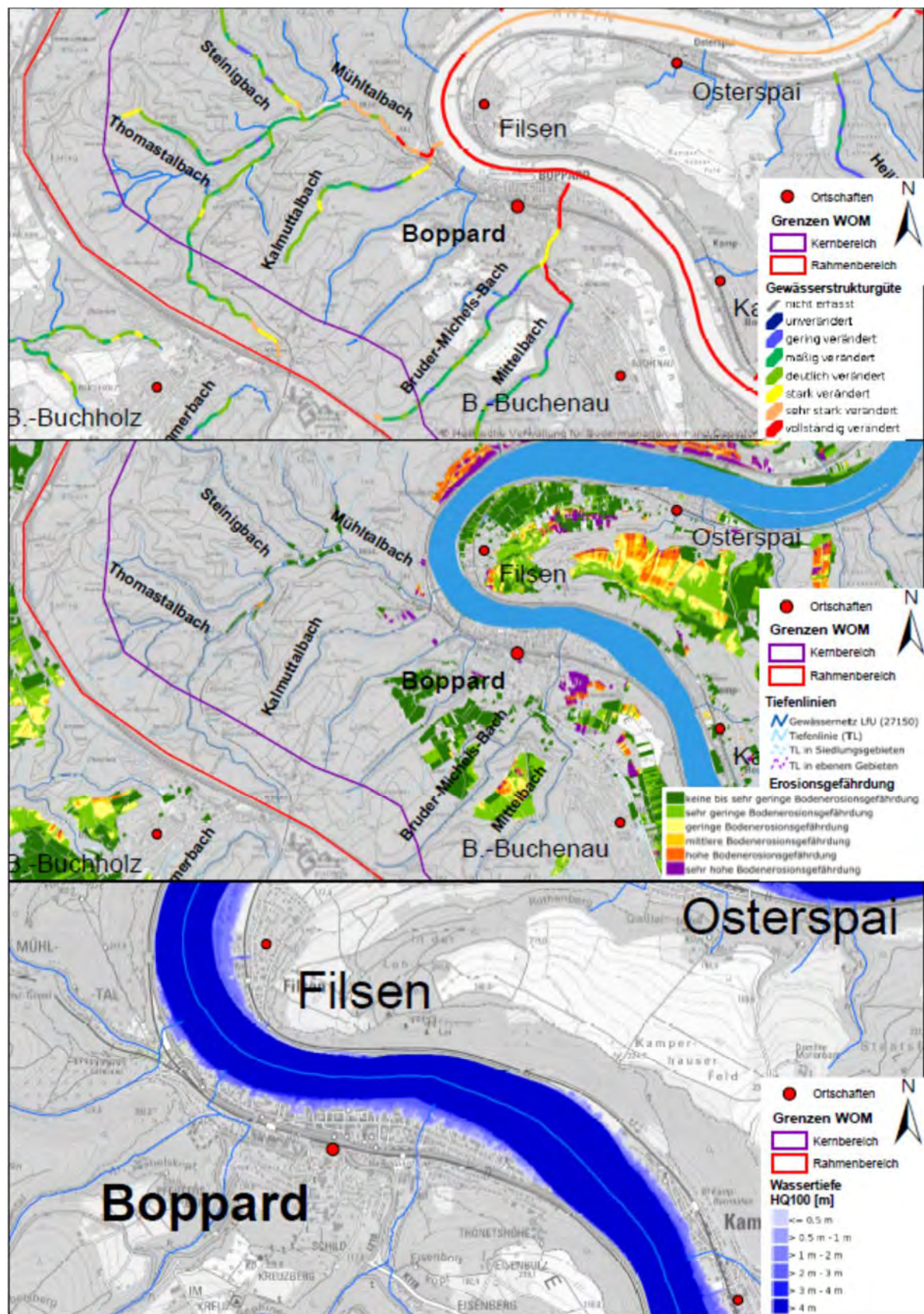


Abbildung 79 Gewässerkarte von Boppard (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020, Datengrundlagen: LfU RLP, 2018 (Gewässerstrukturgüte), LGB RLP, o.J., 2017 (Tiefenlinien und Erosionsgefährdung), MUEEF RLP, o.J.–b (Wassertiefe))

1. Gewässerstrukturgüte in Boppard

In Boppard fließen folgende Gewässer von den Hängen durch den Ort in den Rhein (von Nord nach Süd): Mühlbach (Mühlthal), Kalmutbach, Burdenbach, Fraubach, Bruder-Michels-Bach sowie Mittelbach. In den Mühlbach fließen mehrere kleinere Gewässer. Bruder-Michels-Bach und Mittelbach vereinigen sich, bevor sie durch den Ort dem Rhein zufließen (Abbildung 79).



Abbildung 80 Boppard: Einmündung des Bruder-Michels-Bachs in den Rhein. Betonierte Sohle, erschwerter Zugang. (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020), Fraubach, maroder Rechen vor verrohrtem Abschnitt (Quelle: Hochschule Koblenz/Kaspar 2020)

Die Strukturgüte ist für den Burden- und Fraubach nicht bewertet worden. Die bewerteten Gewässer weisen im Oberlauf jeweils eine mäßig bis deutlich, teilweise nur gering oder aber



stark veränderte Struktur auf. Im Unterlauf weisen sie eine stark bis vollständig veränderte Struktur auf. Der Fraubach fließt z.B. aus einem Wald kommend über ein älteres Rechenbauwerk in eine Verrohrung. Der Mühl(tal)bach ist stark eingeengt durch die parallel verlaufenden Straßen, weshalb er durch Mauern eingefasst wurde. Die Mauern als „Uferstruktur“ bieten keinen Zugang für Menschen und kaum Lebensraum für Tiere oder Pflanzen. Die Brückendurchlässe des Mühlbachs könnten bei Starkregen durch Schwemmgut verklausen (Abbildung 83).

Der Bruder-Michels-Bach verläuft in einer Verrohrung zwischen Bundesstraße und Rhein unterhalb eines Spielplatzes. Erst nach dem Spielplatz ist der Bach zu sehen zwischen der Bebauung, allerdings auch nicht zugänglich für Menschen (vgl. Abbildung 81). Auch hier wurde die Möglichkeit, den Bach auf der Spielplatzfläche zugänglich zu gestalten, nicht genutzt.

Abbildung 81 Boppard: Eingeengter Verlauf des Bruder-Michels-Bachs zwischen Häusern nach dem Spielplatz, kein Zugang (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020)

2. Retention von Wasser in Boppard

Die Retention von Wasser ist in Boppard möglicherweise kritisch, müsste aber nochmals näher betrachtet werden. Vor allem am Bruder-Michels-Bach und am Mittelbach befinden sich Flächen, bei denen die Bodenerosionsgefährdung hoch bis sehr hoch ist (vgl. Abbildung 79). In den Burdenbach wird das Regenwasser der angrenzenden versiegelten Flächen bzw. Grundstücke eingeleitet (vgl. Abbildung 82). Am Bruder-Michels-Bach liegt ein kleiner See, der möglicherweise über mögliche Einstauräume Potenzial für Wasserrückhalt bieten kann. Ansonsten wurden keine Mulden oder Rinnen identifiziert, die Wasser zurückhalten könnten. Der Bewuchs mit Wald in den oberen Hanglagen der kleinen Fließgewässer kann zur Retention von Wasser beitragen. Die Analyse der Retention von Wasser sollte nochmals für die Einzugsgebiete der Fließgewässer systematisch durchgeführt werden, damit die Landnutzung, die Hangneigung und auch die bebauten Flächen berücksichtigt werden können.



Abbildung 82 Boppard, Burdenbach als Rinne neben Gebäuden, (Quelle: Hochschule Koblenz/Kaspar 2020)

3. Von Überschwemmungen betroffene Infrastruktur in Boppard

Bei Hochwasser des Rheins werden in Boppard die ufernahen Ortslagen überschwemmt (vgl. Hochwassergefahrenkarte RLP, Abbildung 79). Bundesstraßen und Bahnstrecken sind laut dieser Karte nicht gefährdet. Die Gebäude in den Überschwemmungslagen sind an Hochwasser angepasst ausgeführt, teilweise mit erhöhten Eingängen. Die betroffene Infrastruktur ist zum Teil so gestaltet worden, dass wenig Abflusshindernisse bestehen und Material nicht weggeschwemmt wird. Außerdem kann nach den Ereignissen infolge teilweise hoher Versiegelungen der Flächen einfach gereinigt werden.

Bei Starkregenereignissen besteht die Gefahr, dass die Gewässer in vermauerten Abschnitten oder vor Verrohrungen über die „Ufer“ treten und Schäden verursachen. Es kann außerdem zu Wasser-Erosion an den Hängen kommen. Bei Starkregen werden in Boppard vermutlich die Ortslagen überschwemmt, die an den Gewässern oder an den Einmündungen in verrohrte Abschnitte liegen. Diese Erosionsflächen können die Abflussspitzen verstärken.



Abbildung 83 Boppard, Mühltalbach, vermauerte Ufer, kein Zugang, enger Brückendurchlass. (Quelle: Hochschule Koblenz/Kaspar 2020)

Risiko von Sturzfluten

Das Risiko von Sturzfluten in Boppard ist vermutlich hoch infolge der teilweise stark veränderten Gewässerstruktur und der Flächen mit hoher Bodenerosionsgefährdung. Zur Unterstützung der Kommunen hat das Land Rheinland-Pfalz Fließwegekarten erstellt, die zur Ermittlung der Gefahren und Risiken durch Starkregen genutzt werden können (IBH & MUEEF RLP, 2019). In

Hochwasservorsorgekonzepten werden diese Karten genutzt, um daraus sowie aus Ortsbegehungen eine Risikobewertung zu erstellen. Für diese Studie standen die Fließwegekarten nicht zur Verfügung. Für Boppard werden sie in das Hochwasservorsorgekonzept einfließen.

4. Sensibilisierung der Bevölkerung in Boppard

Die Bevölkerung von Boppard ist für Rhein-Hochwasser durch im Ort vorhandene Hochwassermarken zum Teil sensibilisiert. Der Bopparder Rhein-Pegel mit digitaler Online-Information ist für die Bevölkerung gedacht, informiert allerdings nur über den aktuellen Wasserstand und Abfluss und nicht über mögliche Hoch- und Niedrigwasserstände. Die Sensibilisierung zu den Risiken von Starkregen und Sturzfluten ist geplant, da Boppard jetzt auch ein Hochwasservorsorgekonzept erstellen wird (IBH 2020). Es gibt bisher keine Sensibilisierung zu den Risiken von Hitze, Trockenheit oder Niedrigwasser.

Eine Sensibilisierung durch das Land RLP erfolgt über Hochwassergefahren- und -risikokarten für den Rhein. Außerdem werden Leitfäden zum Umgang mit Starkregen bereitgestellt (vgl. Kapitel 4.2).

5. Zugang zu Wasser zur Kühlung in Boppard

In Boppard ist kaum Zugang zu Wasser zur Kühlung gegeben. Die kleinen Fließgewässer sind in der unteren, eher heißeren Ortslage nicht erreichbar. Weder Wasserspielflächen noch Wasserspender sind vorhanden.

Betroffenheit von St. Goar

St. Goar ist von Starkregen betroffen gewesen, dabei ist die Infrastruktur teilweise in Mitleidenschaft gezogen worden. Die Retention von Wasser sowie die Gewässerstrukturgüte sind in vielen Bereichen kritisch bzw. nicht ausreichend, um das Starkregenrisiko und die Risiken von Wassererosion zu begrenzen. Es gibt aber umgekehrt auch Gewässerabschnitte, die unverändert oder weitgehend natürlich sind. Die Bevölkerung ist für Hochwasser teilweise bereits sensibilisiert, zu Themen wie Starkregen oder Hitze fehlt eine entsprechende Sensibilisierung. Die Infrastruktur ist vor allem an Rhein-Hochwasser weitgehend angepasst. Durch das anstehende Hochwasservorsorgekonzept ist davon auszugehen, dass die Bauvorsorge bezogen auf Starkregen verstärkt und die Sensibilisierung der Bevölkerung ausgeweitet wird. Der Zugang zu Wasser zur Kühlung ist durch die Treppenanlagen am Rhein und das Freibad besser als in anderen Orten am Rhein. Im folgenden Text werden die einzelnen Kriterien genauer erläutert.

Tabelle 11 Mögliche Betroffenheit von St. Goar bezogen auf Klimawandelfolgen im Handlungsfeld Wasser und Gewässer

Kriterium	Bewertung
1. Gewässerstrukturgüte	☹️/😊
2. Retention von Wasser	☹️
3. Von Überschwemmungen betroffene Infrastruktur	😊
4. Sensibilisierung der Bevölkerung	😊
5. Zugang zu Wasser zur Kühlung	😄

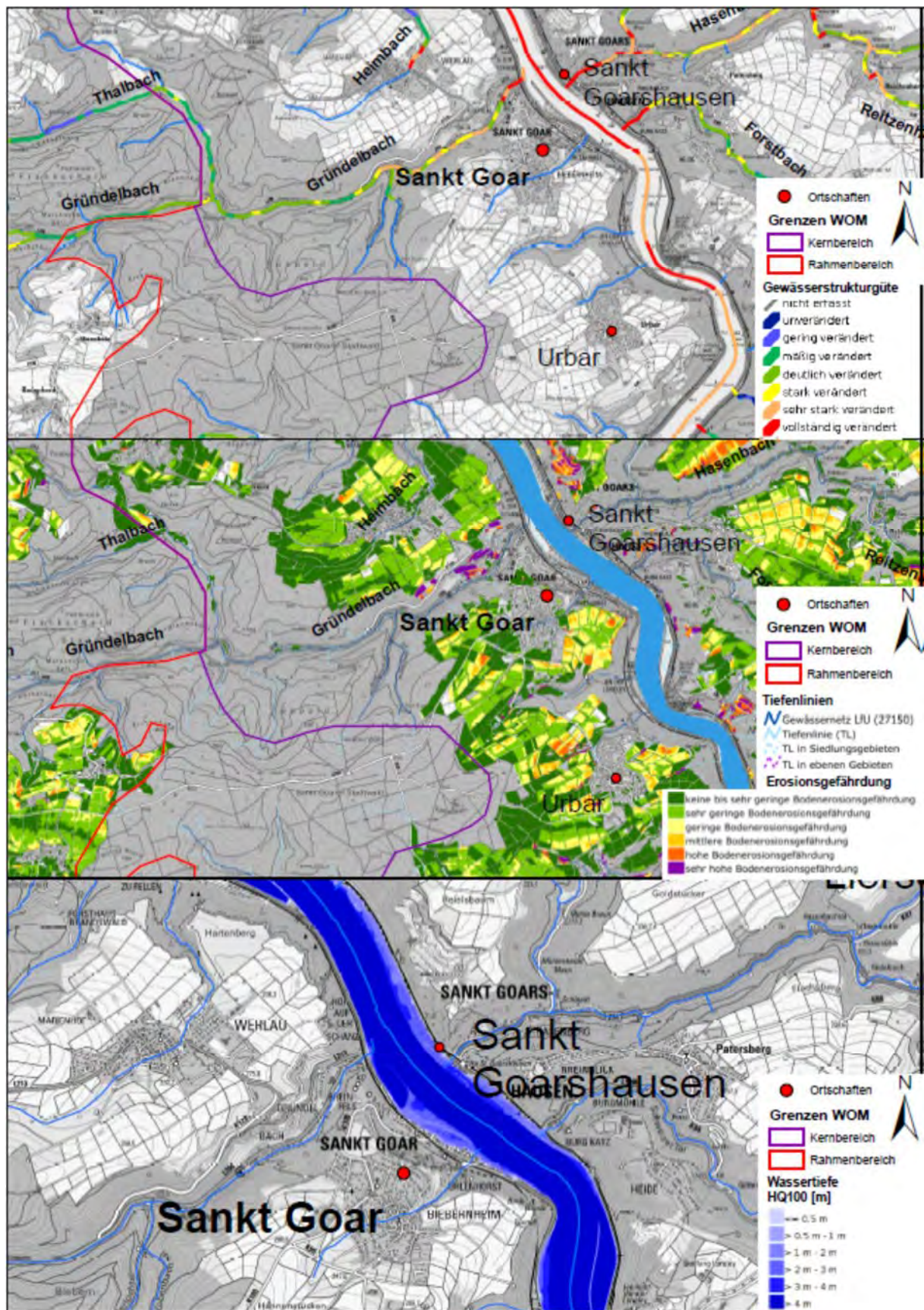


Abbildung 84 Gewässerkarte von St. Goar (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020, Datengrundlagen: LfU RLP, 2018 (Gewässerstrukturgüte), LGB RLP, o.J., 2017 (Tiefenlinien und Erosionsgefährdung), MUEEF RLP, o.J.–b (Wassertiefe))

1. Gewässerstrukturgüte in St. Goar

Wie in Boppard sind auch in St. Goar einige Fließgewässer vorhanden, die in den Rhein münden. Die Gewässerstrukturgüte wurde nicht für alle Gewässer des Ortes bewertet. Bei den bewerteten Gewässern ist die Strukturgüte im Ort jeweils stark bis vollständig verändert. Die Fließgewässer in St. Goar sind (von Norden nach Süden): Heimbach; Karbacher Bach und Thalbach sowie Rohtebrunnenbach, Strittelbach fließen zusammen zum Gründelbach; Lohbach, Seelenbach, Galgenbach (Strukturgüte nicht bewertet) (Abbildung 84). In den oberen Hanglagen ist die Strukturgüte mäßig bis stark verändert. Vereinzelt finden sich gering veränderte Abschnitte- z.B. beim Thalbach oder Heimbach in St. Goar.



Abbildung 85 St. Goar, Abfluss des Lohbachs unter dem Rheinbalkon (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020), Einlauf des Lohbachs in die Verrohrung, Rechen, der zu Verkläuerung neigt, Einlaufquerschnitt evtl. zu gering dimensioniert (Quelle: Hochschule Koblenz/Gelhard 2020)

Alle Gewässer weisen längere verrohrte Abschnitte auf, z.B. der Lohbach im Ortsteil Biebrnheim und in St. Goar. Vor allem die Mündungsbereiche der Gewässer sind meist nicht zu erkennen, da sie verrohrt unterhalb der Uferverbauung in den Rhein münden (vgl. Abbildung 85). Teilweise sind die Gewässer offen, aber fließen dann stark eingengt zwischen Gebäuden ohne Ufer. Die Abflussquerschnitte der stark veränderten Gewässer könnten zur Aufnahme hoher Wasserabflüsse zu klein sein. Einläufe können sich mit Schwemmgut zusetzen (vgl. Abbildung 85 rechts). Im Ortsteil Biebrnheim finden sich keine Rückhaltemöglichkeiten im Verlauf des Gewässers in Richtung St. Goar. Ohne Rückhaltemöglichkeiten sind die Abflussspitzen höher und damit die Überschwemmungsgefahr infolge einer Sturzflut größer. Kürzere Abschnitte wie der des Lohbachs zwischen dem Ortsteil Biebrnheim und dem an den Rhein angrenzenden St. Goar wirken natürlicher, wobei bisher keine Bewertung der Strukturgüte vorliegt (vgl. Abbildung 86). Größere Umbaumaßnahmen könnten genutzt werden, um Gewässer offen zu legen. Beim Rheinbalkon ist das nicht erfolgt: dort verläuft der Lohbach unterhalb des neuen Bauwerks weiterhin in einer Verrohrung in den Rhein.

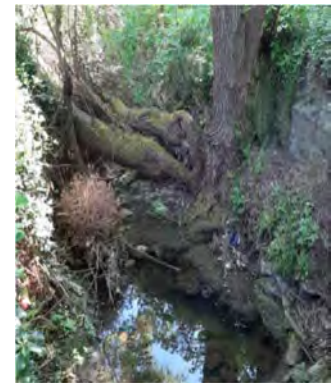


Abbildung 86 St. Goar, Natürlicher Gewässerabschnitt des Lohbachs zwischen dem Ortsteil Biebrnheim und dem ufernahen St. Goar (Quelle: Gelhard 2020)

2. Retention von Wasser in St. Goar

Das Gelände von St. Goar weist einige Flächenanteile auf, die eine mittlere bis hohe oder sogar sehr hohe Bodenerosionsgefährdung aufweisen (vgl. Abbildung 84). Das lässt umgekehrt auf eine schlechte Retention von Wasser schließen. Bei Starkregen und Sturzfluten kann es so zum Verlust von Boden und zu Schäden durch hohe Sedimentfrachten kommen. Der Gründelbach

verläuft beispielsweise über eine lange Strecke durch Wald, man kann also annehmen, dass hier die Retention von Wasser noch gut ist. Im Gegensatz dazu verläuft der Lohbach durch Felder und durch eine Ortslage. Nur zwischen dem Ortsteil Biebernheim und der rheinnahen Ortslage von St. Goar fließt er durch ein Waldstück, was Möglichkeiten des Wasserrückhalts bietet. Der Seelen- und der Galgenbach weisen ebenfalls größere Flächenanteile mit mittlerer bis hoher Bodenerosionsgefahr im Einzugsgebiet auf (Abbildung 84). Die Retention von Wasser erscheint nach Analyse der vorliegenden Informationen kritisch. Allerdings sollte auch hier die Retention von Wasser nochmals für die Einzugsgebiete der Fließgewässer systematisch analysiert werden, damit die Landnutzung, die Hangneigung und auch die bebauten Flächen berücksichtigt werden können.

3. Von Überschwemmungen betroffene Infrastruktur in St. Goar

Wie bei Boppard werden auch in St. Goar bei Hochwasser des Rheins die ufernahen Ortslagen überschwemmt (Abbildung 84). Die Gebäude dieser Ortslagen sind an Hochwasser angepasst ausgeführt, teilweise mit erhöhten Eingängen. Die betroffene Infrastruktur (Uferanlagen, Straßen und Plätze) ist teilweise so ausgeführt, dass wenig Abflusshindernisse bestehen und Material nicht weggeschwemmt wird. Außerdem kann nach den Ereignissen infolge teilweise hoher Versiegelungen der Flächen einfach gereinigt werden.

Im Juli 2017 kam es in St. Goar zu einem Starkregenereignis im Einzugsgebiets des Lohbachs. Dies führte zu Schäden z.B. in der Heerstraße, wo der Wasserstand bis 50cm erreichte. Ursächlich könnten dafür Hangabflüsse sein, die sich auf der Straße Schlossberg konzentrieren und dann in die Heerstraße strömen. (Bretz et al., 2017)



Abbildung 87 Die Heerstraße in St. Goar während der Sturzflut 2017 (Quelle: Bretz et al., 2017)

Risiko durch Sturzfluten

Die Risiken durch Sturzfluten sind in St. Goar infolge der steilen Hänge, großen Flächenanteile mit starker Wassererosion und der häufig schlechten Gewässerstrukturgüte als hoch anzusehen. Im Juli 2017 trat ein Sturzflutereignis auf, dass die Heerstraße in St. Goar betraf (vgl. Abbildung 87). Wie bei Boppard erwähnt, kann eine genauere Risikoanalyse und -bewertung auf Basis von Fließwegekarten erfolgen, die für diese Studie nicht zur Verfügung standen. Dabei wäre zu prüfen, inwieweit die Hangflächen, die Wasser z.T. nicht zurückhalten, zu den Sturzflutrisiken beitragen und inwieweit die schlechte Strukturgüte der Fließgewässer dieses Risiko erhöht. Auch die Lage und Erreichbarkeit von kritischer Infrastruktur ist zu prüfen wie z.B. das Gerätehaus der Feuerwehr.

4. Sensibilisierung der Bevölkerung in St. Goar

Zu den Rhein-Hochwasserständen wurden keine Hochwassermarken im Ort gefunden. In der Einkaufsstraße „Heerstraße“ befindet sich eine Pegellatte, an der allerdings keine vergangenen Hochwasserstände eingezeichnet sind. Eine Sensibilisierung der Bevölkerung zu den Folgen des Klimawandels wie Hochwasser, Starkregen oder Trockenheit und Hitze im Ort selbst ist nicht bekannt. Laut IBH (2020) plant St. Goar ein Hochwasservorsorgekonzept zu erstellen, ein Prozess, der meist Bürgerdialoge einschließt. Wie bereits erwähnt, erfolgt eine Sensibilisierung durch das Land RLP über Hochwassergefahren- und -risikokarten für den Rhein sowie Leitfäden zum Umgang mit Starkregen (vgl. Kapitel 4.2).

5. Zugang zu Wasser zur Kühlung in St. Goar



Abbildung 88 St. Goar, Zugang ans Wasser, sonnige Treppenstufen hinter dem Rheinbalkon (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020)



Abbildung 89 St. Goar, Nähe Rathaus: Neu angelegtes Wasserbecken (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020)

In St. Goar ist der Zugang zu Wasser durch die neuen Uferanlagen teilweise besser gelöst als in den anderen Orten: An zwei Stellen im Ort gibt es Treppenanlagen zum Rhein hinunter (Abbildung 88). Auf dem Rathausplatz gibt es eine Wasserfläche, die für Kinder zugänglich sein sollte, allerdings zum Zeitpunkt der Besichtigung leider kein Wasser führte (Abbildung 89). Es gibt außerdem das Freibad „Rheingoldbad“ in St. Goar-Werlau in der Nähe des Gründelbachs. Trinkwasserspender sind nicht vorhanden.

Betroffenheit von St. Goarshausen

St. Goarshausen ist wie viele andere Orte des Mittelrheintals von Starkregen bereits betroffen gewesen, mit großen Schäden beispielsweise im Jahr 2018 im Ortsteil Wellmich. Hochwasser führt wie in den anderen Orten immer wieder zu Überschwemmungen der rheinnahen Infrastruktur. Die Gewässer sind auch hier im engen Tal stark verändert oder unterirdisch geführt. Weiter oben finden sich noch gering oder mäßig veränderte Abschnitte. Die Wasserretention ist auch hier ausbaufähig - teilweise liegen hohe Bodenerosionsgefährdungen in den steilen

Hängen oder auf Ackerflächen vor. Die Verbandsgemeinde Loreley hat ein Hochwasservorsorgekonzept erstellt und in dem Zuge die Bevölkerung zu Starkregen sensibilisiert, weiterhin sind Hochwassertafeln am Rhein im Gespräch. Der Zugang zu Wasser in St. Goar ist kaum möglich – weder der Rhein noch die Fließgewässer sind in der unteren Ortslage erreichbar. Brunnen und Wasserspiele sind fast nicht vorhanden.

Tabelle 12 Mögliche Betroffenheit von St. Goarshausen bezogen auf Klimawandelfolgen im Handlungsfeld Wasser und Gewässer

Kriterium	Bewertung
1. Gewässerstrukturgüte	
2. Retention von Wasser	
3. Von Überschwemmungen betroffene Infrastruktur	
4. Sensibilisierung der Bevölkerung	
5. Zugang zu Wasser zur Kühlung	

1. Gewässerstrukturgüte in St. Goarshausen

Die Fließgewässer in St. Goarshausen sind (von Norden nach Süden): Wellmicher Bach, Himminghoferbach, Feuerbach, Auellerbach, Reitzenhainerbach, Hasenbach, Forstbach. Teilweise vereinigen sich Gewässer, bevor sie in den Rhein münden (vgl. Abbildung 90 auf Seite 102).

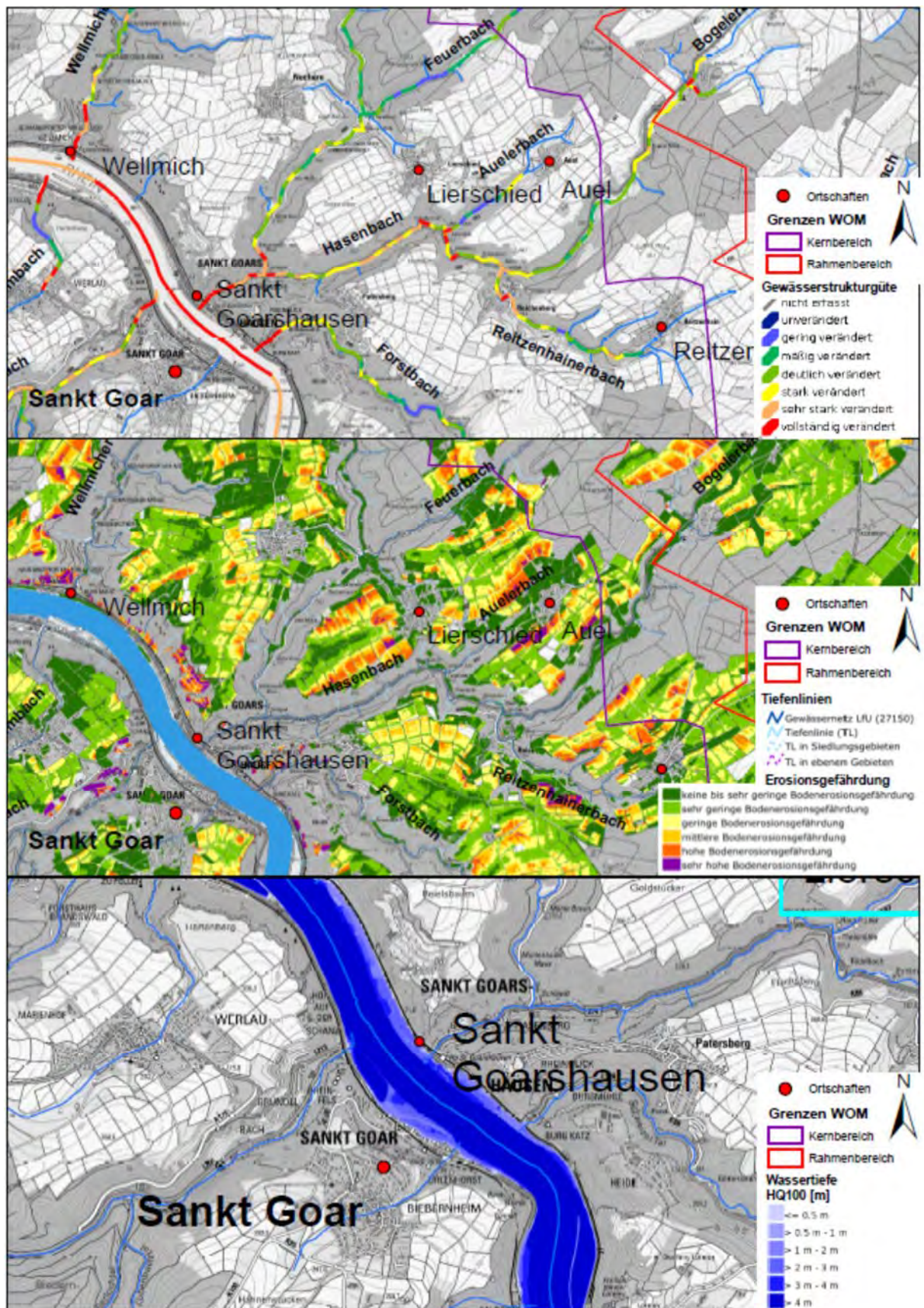


Abbildung 90 Gewässer in St. Goarshausen (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020, Datengrundlagen: LfU RLP, 2018 (Gewässerstrukturgüte), LGB RLP, o.J., 2017 (Tiefenlinien und Erosionsgefährdung), MUEEF RLP, o.J.–b (Wassertiefe))



Abbildung 91 St. Goarshausen, Hasenbach: Einlauf in eine Verrohrung, Weingut Leonhardt, Kellerei Loreley; Auslauf des Hasenbachs aus Verrohrung, kein Zugang, vermauerte Ufer (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020)

Wie in den anderen beiden Orten sind auch in St. Goarshausen die Gewässer des Ortes vielfach verrohrt, d.h. die Strukturgüte ist in der Ortslage und mit zunehmender Nähe zum Rhein schlecht (vgl. Abbildung 90). In den Hängen sind die Gewässer noch offen, aber schlecht erreichbar, da sie häufig auf Privatgrundstücken verlaufen. Der Hasenbach mündet beispielsweise oberhalb des Ortes ab dem Weingut Leonhardt (Loreley Kellerei) in eine Verrohrung, nachdem er auf Privatgelände verlief. In den Rhein mündet er über ein betoniertes Auslaufbauwerk, das keinen Zugang ermöglicht (vgl. Abbildung 91). Beim Wellmicher Bach ist es ähnlich (vgl. Abbildung 92). Vereinzelt finden sich gering veränderte Abschnitte- z.B. beim Feuerbach oder Forstbach.



Abbildung 92 St. Goarshausen, Auslauf des Forstbachs aus Verrohrung (Hochschule Koblenz/Kimmel 2020); Auslauf des Wellmicher Bachs (Quelle: Hochschule Koblenz/Oblinger, Wintgens, Zerwas 2020)

2. Retention von Wasser in St. Goarshausen

In den teilweise sehr steilen Hanglagen in den Einzugsgebieten der Fließgewässer finden sich in St. Goarshausen viele Flächen mit hoher Bodenerosionsgefährdung (vgl. Abbildung 90). Die Retentionsleistung für Wasser ist auf diesen Flächen eher als gering anzusetzen. Man erkennt auch auf dem Luftbild, dass zwar in den Tälern Wald vorhanden ist, auf den Kuppen aber viele landwirtschaftlich genutzte Flächen liegen, die potenziell zu hoher Abflussbildung beitragen können (vgl. Abbildung 93). Mulden oder vertiefte Flächen sind mit den vorliegenden Karten nicht erkennbar. Besonders der Hasenbach und sein Zufluss Feuerbach könnten bei Starkregen hohe Abflüsse aufweisen. Der Forstbach hat zwar weniger Flächen mit Bodenerosionsgefahr in seinem Einzugsgebiet, aber auch hier könnten zeitweise hohe Abflüsse auftreten. Am Well-

micher Bach gibt es ein Rückhaltebecken, das sehr technisch ausgeführt ist und dessen Leistungsfähigkeit vermutlich für heutige Starkregenereignisse nicht ausreicht. Die Retention von Wasser erscheint nach Analyse der vorliegenden Informationen kritisch. Wie in den anderen beiden Orten müsste die Retention von Wasser nochmals vertieft analysiert werden vor einer abschließenden Bewertung.

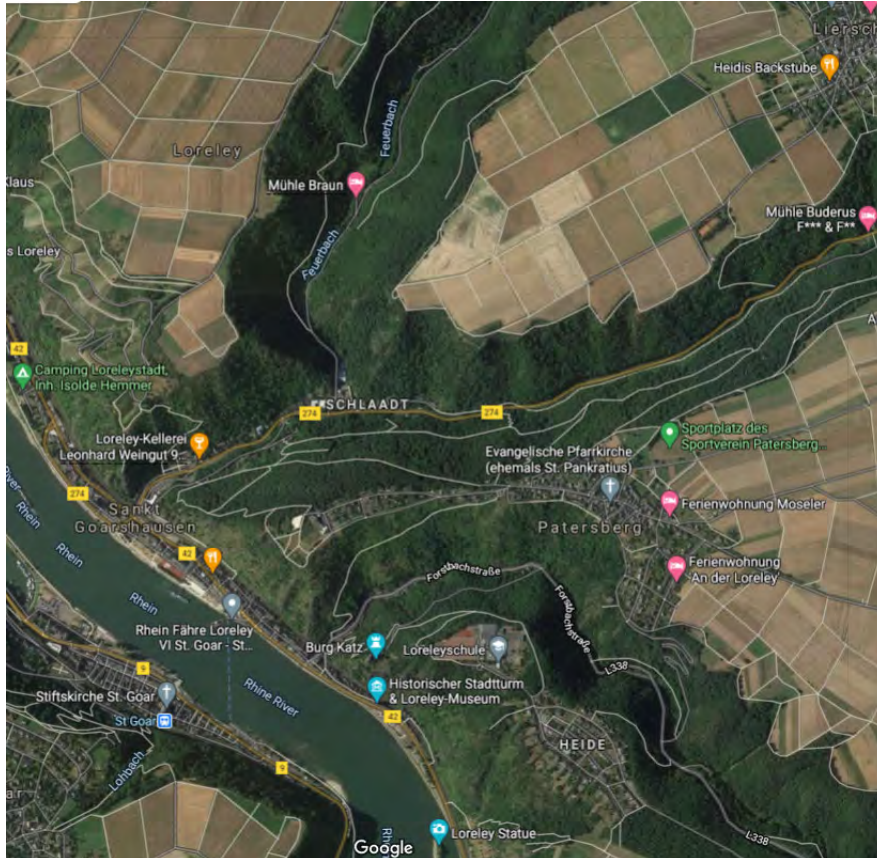


Abbildung 93 St. Goarshausen: Luftbild, Feuerbach und Hasenbach sowie Forstbach
(Quelle: Google, o.J. © 2020 GeoBasis-DE/BKG, Geo Content, Maxar Technologies,
Kartendaten: © 2020 GeoBasis-DE/BKG (© 2009))

3. Von Überschwemmungen betroffene Infrastruktur in St. Goarshausen

Die Überschwemmungsgebiete bei Rhein-Hochwasser betreffen die ufernahen Ortslagen. Bundesstraßen und Bahnstrecken können bei hohen Wasserständen ebenfalls überschwemmt werden (vgl. Abbildung 90: HQ100 Rhein). In St. Goarshausen beispielsweise wird die B42 überschwemmt bei einem Wasserstand am Pegel Kaub von 6,10m (Wellmicher Straße) bzw. 6,40m (Fähranleger). Die B 274 wird an der Bahnunterführung ab einem Wasserstand von 5,20m überschwemmt, die Burgstraße ab 6,00m und die Unterführung in Wellmich ebenso (Böttcher, 2020). Damit kommt es vermutlich ca. alle 10 Jahre oder häufiger zu diesen Überschwemmungen, denn ein Wasserstand von 7,19m am Pegel Kaub kommt statistisch alle 10-15 Jahre vor (LAWA, 2014).

Risiko von Sturzfluten

St. Goarshausen war bereits im Jahr 2018 von einer Sturzflut im Einzugsgebiet des Wellmicher Bachs betroffen. Unter anderem war ein Einlauf in eine Bachverrohrung mit Schwemmgut zugesetzt. Es kam zu Überschwemmungen und Schäden, u.a. einem weggebrochenen Tennisplatz und einer abgebrochenen Straße (Böttcher, 2020).

Aus der Bewertung von Gewässerstrukturgüte und der Retention von Wasser lässt sich schließen, dass der Ort von Sturzfluten potenziell gefährdet ist. Die Gewässer haben innerorts eine geringe Gewässerstrukturgüte und sind baulich stark eingeengt. Auch ist die Retention von Wasser in Teilflächen als kritisch anzusetzen. Beides kann die Gefahren und Risiken von Sturzfluten verstärken. Eine genauere Risikoanalyse und -bewertung ist im Rahmen der Erstellung des Hochwasservorsorgekonzepts für die Verbandsgemeinde Loreley durch Dr.-Ing. Roland Böttcher, Urbar, erstellt worden.

4. Sensibilisierung der Bevölkerung in St. Goarshausen

Die Verbandsgemeinde Loreley hat im Jahr 2016 ein Hochwasservorsorgekonzept für alle Ortsgemeinden beauftragt. Auch St. Goarshausen wurde darin untersucht. Über die Untersuchungen werden die Sensibilisierungsmaßnahmen zu Hochwasser und Starkregenrisiken als noch nicht ausreichend eingestuft. Zu den historischen Rhein-Hochwasserständen wurden z.B. keine Hochwassermarken im Ort gefunden. Als mögliche Maßnahme wird die Aufstellung von Informationstafeln am Rhein vorgeschlagen, die die Hochwassermarken enthalten.

5. Wasser zur Kühlung in St. Goarshausen



Wasser als Erholungsraum und zur Kühlung ist in St. Goarshausen schwer zugänglich und erlebbar, mit Ausnahme des Blicks auf den Rhein vom Ufer aus. Wasserspiele sind in Form von Pumpen an der Rheinpromenade erlebbar. Brunnen und Wasserspender sind nicht vorhanden.

Abbildung 94 St. Goarshausen: Pumpen als „Wasserspiele“, kein Trinkwasser (Hochschule Koblenz/Kimmel 2020)

5.5 BETROFFENHEIT UNTER DEM ASPEKT DER KALTLUFTSICHERUNG

Betroffenheit der Kommunen im Teilraum 1 Boppard

Berechnung der Kaltluftbahnen und -wirkbereiche

Die Kaltluftbahnen wurden mit Hilfe von ESRI-ArcGIS (10.6.1) berechnet. Als Grundlage dienten DGM 10 Karten des Mittelrheintals (LVermGeoRLP, 2020a). Die produzierten Abflussvolumen wurden unter Gewichtung der jeweiligen Landnutzungen berechnet, siehe Tabelle 1 in Kapitel 4. Hierbei handelt es sich um Literaturwerte für die Einschätzung und Bewertung der Kaltluftentstehung und -transport, die tatsächlichen Abflussvolumen könnten abweichen. Die theoretischen Kaltluftabflusswerte wurden in stark und schwach unterteilt. Starker Frischluftabfluss bedeutet mehr als 15.000 m³/s, schwach maximal 15.000 m³/s. Diese Produktion ist nicht gleichzusetzen mit dem tatsächlichen Abfluss, hierfür wären detailliertere aber aufwendige 3D-Modellierungen notwendig.

Kaltluftversorgung Boppard

Unter Abbildung 95 sind die Kaltluftschneisen für die Umgebung um Boppard und Buchholz dargestellt. Die schwarzen Linien stellen hierbei einen starken Abfluss dar und die roten Linien einen schwachen. Anhand der topografischen Karte wird deutlich, dass die Abflussbahnen, wie erwartet, überwiegend entlang der Täler in Richtung Rhein verlaufen. Die vorherrschende Landnutzung Wald sorgt, wie bereits in Kapitel 4.4 beschrieben, für ausreichende Kaltluftproduktion. Acker und Wald weisen zwar pro m² die vergleichbare Menge an Kaltluftproduktion auf, allerdings nimmt der Wald im Betrachtungsgebiet deutlich größere Flächen in Anspruch, sodass dessen Einfluss insgesamt vorherrscht.

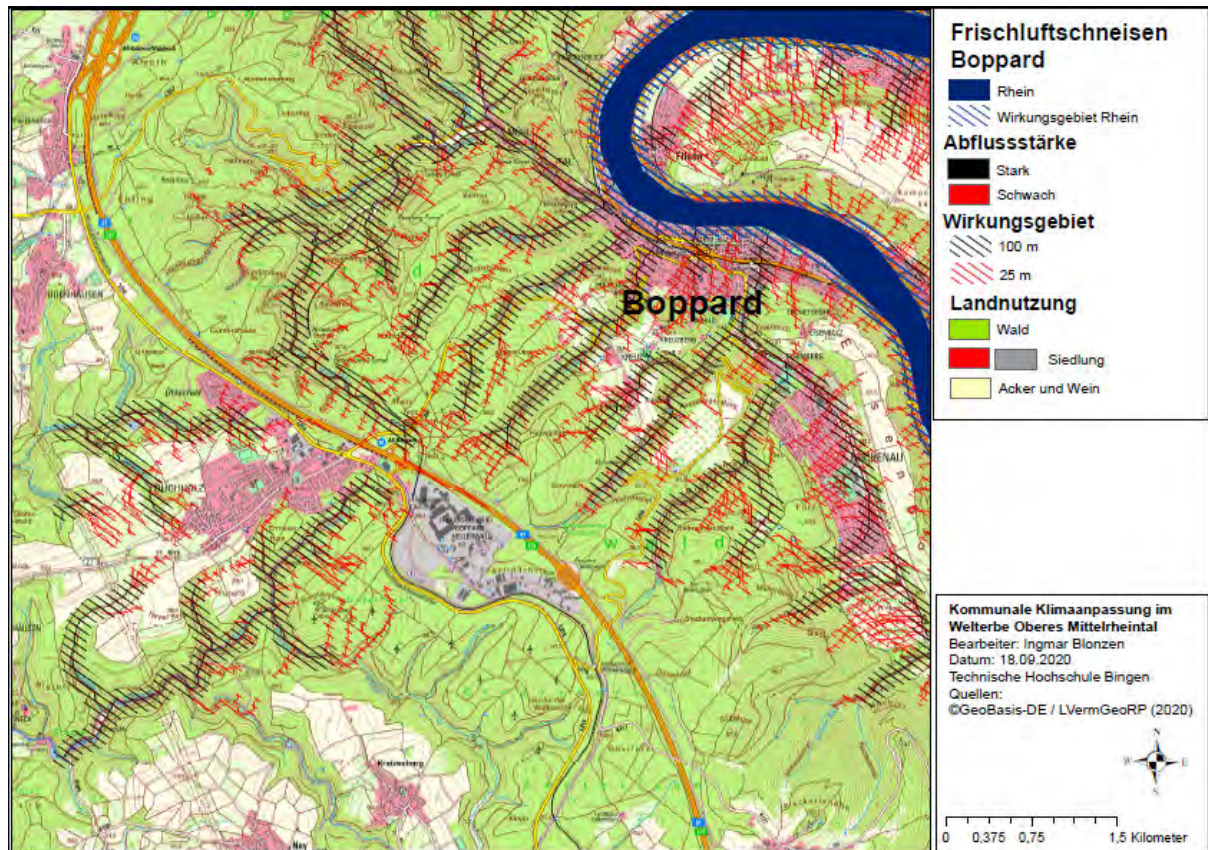


Abbildung 95: Berechnete Kaltluftschneisen für Boppard und Umgebung (Quelle der Topographie- und Landnutzungsdaten: LVermGeoRLP, 2020b)

Die Autobahn A61 stellt im Bereich Boppard eine Art „Kaltluftscheide“ zwischen den Richtung Rhein und den Richtung Mosel verlaufenden Kaltluftbahnen dar. Grund ist hierbei aber die topografische Situation, da die Autobahn auf ca. 400 Höhenmetern liegt.

In Abbildung 96 sind diese Kaltluftschneisen genauer für die Stadt Boppard dargestellt. Unter der Annahme der Wirkungsbereiche von 25 m für schwache und 100 m für starke Abflussbahnen ist die Stadt überwiegend gut mit Kaltluft versorgt. Einen besonders breiten Wirkungsbereich besitzt der Rhein (100 m Wirkungsbereich), insbesondere für die ans Ufer grenzenden Flächen auf beiden Seiten. Drei exemplarische Bereiche (gelb umrundet) mit sehr schlechter Kaltluftversorgung sind jedoch in der dicht bebauten Innenstadt mit Fußgängerzone sowie im bebauten Hangbereich oberhalb der Innenstadt deutlich sichtbar. Hier ist eine hohe Hitzebelastung sehr wahrscheinlich und entsprechende Anpassungsmaßnahmen dringend notwendig.

Es ist zudem empfehlenswert die Wirkungsgebiete der Kaltluftschneisen mit einem 3D-Modell (s. Kapitel 4) zu überprüfen.

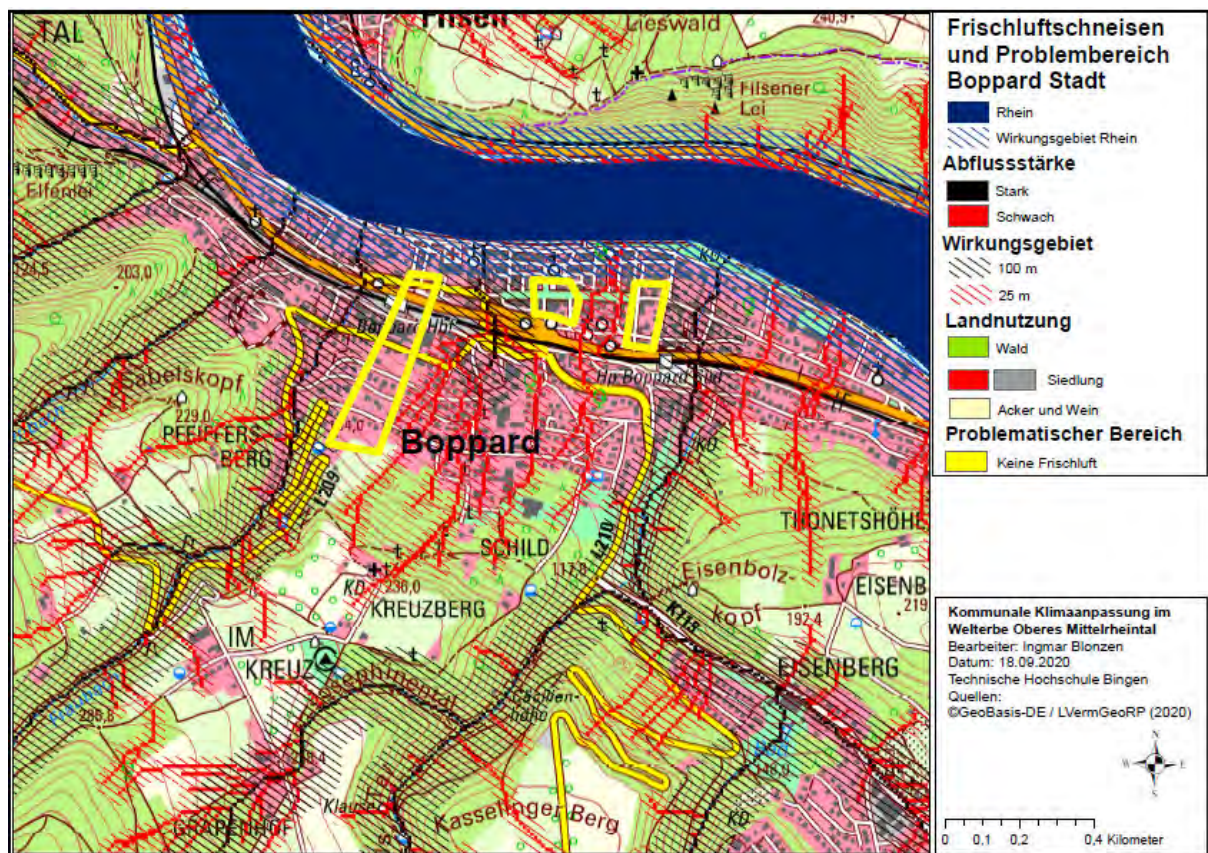


Abbildung 96: Berechnete Kaltluftschneisen für Boppard Stadt (Quelle der Topographie- und Landnutzungsdaten: LVermGeoRLP, 2020b)

Messergebnisse

Am 14.09.2020 wurde in Boppard an verschiedenen Messstandorten (Abbildung 97) überprüft, ob die oben genannten Problemzonen und Kaltluftwirkungsbereiche zutreffen.

Der westliche Problembereich wurde über ein Transekt von der Mittelterrasse zum Rhein mit Standorten am Kreuzberg, an der Andreas-Schüller-Straße sowie am Bahnhof gemessen. Ein weiterer Messstandort lag im Bereich einer starken Kaltluftbahn im Mühlthal.

Mit Hilfe von vier automatischen mobilen Wetterstationen wurden von 08:45 (Bahnhof), 9:00 (Mühlthal); 9:30 (Andreas Schüller Straße) und 10:00 Uhr (Kreuzberg) bis 18:00 Uhr die Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Temperatur und Globalstrahlung gemessen. Um die Transekte zu vervollständigen und erweitern, wurden mit einem Aspirations-Psychrometer Handmessungen der Temperatur und relativen Luftfeuchte um die Messtellen und an weiteren Stellen entlang der Transekte bis zum Rhein sowie an anderen hitzebelasteten Stellen in Boppard (Abbildung 97) durchgeführt. Dabei fanden auch Messungen um den Marktplatz, einem weiteren Problembereich in Boppard, statt. Die Messergebnisse wurden anschließend mit den Daten der Agrarmeteorologischen Wetterstation (Bopparder Hamm, 120 m ü. NN) verglichen.

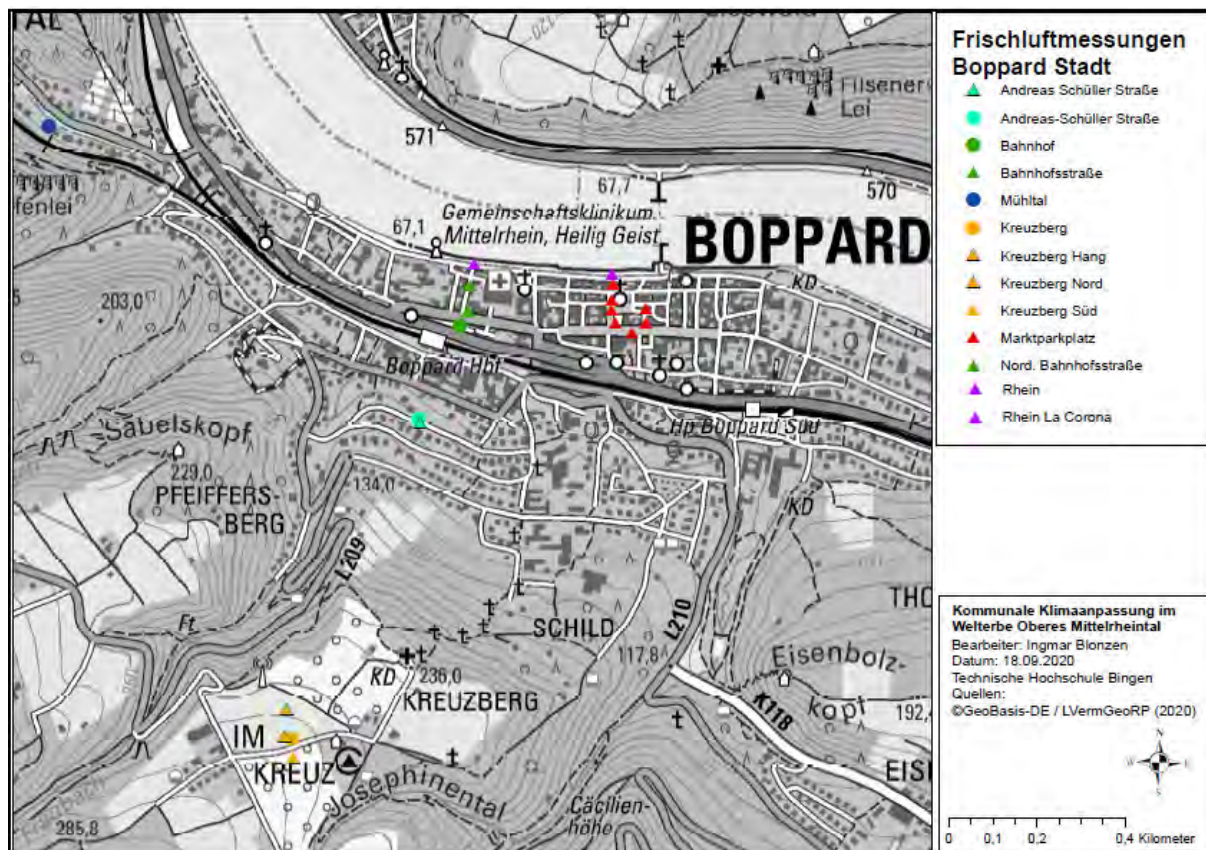


Abbildung 97: Standorte mobile Wetterstation und Handmessung vom 14.09.2020 in Boppard

In Abbildung 98 ist der Temperaturverlauf (in °C) aller vier automatischen Wetterstationen und der Station der Agrarmeteorologie RLP dargestellt. Die Station „Mühltal“ (ca. 80 m ü. NN) ist im gesamten vergleichbaren Tagesverlauf mit $25,7 \pm 4^\circ\text{C}$ die kühlsste, dies liegt u.a. an den steilen, verschatteten Talhängen und der entsprechend geringen einfallenden Globalstrahlung (Abbildung 99) sowie der Kaltluftbahn, die durch das Tal zieht (Abbildung 96).

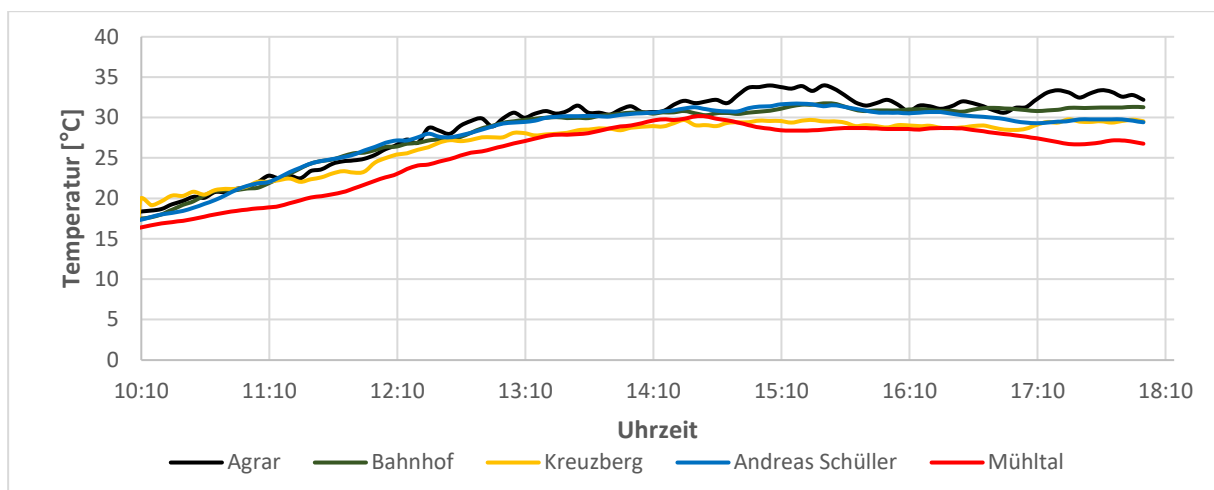


Abbildung 98: Temperaturverlauf in °C am 14.09.2020 Boppard, mit vier Wetterstationen und der Station von Agrarmeteorologie RLP

Weitere automatische Wetterstationen befinden sich in der kaltluftfreien bzw. -armen Zone vom Kreuzberg (ca. 250 m ü. NN) über Andreas-Schüller-Straße (ca. 105 m ü. NN) bis Boppard am Bahnhof (77 m ü. NN). Die Station am Kreuzberg hat am Anfang der Messung die höchsten

Temperaturen, was auf die exponierte Lage ohne Bebauung, ohne Beschattung durch Bewuchs und höchste Sonneneinstrahlung zurückzuführen ist. Im Laufe des Tages hat die höhere und exponiertere Lage mit höheren Windgeschwindigkeiten zur deutlich schwächeren Erhitzung geführt ($26,9 \pm 3,2^\circ\text{C}$), als in den anderen hitzebelasteten Zonen von Bahnhof, Andreas-Schüller-Straße und Marktplatz. Die Station am Bahnhof erreicht im vergleichbaren Tagesverlauf (10-18 Uhr) die höchsten Mitteltemperaturen von $28,2 \pm 4^\circ\text{C}$. Die im Tagesverlauf zweit wärmste Station lag an der Andreas-Schüller-Straße mit Durchschnittstemperatur von $28 \pm 3,9^\circ\text{C}$. Alle Stationen mit Ausnahme von Bahnhof und Andreas-Schüller-Straße unterscheiden sich signifikant ($\alpha=0.05$).

Das Messnetz der Agrarmeteorologischen Abteilung des Dienstleistungszentrums Ländlicher Raum, RLP (<https://www.wetter.rlp.de/>) beinhaltet auch eine Messstation in der Nähe von Boppard. Sie befindet sich im Norden ca. 2,5 km außerhalb von Boppard auf 120 m Höhe in den Weinbergen am Bopparder Hamm. Die Stationsdaten könnten theoretisch auch als Indikator für Hitzebelastung in Boppard verwendet werden. Der Vergleich mit unseren Messungen zeigte, dass aufgrund der südexponierten Lage (Boppard ist Nord-exponiert) die agrarmeteorologische Station etwas höhere Tagestemperaturwerte von durchschnittlich $29 \pm 4,5^\circ\text{C}$ als in Boppard hat. Die Unterschiede zum Bahnhof und Andreas-Schüller-Straße sind statistisch nicht signifikant. Die agrarmeteorologische Wetterstation ist demnach als guter Indikator für die Abschätzung der Hitzebelastung in der Stadtmitte (inkl. Bahnhof) verwendbar.

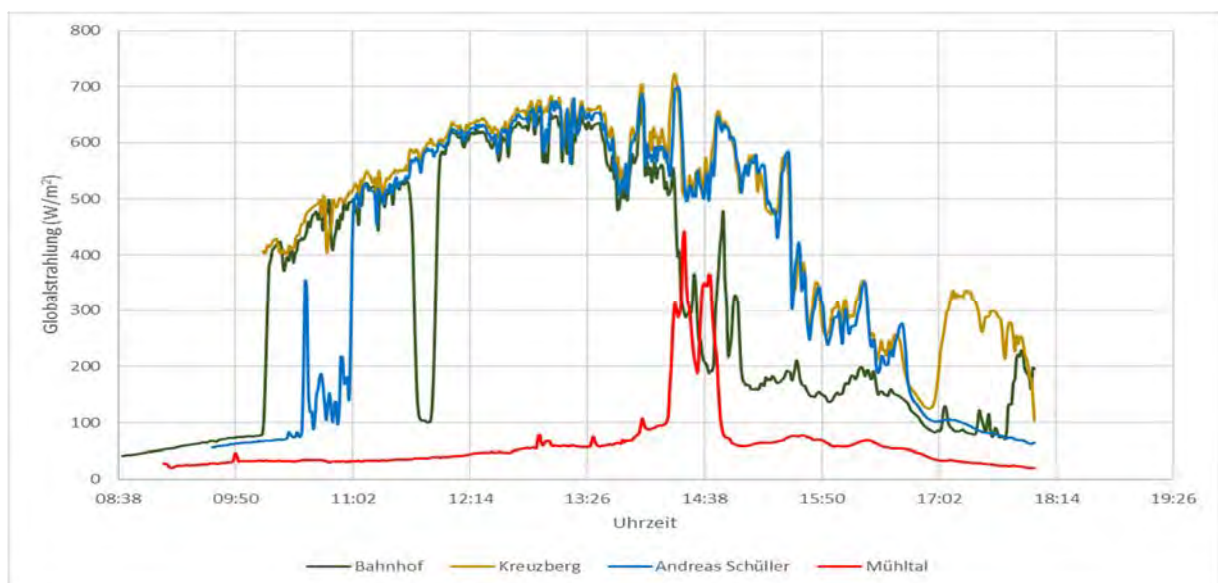


Abbildung 99: Globalstrahlung in W/m^2 am 14.09.2020 Boppard, mit vier Wetterstationen

Die Handmessungen zeigen außerdem, dass der durchschnittlich wärmste Ort innerhalb Boppard der Marktplatz ist (siehe Markierung in Abbildung 72). Dieser war im Tagesmittel 0,5 bis 1°C wärmer als der Bahnhof und damit auch vergleichbar mit der agrarmeteorologischen Station. Hier bestehen nahe den Cafés gute Möglichkeiten zur Begrünung durch Bäume als Klimaanpassungsmaßnahme, sodass der Marktplatz direkt von den kühlenden Schattenwürfen profitieren würde. Zwischen dem Rheinufer und Marktplatz wurde auch die im Tagesverlauf kälteste Stelle lokalisiert, in der Kronengasse im Bereich des Hotels zur Krone. Diese zeigte $2\text{-}3^\circ\text{C}$ niedrigere Temperaturwerte als der Marktplatz ($28,61^\circ\text{C}$). Ebenso auffällig ist, dass es in der Fußgängerzone (Oberstraße 108, Ecke Volksgasse) im Tagesverlauf $0,8\text{-}2,7^\circ\text{C}$ kühler war als am Marktplatz. Ein Grund für beide Standorte könnte die enge, verschattende Bebauung

sein, die verhindert, dass die Sonne während des gesamten Tages die Oberfläche erwärmt. Es ist daher dringend empfehlenswert, dicht bebaute Bereiche in Fußgängerzonen (insbesondere ohne Autobetrieb, um Schadstoffansammlungen zu vermeiden) aufgrund der Bedeutung für die Klimaanpassung baulich nicht zu verändern. Der Messstandort am Rhein hatte im Tagesverlauf Durchschnittstemperaturen von 26,23 °C.

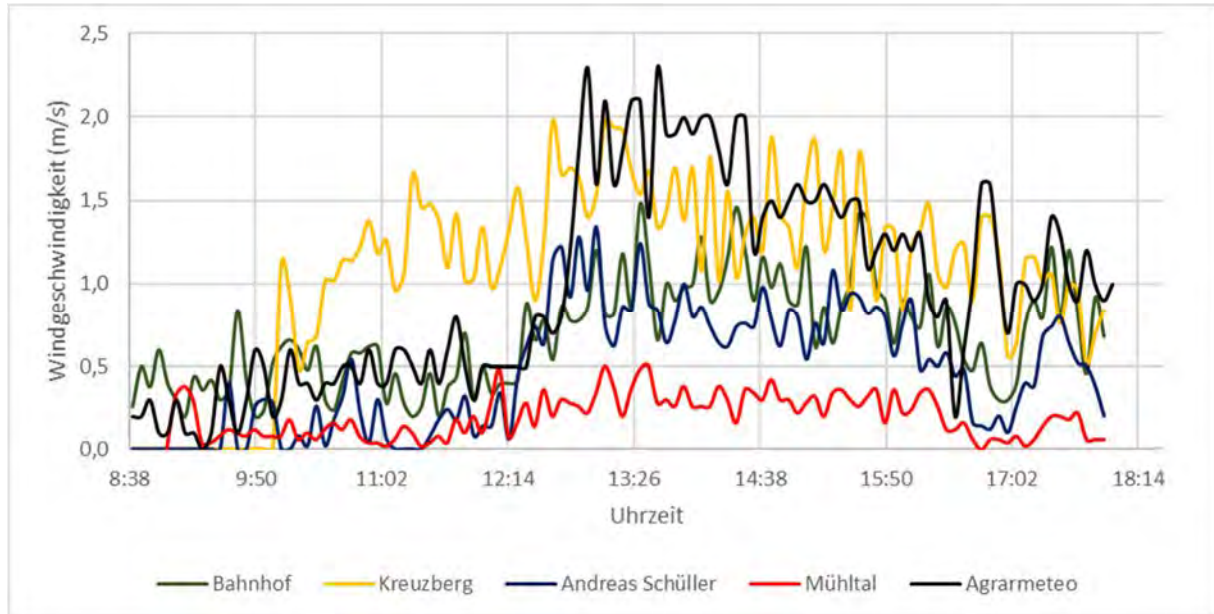


Abbildung 100: Windgeschwindigkeit in m/s am 14.09.2020 in Boppard, mit vier Wetterstationen und der Station von Agrarmeteorologie RLP

Die Windgeschwindigkeit (Abbildung 100) war im Mühlthal am geringsten aufgrund des dichten, waldähnlichen Bewuchses an den Hängen, was aufgrund der hohen Rauigkeit den Wind abbremsst. Anhand der Windrichtung in Abbildung 101 ist zu erkennen, dass der Wind hauptsächlich aus Süd und Südsüdost kommt. Die größte Durchschnittswindgeschwindigkeit war mit 1,3 m/s im Tagesverlauf auf dem Kreuzberg. Dies war zu erwarten, da es die höchst gelegene Station war und keine Bebauung oder Hindernisse für den Wind vorhanden waren. Die zweithöchste Durchschnittswindgeschwindigkeit wurde am Bahnhof erfasst mit 0,7 m/s. Die schwächsten Durchschnittswindgeschwindigkeiten wurden auf der Andreas-Schüller-Straße gemessen (0,5 m/s). In Abbildung 101 (a,b,d) ist deutlich zu sehen, dass auf dem Kreuzberg, im Mühlthal und am Bahnhof die Windzirkulation entlang des Hangs verläuft mit dominierender SSO-Komponente (auch NNO am Bahnhof). Auf der Andreas-Schüller-Straße bremsst die Bebauung, die quer zum Hang orientiert ist, die Hangzirkulation, so dass der Wind überwiegend aus Ostnordost kommt (Abbildung 101 c) und folgt demnach annähernd dem Straßenverlauf.

Die Agrarmeteorologische Station hat im Tagesverlauf eine durchschnittliche Windgeschwindigkeit von 1 m/s gemessen und ist in dieser Hinsicht vergleichbar mit dem Bahnhof. Eine Ursache für die relativ geringere Windgeschwindigkeit könnten die angrenzenden Weinflächen mit höherer Rauigkeit sein.

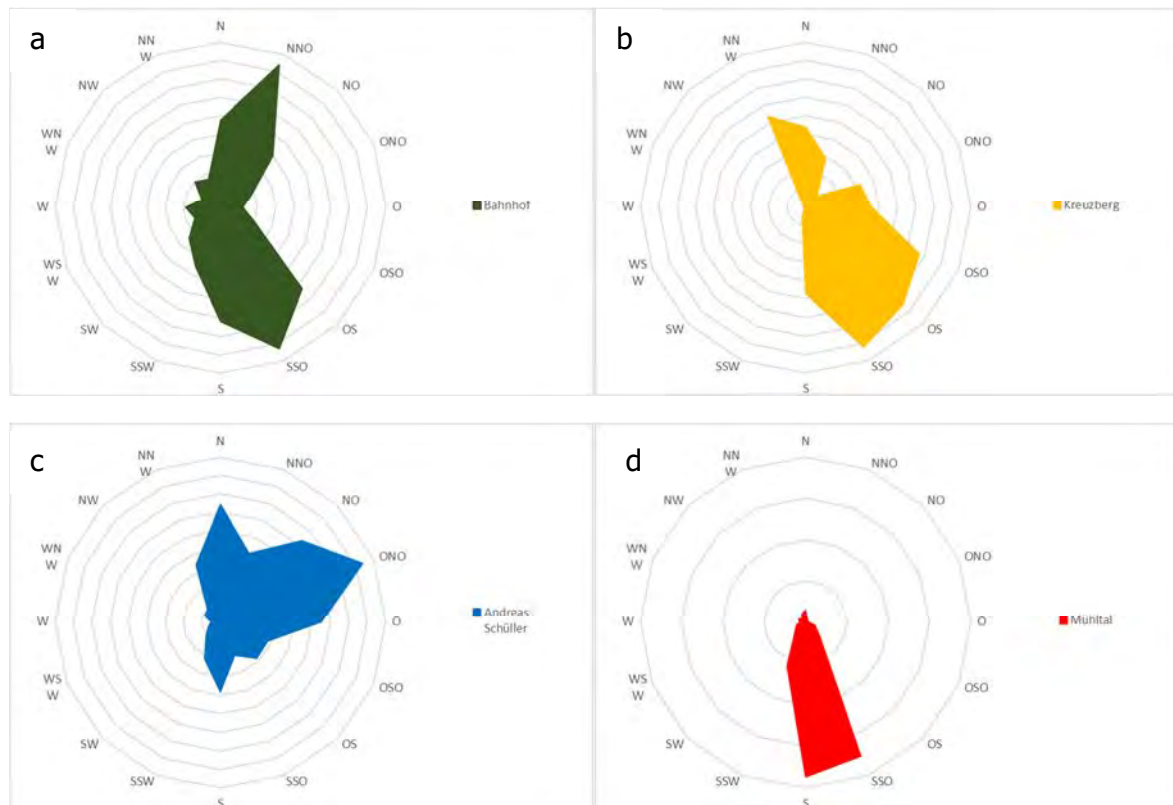


Abbildung 101 Windrichtungsverteilung auf den Standorten Bahnhof (a), Kreuzberg (b) Andreas-Schüller-Straße (c) und Mühlthal (d)

Die Messergebnisse bestätigen größtenteils die berechneten Kaltluftbahnen sowie die hitzebelasteten Problemzonen von Boppard, zeigen jedoch, dass die vorangegangenen Berechnungen der Kaltluftbahnen auf Grundlage von Literaturwerten etwas überschätzt sind. Dies hängt vor allem mit lokalen Veränderungen der Kaltluftbahnen und -wirkbereiche durch die Bebauung (Dichte, Höhe der Gebäude, Straßenverläufe u.a.) zusammen. Um dies genauer beurteilen zu können und zu plausibilisieren sind allerdings mehr flächendeckende kontinuierliche Messungen notwendig. Hierbei sollte zudem die in der Nacht im Wald produzierte und früh morgens ablaufende Kaltluft an verschiedenen Stellen gemessen werden. Auch zeigen die Messungen, dass es lokal zu starken Temperaturunterschieden auf geringster Entfernung kommen kann, insbesondere zeigten dies die Standorte an der Oberstraße 108 und der Kronengasse beim Hotel Krone. Generell werden die Punktmessungen stark von kleinräumigen Strukturen beeinflusst, weshalb die gewählten Messstandorte mit Wetterbedingungen zum Messzeitpunkt (z.B. Bewölkung, Schattenwürfe, besondere Windverhältnisse o.ä.) genau dokumentiert werden sollten (und wurden).

Betroffenheit der Kommunen im Teilraum 2 St. Goar und St. Goarshausen

Vorhandene Kaltluftentstehungsgebiete und -bahnen

Abbildung 102 zeigt die Kaltluftschneisen für Sankt Goar und Sankt Goarshausen. Analog zu Boppard und Umgebung liegen die Kaltluftschneisen auch hier entlang der Täler, erkennbar an der Topografie.

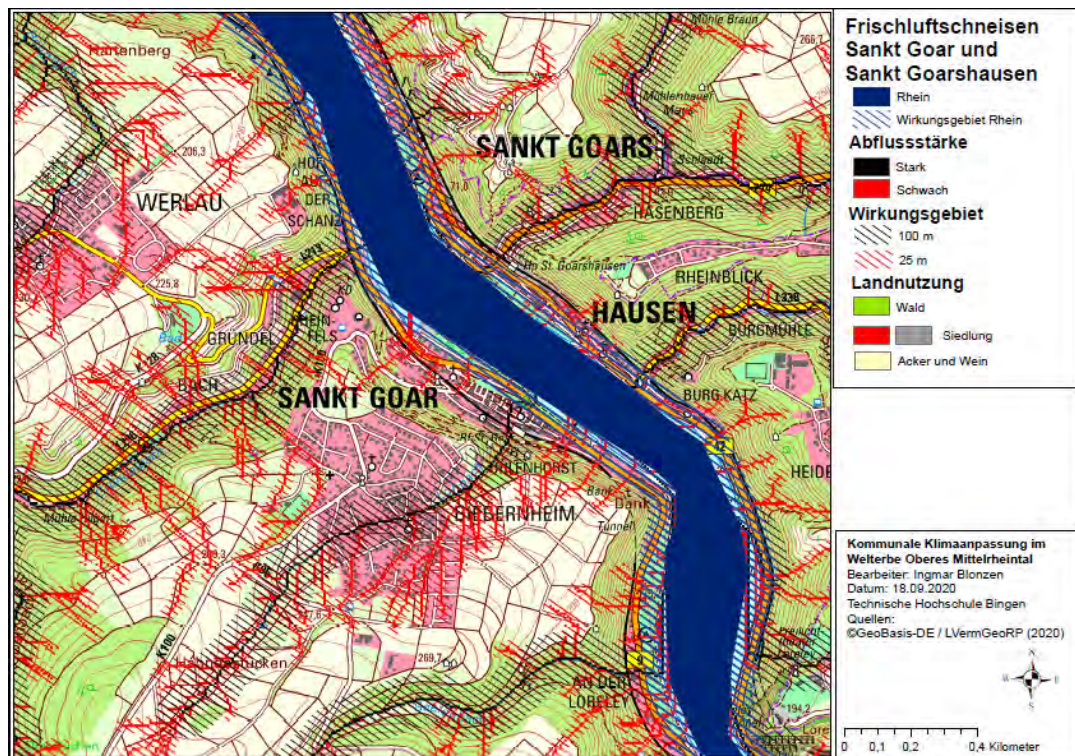


Abbildung 102 Berechnete Kaltluftschneisen für St. Goar und St. Goarshausen (Quelle der Topographie- und Landnutzungsdaten: GeoBasis-DE/ LVermGeoRPL, 2020b)

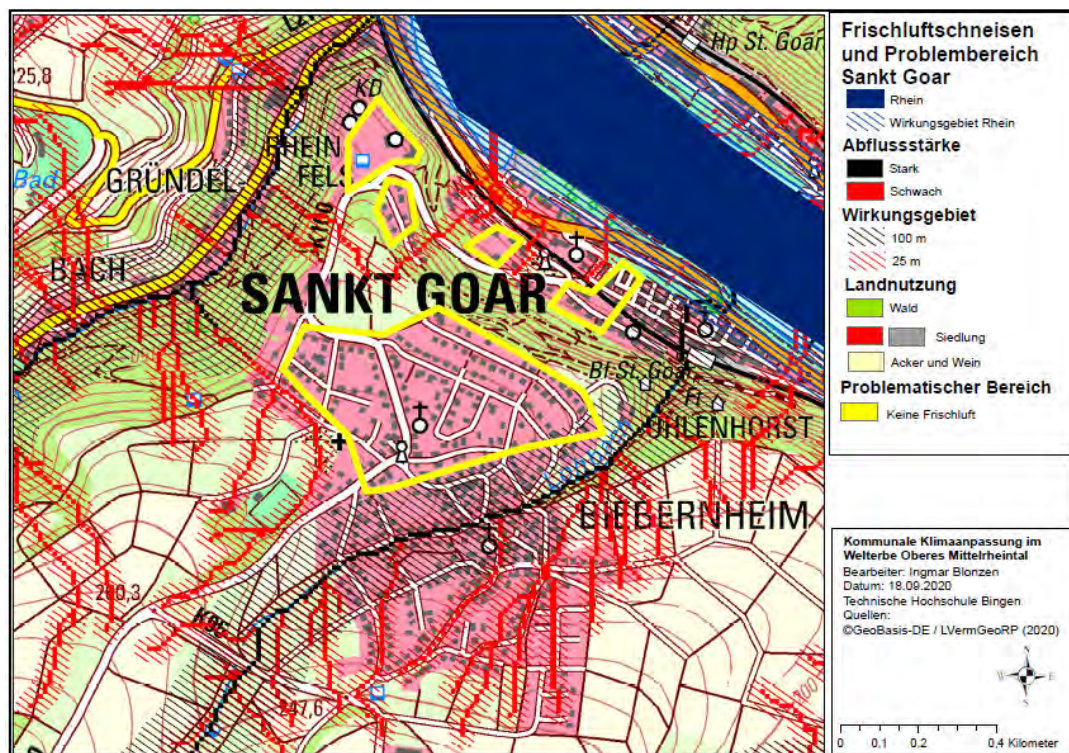


Abbildung 103: Berechnete Kaltluftschneisen für Sankt Goar Stadt, Quelle der Topographie- und Landnutzungsdaten: GeoBasis-DE/ LVermGeoRPL, 2020b)

Im St. Goarer Ortsteil Biebernheim gibt es einen vergleichsweise großen Bereich auf der Mittelterrasse oberhalb des Rheins (Abbildung 103, gelbe Umrandung), der wenig bis gar nicht mit Kaltluft versorgt wird. Grund ist vor allem die Topografie, welche dafür sorgt, dass die Kaltluftschneisen an den Seiten vorbei- beziehungsweise herabziehen. Der Wirkungsbereich der Abflussbahnen ist nicht groß genug, um den Bereich zu erfassen. Kleinere Problembereiche befinden sich auch in St. Goar selbst sowie an der Burg Rheinfels. Diese müssten über Messungen verifiziert werden.

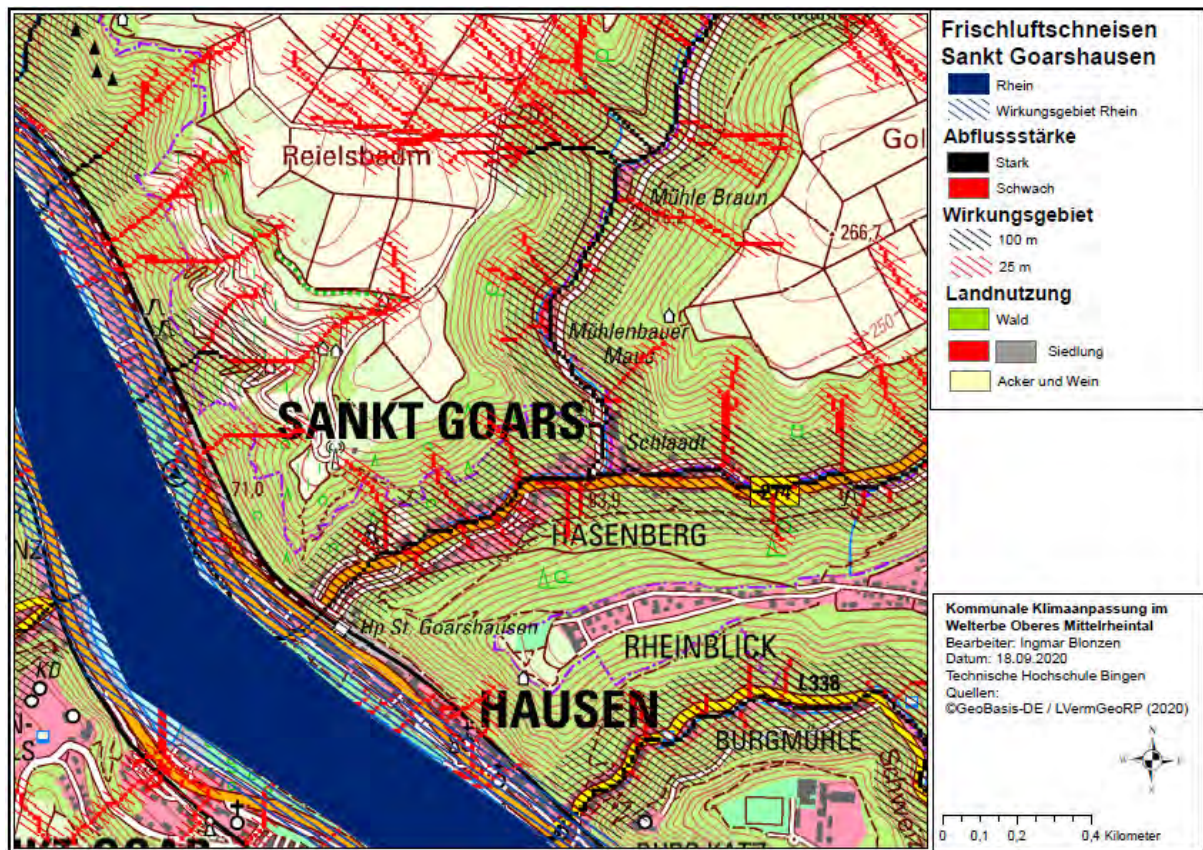


Abbildung 104: Berechnete Kaltluftschneisen für Sankt Goarshausen Quelle der Topographie- und Landnutzungsdaten: GeoBasis-DE/ LVermGeoRLP, 2020b)

St. Goarshausen hingegen liegt überwiegend im Wirkbereich der Kaltluftbahn entlang des Rheins und ist daher ausreichend mit Kaltluft versorgt, siehe Abbildung 104.

5.6 ZUSAMMENFASSENDE BETRACHTUNG DER BETROFFENHEIT UND ABLEITUNG VON HANDLUNGSBEDARFEN

Im Hinblick auf die mögliche Betroffenheit von Klimawandelfolgen und Feststellung von Handlungsbedarfen in den Orten des Mittelrheintales stehen die drei gewählten Städte exemplarisch für die anderen Siedlungsräume des Tals.

Zusammenfassung Betroffenheit: Bodenversiegelung

Flächenverbrauch und die damit einhergehende Bodenversiegelung sind auch im Welterbegebiet Oberes Mittelrheintal von Bedeutung, vor allem wenn es darum geht, Maßnahmen zur Klimaanpassung in Bezug auf die Versickerung von Wasser in Siedlungsflächen zu ermöglichen. In den drei exemplarisch betrachteten Gemeinden im Welterbegebiet Sankt Goar, Boppard

und Sankt Goarshausen zeigt sich, dass insbesondere für die Siedlungsflächen im Tal eine Betroffenheit bezüglich hoher Versiegelungsgrade des Bodens bestehen. Geeignete Maßnahmen zur Verminderung bestehender und zur Vermeidung zukünftiger Bodenversiegelungen lassen sich nur nach Analyse des zu betrachtenden Einzelfalls effektiv und zielführend lösen. Hierzu bedarf es allerdings detaillierterer Flächeninformationen auf der lokalen Ebene – wie sie z.B. durch ein Bodenversiegelungskataster gegeben wäre – um eine entsprechende Managementplanung zur kommunalen Klimaanpassung im Welterbegebiet Oberes Mittelrheintal durchzuführen.

Zusammenfassung Betroffenheit: Hitzebelastung

Für den Aspekt Hitze spielen Lage, Exposition, Bebauung, Versiegelung, Grünanteil, Wasserverfügbarkeit zur Kühlung, für Menschen und für Pflanzen eine Rolle. Häufig finden sich kritische Bereiche kleinräumig in den Orten verteilt. Oft sind es die Stadtplätze, breitere, versiegelte Straßenräume oder steinern ausgebildete Uferanlagen, die Handlungsbedarfe zur Verbesserung der kleinklimatischen Verhältnisse und der Aufenthaltsqualität erfordern. Vor allem großflächig angelegte Stellplätze werden, wenn sie versiegelte Beläge und keine Bäume oder andere Schutzdächer haben, künftig zur Verstärkung der Aufheizung beitragen.

Mögliche Handlungsfelder liegen hier generell im Bereich der **grünen Maßnahmen** wie Aufwertung von Freiräumen durch großräumige und punktuelle Grünstrukturen, Verschattung und Kühlung auch in Verbindung mit **blauen Maßnahmen**, z.B. durch Förderung von Wasserdurchlässigkeit, -speicherung und -verdunstung.

Zusammenfassung Betroffenheit: Wassernutzung und Gewässer

Im Tal weisen die kleinen Fließgewässer sowie der Rhein eine sehr stark bis vollständig veränderte Gewässerstrukturgüte auf. In den Oberläufen der Fließgewässer sind geringe bis deutlich veränderte Strukturen zu finden. Für die Starkregenvorsorge und die ökologische Qualität der Gewässer besteht hier deutlicher Handlungsbedarf.

In den Tallagen ist wenig Platz, die Gewässer sind häufig durch Häuser, Straßen oder Bahntrassen stark eingeeengt oder sogar verrohrt. Dazu kommt es zu Einleitungen von Regenwasser aus versiegelten Flächen. Damit steigt die Gefahr von hohen Sturzfluten und entsprechenden Schäden an Infrastruktur und Gebäuden. Die steilen Hänge der drei untersuchten Orte sind teilweise stark von Wassererosion betroffen, vor allem in St. Goar und St. Goarshausen. Diese Wassererosions-Flächen tragen zu hohen Abflüssen bei Starkregen bei mit entsprechenden Sediment- und Schwemmgutanteilen. Hier besteht Handlungsbedarf.

Der Zugang zum Rhein ist teilweise vorhanden, allerdings ist das Gewässer schwer erreichbar. Auch sonst sind die Zugänge zu Gewässern in den unteren Ortslagen, die von Hitze stärker betroffen sind, nicht oder kaum vorhanden. Wasserspielplätze oder Trinkwasserspender sind nicht vorhanden. Auch hier besteht Handlungsbedarf.

Bezogen auf Niedrigwasserperioden (v.a. Rhein) sollte die Betroffenheit der Kommunen nochmals geprüft werden. Mögliche Folgen sind z.B. die dann ausfallenden Fährverbindungen, aber auch mögliche Trockenheitsschäden in den angrenzenden Grünflächen. Der Zugang zum Wasser des Rheins könnte bei Niedrigwasser zwar erleichtert sein – das Wasser ist dann allerdings stärker mit gereinigtem Abwasser belastet. Bezogen auf Trockenheitsperioden sind die Folgen

für die Wasserwirtschaft nicht analysiert worden, u.a. die vermutlich ansteigenden Bewässerungsbedarfe wurden nicht quantifiziert.

Zusammenfassung Betroffenheit: Kaltluftschneisen und Übertragbarkeit auf andere Kommunen und Teilräume

Art und Verlauf der berechneten Kaltluftabflussbahnen sind in weitestem Sinne übertragbar auf das gesamte Mittelrheintal. Die Landnutzung ist überwiegend durch Wald geprägt und starke Abflussbahnen scheinen überwiegend aus diesem Bereich zu kommen. Der Acker und die Weinflächen produzieren eine vergleichbare Menge Kaltluft wie Wald (s. Tabelle 6), spielen jedoch eine untergeordnete Rolle, da sie flächenmäßig den Waldflächen untergeordnet sind. Die Kaltluftbahnen verlaufen überwiegend entlang der Täler zum Rhein.

Überwiegend sind die Siedlungen im Mittelrheintal gut mit Kaltluft versorgt, es zeigen sich jedoch auch Defizitflächen im Bereich der Mittelterrasse z.B. das Plateau im Ortsteil St. Goar – Biebrnheim sowie im Bereich der Niederterrasse in den eng bebauten, städtisch geprägten Bereichen.

Anhand der in Boppard durchgeführten, detaillierten Messungen konnte gezeigt werden, dass die GIS-Berechnungen der Kaltluftversorgung eine gute Annäherung an die tatsächlichen Verhältnisse darstellen. Diese müssen aber für eine genauere Betrachtung des restlichen Mittelrheintals sowie eine fundierte Ableitung von Maßnahmen durch 3D-Modellierungen und weitere Messungen in zukünftigen Untersuchungen verifiziert werden.

6 KOMMUNALE HANDLUNGSVORSCHLÄGE UND MAßNAHMEN ZUR KLIMAAANPASSUNG

Mögliche Maßnahmen zur Klimaanpassung stellen in der Regel für die Kommunen große Herausforderungen und vielfältige Querschnittsaufgaben dar. D.h. neben den Handlungsfeldern, die durch Planen und Bauen innerhalb von Stadtplanung, Städtebau und Grünplanung, Verkehr, Wasser und Umgang mit dem Boden zu beeinflussen sind, kommen weitere Themen aus Gesundheits- und Katastrophenschutz hinzu.

Für die Kommunen entstehen umfangreiche Koordinierungs- und Managementaufgaben. Der Deutsche Städtetag hat daher zur Unterstützung in 2019 einen Maßnahmen- und Forderungskatalog zusammengestellt, der den Kommunen bei der Bewältigung dieser Herausforderungen helfen soll.

Die nachfolgenden Maßnahmenvorschläge dieser Studie beschränken sich auf die baulich beeinflussbaren Handlungsfelder der Grünstrukturen, des Wassers, des Bodens und der Kaltluftsicherung.



Abbildung 105 Maßnahmen- und Forderungskatalog (Quelle: Deutscher Städtetag, 2019)

6.1 MAßNAHMEN IM BEREICH VON GRÜNSTRUKTUREN

Die Betrachtung der drei Orte zeigt exemplarisch, wo die möglichen Risiken in der in der Zukunft bei zunehmenden Temperaturen, häufigeren Hitzetagen und mehr Trockenheit liegen können. In Kapitel 4.1 wurde bereits darauf eingegangen, welche Rolle sowohl großräumige als auch kleinräumige, lokale Grünstrukturen und Grünelemente zur Verbesserung des Kleinklimas und zur Vorsorge gegen Hitze als auch zur Verbesserung der Lebens- und Aufenthaltsqualitäten übernehmen können.

Im Folgenden werden hierfür nun exemplarisch skizzenhafte Vorschläge erarbeitet, die sich an den Einteilungen des Klimalotsen (UBA, 2015b) orientieren. Hierbei sind die aufgeführten Maßnahmen und Gestaltungsvorschläge als so genannte No-regret Maßnahmen (vgl. Definition in der Textbox) zu verstehen. Dies ist besonders relevant, da im Mittelrheintal mit der für 2029 geplanten Bundesgartenschau die Kommunen bestrebt sein werden, ihre je lokalen Freiräume neu

zu gestalten, aufzuwerten und zu qualifizieren. Dabei ist wichtig, dass einerseits nicht nur auf den Effekt des Jahres 2029 und der damit verbundenen und erwarteten Besucherströme ab-

Definition von No-Regret-Maßnahmen:

„No-regret-Maßnahmen basieren auf den Strategien, die mit oder ohne Folgen des Klimawandels ökonomisch, ökologisch und sozial sinnvoll sind. Bei diesen Maßnahmen übersteigt bereits unter den heutigen Klimabedingungen der zu erwartende Nutzen die anfallenden Kosten der Maßnahme (www.klimazug-radost.de). Sie werden vorsorglich ergriffen, um negative Auswirkungen zu vermeiden oder zu mindern. Ihr Nutzen für die Gesellschaft ist auch dann noch gegeben, wenn der eigentliche Grund für die ergriffene Maßnahme nicht im erwarteten Ausmaß zum Tragen kommt“

(Niang-Diop & Bosch, 2005; UK Climate Impacts Programme [UKCIP], 2005)

gezielt wird, andererseits auch keine unnötigen oder zusätzlichen Kosten durch nur auf Klimaanpassung ausgerichtete Maßnahmen verursacht werden, sondern dass alle Maßnahmen und Gestaltungen „sowieso“ einen Nutzen für die Menschen – Bewohner und Gäste – haben.

Richtig geplante grüne Maßnahmen / grüne Infrastrukturen sind die wirksamsten Maßnahmen zur Minderung der Klimawandelfolgen im Handlungsfeld Hitze. Wie Erfahrungen zeigen, kann eine Gartenschau im Hinblick auf die Entwicklung und das Bewusstsein für die Bedeutung grüner Infrastrukturen und grüner Räume einen besonderen Schub geben. Daher werden zu den grünen Maßnahmen einige generelle Aspekte vorangestellt.

Generelle Handlungsempfehlungen und Maßnahmen:

- Von den grünen Elementen tragen vor allem Bäume durch ihre Transpirations- und Evaporationsleistung (Verdunstung) wesentlich zu Kühlung, durch dichte Kronen zur Schattenbildung und damit zur Aufenthaltsqualität bei. Sie sind deutlich wirksamer als Sträucher und Gehölze oder gar reine Rasenflächen. Wie alle Grünstrukturen übernehmen auch Bäume in besonderem Maße zusätzlich weitere Ökosystemleistungen (Staub- und Schadstoffbindung, Lebensraum etc.).
- Daher ist der Erhalt und die Erhöhung des städtischen Baumbestandes als wirksamstes Grün wichtig. Baumbestände geringer Vitalität und geschädigte Bäume sollten frühzeitig, vor Abgang von Bäumen, durch neue klimaangepasste Bäume ersetzt werden.
- In vielen Orten ist es ratsam, die Dichte von Bäumen nicht nur in den Grünanlagen sondern auch im übrigen Stadtraum deutlich zu erhöhen. Durch entsprechende Pflanzkonzepte sollten dabei ausreichend Wahlmöglichkeiten für Nutzer - besonnter oder schattiger Platz – durch entsprechende Gruppierungen bedacht werden. Künftig können durchaus Beschattungen durch Bäume von bis zu 50% der Flächen in Parks oder auf großen Plätzen erforderlich werden (vgl. Susanne Böll et al., 2020).
- Auch Bäume leiden unter Hitzestress. Daher sollte die Baumartenwahl zur Vorbeugung eventueller Ausfälle artenreich und klimaresistent sein (siehe Abbildung 106). Hilfe bei der Suche nach geeigneten „Klimabaumarten“ findet man in der „Baumliste Stadtgrün 2021“ (LWG, 2015) und in der Straßenbaumliste der GALK (GALK e.V., 2020). Ziel der Mischung von Baumarten ist dabei auch das Risiko von Ausfällen durch mögliche neue Krankheiten oder Schädlingen zu streuen.

Versuchsbaumarten

Kriterien für die Auswahl zukunftssträchtiger Stadtbaumarten

- Trockenstresstoleranz
- Frosthärte, Spätfrosthärte
- natürlicher Lebensbereich (Kiermayer)
- Standortansprüche, insbes. pH-Toleranz
- Krankheitsanfälligkeit
- Schädlingsanfälligkeit (EPPO-Liste)
- Bewertung aus der Praxis
- Wuchsform

Abbildung 106 Kriterien für die Auswahl von Stadtbaumarten im Klimawandel – ein Forschungsprojekt der LWG (Quelle: (LWG, 2015))

- Bei der Wahl von Bäumen und Sträuchern sind außerdem erhöhte Wasserbedarfe in den Anfangsjahren und in den Hitzemonaten zu berücksichtigen und ggf. im Haushalt für den Mehraufwand Mittel einzustellen (vgl. auch Thema Wasser, Reservoirs /-zisternen schaffen, Niederschlags- und Grauwasser nutzen)
- Der Einsatz neuer Methoden der Regenwassernutzung z.B. durch Sammeln von Dachflächenwasser sind zur Bewässerung von Baumgruben und anderen Pflanzflächen zu prüfen (vgl. Abbildung 107).
- Bei Neupflanzungen ist insbesondere die Qualität der Baumstandorte für das Anwachsen und die künftige Widerstandsfähigkeit der Bäume sowie für die Wasserversorgung relevant. Baumgruben und Baumscheiben müssen ausreichend groß und tief sein, sodass die Bäume sich ihr Wasser aus der Tiefe holen können. Die offene Baumscheibe sollte mind. 6 m², der durchwurzelbare Raum 13 m³ und die Baumgrubentiefe 1,50 m betragen [vgl. DIN 18915 und 18916 (Deutsches Institut für Normung e.V [DIN], 2016, 2018) sowie FLL-Richtlinie „Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2“, 2010 (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau [FLL], 2010)]. Oberflächen der Baumscheiben sollten nicht verdichtet werden.
- Die Anordnung von dichteren Baum-/Pflanzungen muss die je lokalen Luftbewegungen berücksichtigen, um die erforderliche Kaltluftzufuhr nicht zu blockieren.
- Im Hinblick auf Wasserbedarfe sollten pflege- und bewässerungsintensive Schmuckpflanzungen (Wechselflor) in Park- und Stadtanlagen reduziert oder auf einzelne Highlights beschränkt werden. Durch extensivere, der Biodiversität dienende und ggf. trockenheitsresistente Pflanzungen können diese ersetzt werden.
- In Verbindung mit neuen Konzepten zur oberflächennahen Sammlung von Niederschlagswasser sind hierfür genauso neue Pflanzkonzepte vorstellbar, z.B. durch Pflanzung in wechselfeuchten Mulden-Rigolen wie an anderen Stellen Trockenheit liebende Pflanzen.
- Auch Fassadengrün (Kletterpflanzen, Ranker und Klimmer) gehört zu den wirksamen grünen Maßnahmen und ist für die eng bebauten Siedlungsräume im Tal eine gute Alternative. Brandwände, großflächige Putzfassaden können durch Begrünung vor Aufheizung geschützt werden. Insbesondere in den Bereichen, in denen Stein und Versiegelung dominieren, können platzsparende Rankpflanzen kleine grüne Akzente setzen. Zu berücksichtigen ist dabei, dass Begrünung in engeren Bereichen aber auch die Luftzirkulation beeinträchtigen könnte und daher von Fall zu Fall die zu wählende Art der Begrünung und die Wirkung zu prüfen ist.

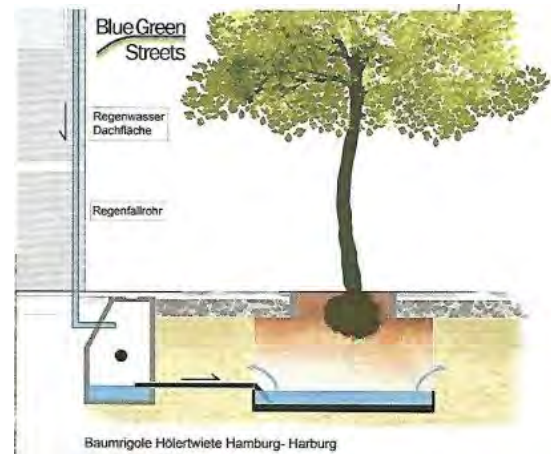


Abbildung 107 Baumrigole in Hamburg geplant (Quelle "Gepflegt: Multifunktionale Klima-Baumstandorte," 2020)



Abbildung 109 Handbuch Grüne Wände (Quelle: Freie und Hansestadt Hamburg & Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft [BUKEA], 2020)

- Die Wirksamkeit von Dachbegrünung ist stark abhängig von den möglichen Dachaufbauten. In den betrachteten Städten des Tales sind die Dächer i.d.R. Satteldächer, für die Dachbegrünungen keine Lösung sind. Auch entspräche in den historischen Ortslagen eine solche Wahl nicht dem Ortscharakter. Gründächer sind jedoch für die gewerblichen Großbauten in den Tallagen (auch auf den Höhen) eine gute Alternative, die Nutzen für Kühlung und Biodiversität zugleich bringen können. Aber auch extensive, Trockenheit verträgliche Dachbegrünung kann in den extremen Sommermonaten Bewässerung benötigen. Daher ist je nach Lage bei möglichen Dachbegrünungen und zunehmenden Hitzetagen abzuwägen, ob ein Standort sich für extensive Dachbegrünung eignet, oder ob der Aufwand durch ggf. erforderliche Bewässerung die Grundidee konterkariert.
- Auch die Wahl geeigneter Bodenbeläge ist zu den grünen Maßnahmen zu zählen. Offen und wasserdurchlässig ausgebildete Flächen sind im Hinblick auf ihre Minderungswirkung von Aufheizung grundsätzlich der Versiegelung vorzuziehen. Ist ein hoher Befestigungsgrad aus Nutzungs- und Gestaltungsgründen aber erforderlich (z.B. in Straßen und Gassen), so ist zu prüfen, ob die Ränder oder Teilflächen offener ausgebildet werden können (Naturpflaster, wassergebundene Decke).
- Grundsätzlich spielt auch das Wasser im Siedlungsraum für die Minderung der thermischen Belastung durch extreme Hitze eine große Rolle. Trinkwasserspender, Brunnenanlagen und Zugänglichkeit zum Wasser, ob Fluss, Bach, Wasserbecken oder offene Rinne können hier entlastende Wirkung haben.
- Nicht zuletzt ist in von Starkregen gefährdeten Bereichen auch über die Ausbildung von öffentlichen Räumen zur vorübergehenden Aufnahme von großen Niederschlagsmengen nachzudenken. Dies kann bedeuten, Straßenräume, Platzflächen oder öffentliche Grünflächen abgesenkt auszubilden, sodass sie dem Wasserrückhalt dienen können. Diese sogenannten multicodierten Flächen sind allerdings keine Lösungen für die

Rheinhochwasser, bei denen eher der schnelle und hindernisfreie Abfluss gewährleistet sein muss.

Handlungsempfehlungen und Maßnahmen für einzelne Bereiche

1. Uferanlagen

- Die Rheinvorgelände sollten – wo von der Fläche her ausreichend – als grüne Uferparks entwickelt werden. Dabei ist auf ausreichend Beschattung, artenreiche, klimaresistente und gleichzeitig hochwasserverträgliche Grünstrukturen sowie einen hohen Anteil unterschiedlicher Großbaumarten zu achten.
- Der Anteil der Versiegelung sollte auf Mindestanforderungen, d.h. auf stark frequentierte oder zu befahrende Flächen in Überschwemmungsbereichen reduziert werden (Wartungsaufwand nach Hochwasser).
- In den versiegelten Bereichen, vor allem denen mit Aufenthalts- oder Wartefunktion wie bei den Fähranlegern sollte für genügend Schatten – z.B. Bäume oder Überdachungen – gesorgt werden. Alternativ sind auch bauliche Anlagen wie Sonnensegel, Rankgerüste, begrünte Pergolen oder ähnliche Schattenspenden einsetzbar.
- Insbesondere die Uferpromenaden sind stark besucht, daher ist hier zum Wohle von Touristen und Einheimischen für ausreichend Trinkwasserangebote (Wasserspender / Kioske etc.) und auch Zugänglichkeit des Wassers zu sorgen. Je nach Lage reicht aber die kühlende Wirkung des Flusses nicht aus, um unerträgliche Hitze zu mindern. Weitere Angebote der Beschattung können erforderlich werden.



Abbildung 110 Beispiel für angenehmes Sitzen am Wasser unter Bäumen und Sprühnebler in Hann. Münden (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)

2. Radwege

- Um die Nutzungsqualität der Radwege auch in den heißen Sommermonaten in Zukunft zu sichern, sollte geprüft werden, ob in einzelnen Abschnitten uferbegleitend auch Baumpflanzungen möglich werden.
- Ergänzend sind Pausenstationen erforderlich, die für Radler und Spaziergänger Erfrischung (Trinkwasserspender / Kiosk) und Kühlung (ein Ausruhen unterm Dach, im Schatten) ermöglichen.



Abbildung 111 Radweg linksrheinisch im Bereich Bad Salzig (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)

3. Innerörtliche Gassen, Plätze und andere Freiflächen



Abbildung 112 Schattenbildung durch Pergolen oder Stützengänge, berankt oder verlattet – z.B. am Markt in Boppard [Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner (links, Mitte), Freitag Hartmann Architekten (rechts)]

- Auch innerorts werden – je nach Exposition und Ausstattung – auf weiteren, der Sonne ausgesetzten Plätzen und in breiteren Straßen Schutzmaßnahmen gegenüber zu starken Aufheizungen erforderlich. Hierzu zählen Bäume, punktuell als großer Solitär oder auch flächig mit Kleinbäumen als lichter Hain angeordnet. Kühlende und schattenspende Funktionen können aber auch durch bauliche Anlagen sichergestellt werden (z.B. eine Stützenkonstruktion mit eingehängten Segeln, Holzslattung, berankt o.ä., siehe Abbildung 112 und Abbildung 113), die gleichzeitig für Außengastronomie (statt Sonnenschirmen) genutzt werden können oder auch als Unterstand für Marktbuden.



Abbildung 113 Schattenbildung durch Schirme oder Segel (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)

- Ranker und Klimmer haben für schmale Gassen und Straßen ebenfalls einen entlastenden und verschönernden Effekt: sie bilden Blattmasse, Verdunstungskühle, Lebensraum, klimatisieren Hauswände u.v.m. Besucher und Anwohner empfinden zudem häufig mit Rankpflanzen bewachsene oder überspannte Gassen als angenehm.

4. Straßenräume

- Unversiegelte Flächen sind kühler als versiegelte Flächen und können in begrenztem Umfang Niederschlagswasser aufnehmen und speichern. Daher sollten, wo von Funktion und Nutzung möglich, wasserdurchlässige und wasserspeichernde Beläge, die auch zur Kühlung über Verdunstung beitragen können, verwendet werden.
- Breitere Stadtstraßen brauchen für Klima, für Luftreinhaltung und zur Minderung der Aufheizung Straßenbäume, und zwar Hochstämme, die durch hohen Kronenansatz die Einhaltung des Lichtraumprofils (4,50 m) ermöglichen und damit auch LKW-/ Lieferverkehr ohne Kronenbeschädigung in den Straßen zulassen.
- Bei breiten Straßen, in denen auf der Fahrbahn geparkt wird (i.d.R. 7 m breit), gliedern Bäume optimal die auf der Fahrbahn angeordneten Stellplätze, z.B. jeden zweiten oder dritten Stellplatz ein Baum (Baumabstand zwischen 15 m und 23 m), verschmälern damit optisch die befahrbare Straße und führen zur Geschwindigkeitsminderung. Die Bäume reduzieren das Aufheizungspotenzial der Straße.
- Weitergehende, zu prüfende Lösungsansätze wären in Straßen die mögliche Sammlung und Nutzung des Regenwassers für die Bewässerung der Baumscheiben und des angrenzenden Straßengrüns.



Abbildung 114 Baumpflanzungen/ Straßenbäume dienen der Kühlung und der Luftreinhaltung – sie wären in der Mainzer Str. in Boppard eine Verbesserung (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)

5. Stellplatzanlagen

- Oberirdisch angeordnete Stellplatzanlagen sollten grundsätzlich nicht ohne überstehende Bäume oder andere Überdachungen hergestellt werden. Hilfreiches Instrument ist hierfür eine Stellplatzsatzung, die z.B. Festlegungen ermöglicht, nach wieviel Stellplätzen je ein großkroniger Laubbaum zu pflanzen ist (i.d.R. wird festgelegt alle 4 oder alle 6 Stellplätze). Auf entsprechend der DIN und der FLL-Richtlinie (vgl. Generelle Handlungsempfehlungen und Maßnahmen, Seite 117) ausgebildete Baumstandorte sowie entsprechende Wasserversorgung (z.B. Wassersäcke) ist bei Neupflanzungen zu achten.



Abbildung 115 Baumlose Stellplätze: an der B 9 in Bacharach (links), in Boppard (Mitte), in St. Goarshausen (rechts) (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)

- Alternativ können auch Stellplatzanlagen mit Dächern überbaut werden. Ein Gründach würde der Verschattung dienen und als Grünfläche auch noch zur Biodiversität, Wasserrückhaltung und Kühlung durch Transpiration (Verdunstung) beitragen. Eine nachträgliche Überbauung eines Parkdecks mit extensivem Gründach wäre zwar eine wirksame, aber auch kostenintensive und eher unrealistische Möglichkeit.
- Realistischer erscheint eine Überspannung von Parkdecks mit einer Stützen- und Rankkonstruktion (s. Abbildung 116). Damit wäre nicht nur ein ästhetischer Gewinn verbunden, sondern auch eine Reduzierung des Aufheizungspotenzials.



Abbildung 116 Ranksystem als Alternative (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)

- Als letzte und vielleicht innovativste Lösung wäre für Parkdecks auch eine Nachrüstung mit Photovoltaik-Dächern zu prüfen, Dachsystemen also, die gleichzeitig die Aufheizung der parkenden Autos mindern und selber Energie produzieren. Inzwischen sind auch Kombinationen von Photovoltaik- und Gründächern möglich (vgl. Aufbauvorschlag der Firma ZinCo, Abbildung 117). Eine solche Lösung weiter zu entwickeln und zu prüfen hätte großen Innovationscharakter.

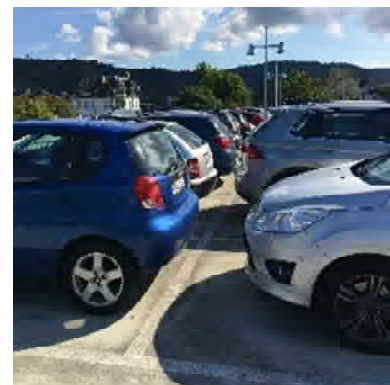


Abbildung 117 Kombination von Fotovoltaik und Gründach (links, Quelle: ZinCo GmbH) - mögliche Lösung für das Parkdeck in Boppard (rechts, Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)

6.2 MAßNAHMEN ZU WASSERNUTZUNG UND GEWÄSSERN

Die folgenden Vorschläge zu möglichen Maßnahmen zur Klimaanpassung in Kommunen des Mittelrheintals im Themenfeld der Wassernutzung und Gewässer orientieren sich an

- Leitfäden zur Klimaanpassung, darunter auch dem Klimalotsen des Umweltbundesamtes,
- an Beispielen anderer Städte und Kommunen sowie
- an der exemplarischen ersten Analyse der Betroffenheit der Orte Boppard, St. Goar und St. Goarshausen.

Übergreifende Empfehlung ist es, die Analyse der Betroffenheit und die Identifikation möglicher Maßnahmen mit den Beteiligten der jeweiligen Kommunen im Mittelrheintal in einem Dialogprozess zu entwickeln. Die hier dargestellten Maßnahmen können nur Vorschläge für so einen Dialog sein. Die Bürger, Behörden, Unternehmen und Institutionen der Ortschaften

selbst sind gefordert, die Betroffenheit zu analysieren, mögliche Maßnahmen auszuloten und die Umsetzung voranzubringen.

Dennoch sollen hier Vorschläge für Maßnahmen erfolgen, die eine zukunftsorientierte und nachhaltige Entwicklung der Ortschaften des Oberen Mittelrheintals ermöglichen. Sie sollen vor allem dazu beitragen, dass die betroffenen Orte die Folgen des Klimawandels erkennen und die Risiken reduzieren. Das soll dazu führen, dass Schäden für Wirtschaft und Gesundheit reduziert werden und möglicherweise sogar Nutzen aus den Klimawandelfolgen gezogen wird. Wie im Themenfeld „Hitze“ wird auch bei Wasser und Gewässern ein Fokus auf No-Regret-Maßnahmen gelegt.

1. Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerstrukturgüte

Die Aufwertung der Gewässerstrukturgüte reduziert mögliche Schäden von Starkregen, ermöglicht den Zugang zu kühlendem Wasser, bietet also Erholungsraum, und trägt zur Biodiversität des Tals bei. Wo immer möglich, sollte daher die Gewässerstrukturgüte zunächst erfasst und dann über Renaturierungsmaßnahmen verbessert werden. Dazu gehören die vielen kleinen Fließgewässer des Tals - aber auch der Rhein als verbindendes „blaues Band“ des Tals.

Der Rhein als Bundeswasserstraße liegt in der Verantwortung der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS). Im Oberen Mittelrheintal werden aufgrund der Enge des Tals wenig Maßnahmen zur Verbesserung der Strukturgüte möglich sein.

Dennoch könnte der Dialog mit der GDWS auch im Zuge des Projekts der Abladeoptimierung, d.h. einer Fahrrinnenvertiefung, des Mittelrheins zu möglichen Optimierungen der Strukturgüte im WOM führen. Die Biodiversität des Rheins tritt hinter der Funktion als Wasserstraße bisher sehr zurück. Möglicherweise könnte die biologische Vielfalt und das Potenzial des Rheins z.B. durch einen Rhein-Biodiversitäts-Tag oder auch Schul-Aktionen mit einer „Rhein-Biodiv-Box“ (Vorbild „Danube Box“ der Donau) stärker ins Bewusstsein der Bevölkerung gerückt werden.

Bei den kleinen Fließgewässern ist aufgrund der großen Zahl eine Priorisierung durch die Orte oder Verbandsgemeinden erforderlich. Potenzial für kurzfristige Renaturierungsmaßnahmen bieten vor allem die Oberläufe: Dort können Gewässerstrukturen leichter verbessert werden, da die Gewässer nicht so stark durch die enge Bebauung beeinträchtigt oder auch komplett versteckt sind. Beispielsweise kann der Zugang zu den Gewässern verbessert werden. Auch können Mulden oder Teiche als Rückhalteräume identifiziert und entsprechend angelegt werden (s. auch 2. Maßnahmen für die Retention von Wasser).

Zu enge Fließquerschnitte finden sich vor allem in den unteren rheinnahen Ortsteilen. Dort besteht ein großes Risiko von Schäden bei Starkregen. Schwachstellen sollten identifiziert und in einem zweiten Schritt umgestaltet bzw. saniert werden. Dazu gehören marode Rechen oder Einlaufbauwerke. Treibgut, was die Engstellen zusetzen kann, kann in den teilweise naturnahen Oberläufen schon durch Treibgutrechen zurückgehalten werden.

Als Chance werden hier die sowohl von Hessen als auch Rheinland-Pfalz geförderten kommunalen Maßnahmen zur Starkregenvorsorge gesehen, die für alle Kommunen im Tal empfohlen werden. Außerdem können Fließgewässer-Gestaltungen in Landschaftskonzepte der Bundeshortenschau einfließen: So könnten die Fließgewässer zunächst sichtbar und als zweites vielleicht sogar als besonderes Landschaftselement des Tals herausgestellt werden. Kühle, feuchte und schattige Wanderwege könnten an den Gewässern in die oberen Ortslagen führen.

Mögliche Umgestaltungen in den betrachteten Orten wären die Freilegung des Bopparder Bruder-Michels-Bachs im Bereich des Spielplatzes oder die Abflachung der Ufer des Gründelbachs in St. Goar (vgl. Abbildung 118).

Wilde, schöne Wasseradern

Wie können Gewässer im Mittelrheintal wieder zugänglich gemacht und ihr Wert ins Bewusstsein gerückt werden?

Ein Projekt „Fließwege und Wasseradern“ des Tals könnte für die Wasserläufe sensibilisieren, z.B. über einen Wettbewerb „Unsere schönsten Wasseradern“.

Schulen und Kindergärten könnten die Gewässer und die angrenzenden Flächen als Aufenthaltsräume nutzen, damit künftige Generationen ein Bewusstsein für die Wasserläufe des Tals bekommen.

Wenn Wasserläufe nicht über Fußwege erreichbar sind, kann eventuell eine Seilbahn über einzelne Gewässerläufe hinwegführen und darauf aufmerksam machen.

Möglicherweise bietet sich der eine oder andere Wasserlauf auch für eine Art „Canyoning“ an, also eine abenteuerliche Klettertour im Gewässer selbst.



Abbildung 118 Boppard: Spielplatz, darunter verläuft der Bruder-Michels-Bach (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020); St. Goar: Gründelbach (Hochschule Koblenz/Klasen 2020)

2. Maßnahmen für die Retention von Wasser

Die Retention oder auch der Rückhalt von Wasser ist infolge der steilen Hänge des Tals und dort, wo versiegelte Flächen vorliegen, gering. Das Rückhaltevermögen für Wasser sollte also

wo immer möglich verbessert werden. Bei Orten spricht man auch vom „**Schwammstadtprinzip**“, d.h. Wasserrückhalt in Regenzeiten, damit in Zeiten von Hitze und Trockenheit Wasser für Verdunstung und Wachstum vorhanden ist.

An den steilen Hängen sollten in diesem Zusammenhang die Flächenbewirtschaftungen auf Wasserrückhalt und Erosion geprüft und ggf. angepasst werden. Die **Terrassenbewirtschaftung** als traditionelle Form der Flächenbewirtschaftung ist positiv für den Wasserrückhalt – wie auch die Waldflächen. An manchen Hängen könnten durch Mulden oder tiefer gelegte Freiflächen weitere Rückhalteflächen geschaffen werden. Am Ende von Hängen können Drainagen oder Mulden Wasser zusätzlich zurückhalten. Konstruktive Ideen liefern die „blaugrüne“ Infrastruktur sowie die Konzepte zu multicodierten Flächen aus der Landschaftsplanung. Kommunen können bei der Ausweisung von Baugebieten auch den kompletten Wasserrückhalt in der Baufläche einfordern - so wie das mittlerweile in Frankfurt u.a. Städten geschieht und in Frankfurt-Riedberg bereits umgesetzt wurde.

Auch im Gebäudebestand können Beiträge zur Wasserretention erfolgen: Regenzysternen und Regentonnen halten Niederschlagswasser zurück und führen es dem Boden wieder zu. Gerade bei kleinen Fließgewässern mit geringen Abflussquerschnitten können sogar Regentonnen signifikante Beiträge zur Abflussreduktion leisten, wenn genug davon aufgestellt werden. Auch Gründächer tragen zum Wasserrückhalt und zur Verdunstungskühlung bei. Kommunen können durch entsprechende Gebührensätze und Förderprogramme Anreize zum Wasserrückhalt schaffen, wie die Schwammstadt Berlin zeigt. Auch planerisch kann den Privateigentümern eine Unterstützung zugutekommen.



Abbildung 119 St. Goar, Grünfläche am Lohbach mit geringer Retentionswirkung (Foto: Hochschule Koblenz/Gelhard 2020)

Mögliche Umgestaltungen in den betrachteten Orten wären die Anlage von tiefer liegenden Mulden oder Flächen oberhalb der Ortslagen, z.B. am Lohbach in St. Goar durch Umgestaltung einer Grünfläche (vgl. Abbildung 119), oder in Boppard im Lohbachtal (vgl. Abb. Abbildung 120). Auch der breite Einsatz von Regenwassertonnen kann zur Entlastung von kleinen Gewässern beitragen und könnte z.B. zur Entlastung des Burdenbachs in Boppard im Starkregenfall beitragen (vgl. Abbildung 119).

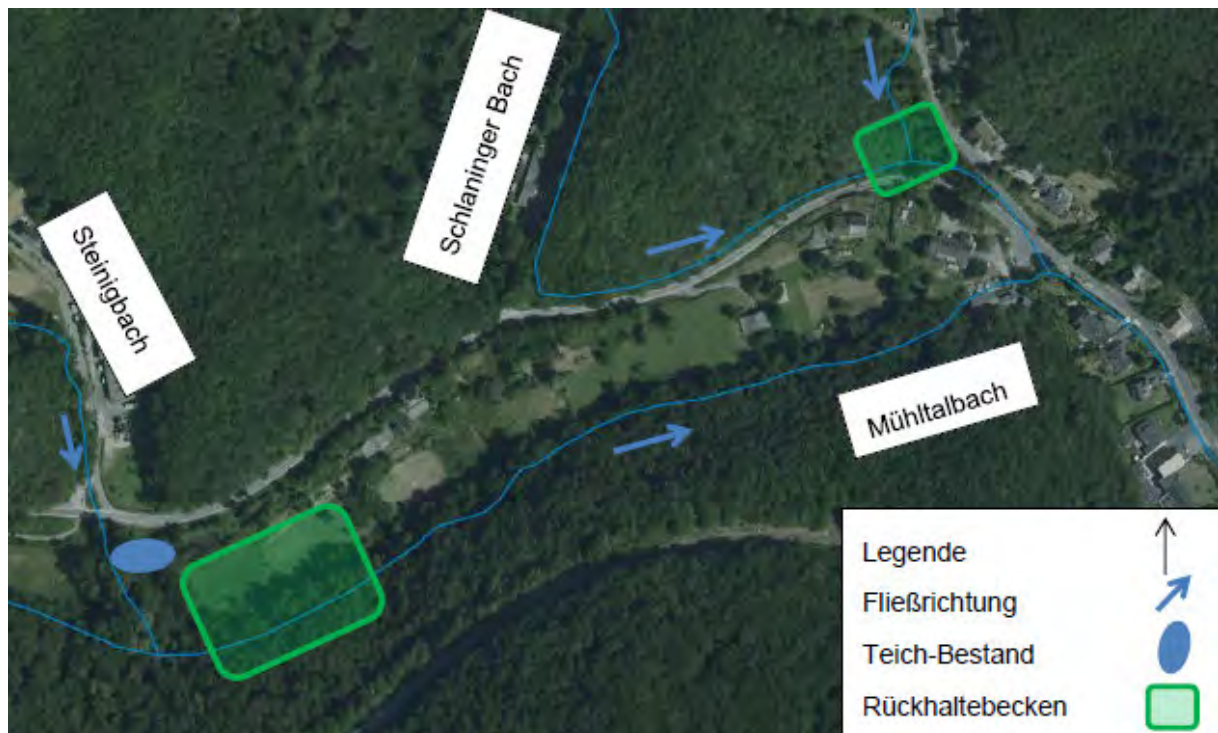


Abbildung 120 Boppard: Möglicher Retentionsraum (hier als „Rückhaltebecken“ bezeichnet) am Lohbach (Quelle: Hochschule Koblenz/Steffes 2020)

3. Maßnahmen bezogen auf das Überschwemmungsrisiko von Infrastruktur

Die Überschwemmung von Infrastruktur wie Gebäuden und Verkehrsachsen ist durch Hochwasser und Starkregen im Oberen Mittelrheintal nicht zu verhindern. Ein Schutz gegen größere Überschwemmungen ist finanziell und technisch nicht möglich, aber das Risikomanagement bezogen auf Flusshochwasser und Starkregenereignisse kann verbessert werden.

Überschwemmungen durch Flusshochwasser des Rheins sind in den ufernahen Ortslagen des Oberen Mittelrheintals relativ bekannt. Im Zuge der Umsetzung der EU Hochwassermanagementrichtlinie sind bereits viele Maßnahmen zum Hochwasserrisikomanagement erfolgt. Wichtig ist weiterhin die Anpassung der Infrastruktur im Abflussbereich des Rheins an Hochwasser sowie die Aufrechterhaltung des Bewusstseins bei der Bevölkerung. Das Obere Mittelrheintal könnte seine Sensibilisierung und Erfahrung zum Umgang mit **Rhein-Hochwasser** sogar **als Kultur-Merkmal** herausstellen: Über Hochwassertafeln oder Hochwasserwege kann aktiv an den Umgang mit Rhein-Hochwasser erinnert bzw. die Kompetenz des Tals herausgestellt werden, nach dem Motto „Wir können Rhein-Hochwasser- schon immer und immer wieder“.

HWP - HOCHWASSER-PASS		GEFAHRENLAGE OHNE MASSNAHMEN	DURCHGEFÜHRTE MASSNAHMEN	GEFAHRENLAGE NACH DEN MASSNAHMEN
OBJEKT:		Keine Geringe Mittlere Hoch		
PRIVAT: ☐ GEWERBLICH: ☐				
ANSCHRIFT STRASSE: _____ HAUSNR: _____ PLZ: _____				
GEBÄUDETP: _____				
UNTERKELLERUNG: NEIN: ☐ JA: ☐ TEIL: ☐ VOLL: ☐		Flusshochwasser	☐	☐
BAUJAHR: _____		Starkregen	☐	☐
GEBÄUDEFLÄCHE: _____		Kanalrückstau	☐	☐
GRUNDSTÜCKSFLÄCHE: _____		Grundhochwasser	☐	☐
SACHKUNDIGER: _____				
SK.N°: _____				
		ERLÄUTERUNG Für nachträgliche Bewertung		LAGEBEWERTUNG ERGEBNIS
		ORT: _____ AUFSTELLUNGSDATUM: _____ UNTERSCHRIFT: _____		☐

Abbildung 121 Hochwasser-Pass (Quelle: HKC)

Bei den Überschwemmungsgefahren durch Starkregen ist das Bild im Oberen Mittelrheintal heterogen: Die Verbandsgemeinde Loreley, zu der auch St. Goar gehört, steht kurz vor Abschluss eines Hochwasservorsorgekonzepts, wohingegen andere Orte des Mittelrheintals das Thema noch nicht systematisch aufgegriffen haben. Erfahrungen mit Starkregen haben schon viele Kommunen im Tal gemacht. Es wird empfohlen, für alle Kommunen **Hochwasservorsorgekonzepte** zu erstellen und sich dazu zu vernetzen. Bei diesen Prozessen können Maßnahmen des Starkregen-Risikomanagements diskutiert und priorisiert werden wie die Bauvorsorge, die Anpassung von Infrastruktur oder die Renaturierung von Fließgewässern. Eine private Vorsorge ist unabdingbar. Auch deshalb ist es wichtig, dass eine Sensibilisierung der Bevölkerung erfolgt, indem die Gefahren durch Starkregen kartiert und diskutiert werden z.B. mit Hilfe von Starkregengefahrenkarten. Außerdem sollte der Hochwasserpas bekannt gemacht und exemplarisch angewandt werden. Vorgeschlagen wird z.B. ein **Netzwerk „Starkregenvorsorge im Welterbe Oberes Mittelrheintal“**, damit die Kommunen von den Erfahrungen untereinander profitieren und darauf aufbauen können. Andere Maßnahmen sind möglich, indem die Feuerwehr oder andere Ortsgruppen das Thema in ihre Veranstaltungen integriert.



Abbildung 122 Boppard: Älteres Rechenbauwerk am Fraubach
(Foto: Hochschule Koblenz/Thomas Kaspar, Bernhard Steffes 2020)

Wichtiger Bestandteil der Vorsorge gegen Starkregen-Gefahren und Überschwemmungen infolge von Sturzfluten ist die Unterhaltung der kleinen Fließgewässer: Teilweise sind Rechen marode oder nicht vorhanden (vgl. Abbildung 122), was dazu führen kann, dass Schwemmgut die engen Einläufe in Verrohrungen zusetzt.



Abbildung 123 St. Goar: Lohbach, Bestehender Einlauf in die Verrohrung; Vorschlag des Einbaus eines Rechens (Hochschule Koblenz/ Gelhard, 2020)

Treibgutrechen im Oberlauf und neue Rechen an den Rohreinläufen können die Risiken reduzieren (vgl. Abbildung 124). Zur Reduktion von Überschwemmungsgefahren sind zahlreiche weitere Maßnahmen wie Ablauf-Rinnen in Straßen, Wallsysteme oder Hangmulden denkbar (vgl. z.B. IBH & WBW, 2013).

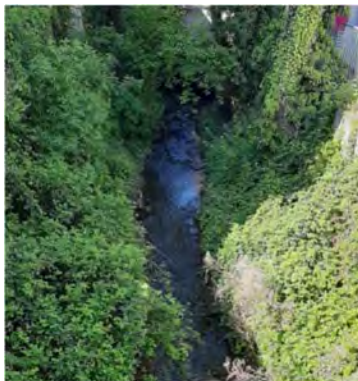


Abbildung 124 St. Goar: Bachbett Gründelbach, in das Treibgutrechen eingebaut werden könnten (Foto: Hochschule Koblenz/ Gelhard 2020); Einfacher Treibgutrechen zum Rückhalt von Ästen und Zweigen (IBH WBW 2013, Abb. 31)

4. Sensibilisierung der Bevölkerung durch Integration in laufende Dialoge

Das Obere Mittelrheintal ist wasserreich durch den Rhein und seine vielen kleinen Fließgewässer. Durch den Klimawandel ist es von Wetterextremen betroffen, die teilweise zunehmen werden- dazu zählen Starkregen, Hochwasser, aber auch Trockenheit und Dürre. Die Bevölkerung des Tals und seine Besucher sollten für diese Folgen sensibilisiert werden, damit Maßnahmen zur Klimaanpassung verstanden und mitgetragen werden.

Die Bundesregierung und die Bundesländer bieten Unterstützung bei der Sensibilisierung zu Klimawandelfolgen. Es fehlt teilweise an Zeit und Geld, um diese Unterstützung in die Orte gelangen zu lassen. Daher müssen die Sensibilisierungsmaßnahmen zur Klimawandel-Anpassung soweit möglich in bestehende Prozesse und Dialoge integriert werden.

Vorgeschlagen werden eine systematische Integration des Themas „Klimaanpassung“ in den Managementplan des Welterbes Oberes Mittelrheintal und in die Vorbereitung und Umsetzung

der Bundesgartenschau 2029. Dadurch sollten Maßnahmen wie die zu einzelnen Themenfeldern vorgeschlagenen „Hochwasserwege“, ein Projekt zu „Wilden Wasseradern“ oder auch die Schul-Box „Biodiv-Rhein“ in den folgenden Jahren umgesetzt werden. Parallel dazu sollten die Hochwasservorsorgekonzepte umgesetzt werden, durch die eine Sensibilisierung zu Starkregen und seinen Folgen ermöglicht wird.

5. Wasser zur Kühlung

Wasser ist das wichtigste Element, um Mensch und Natur Kühlung zu verschaffen. Es hat hier wesentlich mehr Potenzial als der Wind, weil es die Wärmeenergie zur Verdunstung entziehen kann. Deshalb ist es zentral, für kommende Hitzeperioden sowohl die Wasserverdunstung als auch den Zugang zu Wasser im Tal zu verbessern. Viele Vorschläge wurden bereits genannt und werden daher hier nur nochmal aufgezählt:

- Zugang zum Rhein ermöglichen, z.B. über Treppen oder seitliche Stillgewässer
- Bade- oder „Plansch“-Möglichkeiten schaffen an den kleinen Fließgewässern, über Teiche, Naturbäder, Schwimmbäder oder über Wasserspielplätze
- Nebelduschen oder Springbrunnen einplanen
- Zugang zu Trinkwasser über Wasserspender ermöglichen - für Gäste und Bewohner

6. Mögliche kommunale Maßnahmen zu Niedrigwasser und Trockenheit

Die dargelegten Handlungsmöglichkeiten zu Hochwasser, Starkregen, Renaturierungen und Überschwemmungen beziehen sich nur auf einen Teil der Klimawandelfolgen. Sie behandeln aber noch nicht systematisch die Folgen von Niedrigwasser und Trockenheit. Gerade längere Trockenzeiten bedeuten für die Wasserwirtschaft, dass der Bedarf für die Bewässerung steigen kann. Obwohl die Betroffenheit des Mittelrheintals nicht detailliert untersucht wurde, ist bereits jetzt deutlich, dass das Tal sich sowohl auf häufigere Niedrigwasserperioden als auch auf längere Trockenzeiten einstellen muss. Es soll nochmals betont werden, dass die Bundesländer wie auch die Wasserversorger die Folgen von längeren Trockenzeiten seit längerem genau untersuchen und entsprechende Vorsorge treffen (vgl. KLIWA, 2016). Hier seien also nur weitere Möglichkeiten genannt, was die Kommunen als Anpassungs-Maßnahmen in Betracht ziehen können.

Die Niedrigwasserperiode von 2018 hat deutlich die Verwundbarkeit des Tals gezeigt. Fährverbindungen sind ausgefallen, Treibstoffpreise sind angestiegen. Umgekehrt hat der Schiffsverkehr abgenommen und flachere Bereiche des Rheins sind zugänglich geworden. Die Orte des Tals müssen sich also v.a. auf die Möglichkeit einstellen, dass Fährverbindungen ausfallen. Mögliche Handlungsoptionen sind andere, flachere Boote der Fährunternehmen oder die Einrichtung von Wassertaxis. Auch Seilbahnen könnten die Talflanken trotz Niedrigwasser verbinden. Weitere Folgen von Niedrigwasser und dazu passende Handlungsoptionen müssten weiter untersucht werden.

Was die Auswirkungen der Trockenheit auf Grünstrukturen betrifft, so sollten Möglichkeiten der Bewässerung und die Anpflanzung von trockenheitsverträglichen Pflanzen geprüft werden. Bei der Bewässerung sollten unterschiedliche Konzepte untersucht werden, die auch die Wasserrückgewinnung einbeziehen. So können örtliche Grauwassernutzungen zu erheblichen

Wassereinsparungen beitragen. Grauwasser ist das Wasser, was für Reinigungszwecke in Duschen oder Waschmaschinen genutzt wurde. Beispiele für Wassereinsparungen durch Grauwassernutzung können Sportanlagen, Hotels oder größeren Wohnanlagen sein, deren angrenzende Grünanlagen mit Grauwasser bewässert werden. Auch die systematische Speicherung und Nutzung von Regenwasser kann für Grünflächen ein großes Potenzial bieten. Möglicherweise bieten sich im Oberen Mittelrheintal in den Höhenorten Speichermöglichkeiten, die dann im „trockenen“ Tal genutzt werden können. Hier könnte sogar noch ein Potenzial für die Gewinnung von nachhaltiger Energie durch Kleinwasserkraft bestehen, wenn Wasser von den Höhenlagen ins Tal strömt.

6.3 MAßNAHMEN ZUR OFFENHALTUNG UND ZUM SCHUTZ DES BODENS - HANDLUNGSMÖGLICHKEITEN ZUR VERRINGERUNG UND KOMPENSATION VON BODENVERSIEGELUNGEN

Versiegelungen von Böden gilt es zu vermeiden und dort wo es nicht zu unterlassen ist, entsprechend gering zu halten und zu kompensieren. Ein konkretes Flächenmanagement inklusive den planerischen Voraussetzungen wie die Erhebung und Bereitstellung von Flächendaten zu detaillierten bzw. flächenscharfen Angaben der Flächennutzung und zum Grad der Bodenversiegelung obliegt den Gemeinden. Die Bundesländer Hessen und Rheinland-Pfalz haben Rahmenkonzepte für den vorsorgenden Bodenschutz bereitgestellt, damit die Gemeinden entsprechende Maßnahmen ergreifen und umsetzen können. Das „Directorate-General for Environment“ der Europäischen Kommission empfiehlt ein Vorgehen nach einem dreistufigen Ansatz, der auf dem Prinzip der Vorbeugung, Begrenzung und Entschädigung beruht:

- Stufe 1: Verhinderung der Bodenversiegelung
- Stufe 2: Bodenversiegelung so weit wie möglich begrenzen
- Stufe 3: Bodenverluste (durch Bodenversiegelung) kompensieren

Darüber hinaus sollten jedoch unbedingt auch immer Möglichkeiten geprüft werden, um bestehende versiegelte Flächen zu entsiegeln, d.h. zum Beispiel durch Schaffung geeigneter Planungsgrundlagen (z.B. für Kompensationsmaßnahmen) wie einem Kataster zur Bereitstellung von Flächen mit Entsigelungspotenzialen (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen [LANUV], 2017).

1. Bodenversiegelung begrenzen

Die Begrenzung der Bodenversiegelung kann grundsätzlich auf zweierlei Weise erfolgen: entweder durch eine Verringerung des Flächenverbrauchs, d. h. durch eine Reduzierung der Umwandlung bislang weiterer unerschlossener, landwirtschaftlicher oder natürlicher Flächen in Siedlungsgebiete oder durch eine Beschränkung auf die bereits bebaute Fläche, d.h. durch die Nutzung ohnehin bereits erschlossener Flächen. Eine Maßnahme zur Verringerung der Flächeninanspruchnahme und zur Stärkung der Innenentwicklung, ist die sog. Innenverdichtung, d.h. es sollen innerstädtische Flächen verstärkt für eine bauliche Nachnutzung aufbereitet werden. Allerdings sollten geeignete Flächenreserven im innerstädtischen Bereich im Hinblick auf die Bereitstellung urbaner Grün- und Wasserflächen (Strategien des *urban green* und *urban blue*) gezielt für Maßnahmen der Klimaanpassung eingesetzt werden. Dieser integrierte Ansatz wird auch als „doppelte Innenentwicklung“ in der Stadtplanung bezeichnet. Eine genauere

Übersicht zu Maßnahmen der Begrenzung von Bodenversiegelung gibt die „Leitlinie für bewährte Praktiken zur Begrenzung, Milderung und Kompensierung der Bodenversiegelung“ (EC, 2012b).

2. Bodenversiegelung mildern

Versiegelte Flächen sollten mit der Versiegelung von Böden einhergehenden Maßnahmen weitgehend nachhaltig gestaltet werden. Das bedeutet eine Versiegelung zu minimieren und somit Versickerung zu ermöglichen (Teilversiegelungen sind zu priorisieren). Solche Maßnahmen können als Milderung der Bodenversiegelung bezeichnet werden. Einige Beispiele aus der Praxis werden im Folgenden gegeben (vgl. EC, 2012b):

Verwendung wasserdurchlässiger Materialien und Oberflächen: wasserdurchlässige Materialien können zur Erhaltung der Verbindung zwischen der Oberfläche und tiefer liegenden Bodenschichten beitragen, die Menge des ablaufenden Oberflächenwassers verringern und das Versickern einer größeren Regenwassermenge in die tieferen Bodenschichten ermöglichen. Wasserdurchlässige Materialien fördern die Verdunstung, die wiederum ein entscheidender Faktor für die Kühlung städtischer Gebiete und die Vermeidung städtischer Wärmeinseln ist. Beispiele für solche Materialien und Oberflächen sind: Wassergebundene Decken, Drainbeläge wie Steinteppiche oder Epoxidharzbeläge, Schotterrasen, Rasengittersteine, Kunststoff- Wabengitter oder wasserdurchlässige Pflastersteine (siehe Abbildung 45 auf Seite 52).

Grüne Infrastruktur: Grüne Infrastrukturen mit Bezug zur Minderung der Bodenversiegelung können die Wasserversickerung ermöglichen sowie in der vorherigen Menge aufrechterhalten oder sogar erhöhen. Letzteres ist verbunden mit einem entsprechenden Flächenmanagement zur Aufbereitung und/oder Speicherung des Wassers und/oder zur kontrollierten Abgabe an die Kanalisation.

Wasserauffangsysteme: Das Wasser wird möglichst lange dort gebunden, wo es auf den Boden gelangt. Die Verwendung hochporöser Materialien und Oberflächen kann dabei hilfreich sein. Wenn das Wasser nicht einsickern kann, besteht das Ziel darin, den Wasserablauf so zu verzögern, dass Ablaufspitzen und anschließende Überschwemmungen vermieden werden. Das lokale Mikroklima profitiert ebenfalls von einer verbesserten Verdunstung, unabhängig davon, ob diese aus Teichen, nassem Boden oder dem Bewuchs stammt. Maßnahmen umfassen weiterhin die Errichtung flacher Becken, die Regenwasser aus der Umgebung auffangen, sowie die unterirdische Filtration unter Verwendung von Rohren, Sickerschächten oder Kiesflächen, die ebenfalls als vorübergehende Speicher dienen können. Wasserauffangbecken oder – im kleineren Maßstab – Haushaltszisternen werden häufig als Hilfsmittel zum Sammeln von Regenwasser gewählt; das aufgefangene Wasser wird dann für die Gartenbewässerung oder anstelle von Trinkwasser für die Toilettenspülung verwendet.

3. Kompensation von Bodenversiegelung

Kompensation meint hier nicht, dass die Versiegelung durch Ersatzmaßnahmen an anderer Stelle gleichwertig aufgewogen werden könnte. Geeignete Flächen für die Durchführung von Kompensationsmaßnahmen sind begrenzt, und da Bodenfunktionen boden- und standortspezifisch sind, müssen zahlreiche Einschränkungen hingenommen werden. Wichtig ist vor allem, dass die Kompensierung tatsächlich den verlorenen Ökosystemfunktionen entspricht und mit diesen in Zusammenhang steht. Außerdem sollten die Maßnahmen spätestens zum Zeitpunkt der geplanten Eingriffe oder sogar vorher durchgeführt werden. Das Ziel besteht darin, die Gesamtkapazität der Böden in einem bestimmten Gebiet zu erhalten oder wiederherzustellen,

damit die Böden diese Funktionen (weitgehend) erfüllen können. Kompensationsmaßnahmen sind also darauf ausgelegt, Bodenfunktionen wiederherzustellen oder zu verbessern, um größere negative Auswirkungen von Bodenversiegelungen zu vermeiden.

Wiederverwendung von Oberboden: Oberboden ist der oberste Horizont eines Bodens mit der organischen Auflage (Humusschicht). Oberboden, der im Rahmen der Vorbereitung eines Standorts für den Gebäude- oder Straßenbau abgetragen wird, kann an anderer Stelle wiederverwendet werden.

Entsiegeln: Entsiegelung ist die Wiederherstellung eines Teils des früheren Bodenprofils durch Entfernen der Versiegelungsschichten (wie Asphalt oder Beton), Lockern des darunterliegenden Bodens, Entfernen von Fremdstoffen und Wiederherstellen des ursprünglichen Profils. Das Ziel besteht darin, eine wirksame Verbindung mit dem natürlichen Unterboden wiederherzustellen. Unter Umständen muss an anderer Stelle abgetragener Oberboden verwendet werden, um die Qualität des Bewurzelungssubstrats zu verbessern, oder es müssen bestimmte Stoffe zugesetzt werden, um die Bodenbildung zu fördern. Bei ordnungsgemäßer Durchführung kann eine Entsiegelung eine erhebliche Wiederherstellung der Bodenfunktionen bewirken. Hierzu müssen der Kommune entsprechende Kenntnisse zu Entsiegelungspotenzialen vorliegen.

Entsiegelungspotenziale sind Flächen des Innen- und Außenbereichs, deren natürliche Bodenfunktionen aufgrund von Versiegelungen nicht mehr oder nur noch eingeschränkt zur Verfügung stehen und für die entweder dauerhaft keine bauliche Nutzung mehr vorgesehen ist oder deren Nutzung durch eine (Teil-)Entsiegelung bestehen bleiben kann. Eine Realisierung von Entsiegelungsmaßnahmen ist erst dann möglich, wenn Entsiegelungsflächen bekannt, hinsichtlich ihrer Eignung geprüft und unmittelbar in einem Entsiegelungsflächenkataster abrufbar sind. Die Identifizierung prioritär geeigneter Flächen mit Entsiegelungspotenzial setzt eine Abwägung bestehender Restriktionen und Hemmnisse sowie der Flächenverfügbarkeit mit der jeweils im Einzelfall zu erzielenden ökologischen Wirkung voraus.

Entsiegelungspotenziale bieten (vgl. Tabelle 13):

- Straßenverkehrsflächen (Straßen, Wege, Parkplätze, Haltestellen)
- Bahnverkehrsflächen (Gleisstraßen, Bahnhöfe, Bahnbetriebsflächen)
- Öffentliche Plätze (Fest-, Marktplätze) und Fußgängerzonen
- Schulhöfe, versiegelte Flächen in Kindergärten/-tagesstätten
- Grün- und Sportanlagen
- Siedlungs- und Gewerbebrachen, Konversionsflächen
- Infrastruktureinrichtungen
- Bauliche Anlagen im Außenbereich

Tabelle 13 Entsiegelungspotenziale in Kern-, Misch-, Wohn-, Gewerbe- und Industriegebieten sowie im Bereich von Hauptverkehrszügen. (Quelle: LANUV, 2017)

Kriterien	Entsiegelungspotenziale
Kern-, Misch- und Wohngebiete	• Verkleinerung von Hauszufahrten und Zuwegungen • Rückbau bzw. Teilentsiegelung von Hofflächen • Parkplatzbegrünung • Teilentsiegelung von Terrassen • Entsiegelungen von Aufenthalts- und Freizeitbereichen (z.B. Wohnblöcke, Quartiere).
Gewerbe- und Industriegebiete	• Teilentsiegelung von Mitarbeiterparkplätzen (Lkw-Park- und Rangierplätze müssen vollversiegelt bleiben). • Begrünungsmaßnahmen (z.B. Baumscheiben, Rabatte) in Rand- und Mittelbereichen von Parkplätzen, Straßen oder Betriebsflächen mit geringer Nutzungsintensität. • Entsiegelung und naturnahe Gestaltung von Teilflächen, die nicht mehr benötigt werden (z.B. Projekt des WILA Bonn „Grün statt Grau – Gewerbegebiete im Wandel“).
Hauptverkehrszüge	• Querschnittsminderung überdimensionierter Straßen (RASt 06) • Belangänderung bei Straßen geringer Nutzungsintensität • Rückbau versiegelter Mittel- und Seitenstreifen • Begrünungen von Verkehrsinseln

Weitere eher indirekte Maßnahmen stellen die folgenden (Kompensations-) Instrumente dar (vgl. EC, 2012a): Ökokonten und Handel mit Entwicklungszertifikaten; Versiegelungsgebühr. In einem Positionspapier der ARL werden weitere mögliche Instrumente der Steuerung zur Flächeninanspruchnahme vorgeschlagen (Akademie für Raumforschung und Landesplanung [ARL], 2018).

6.4 MAßNAHMEN ZUR SICHERSTELLUNG UND VERBESSERUNG VON KALTLUFTENTSTEHUNGSGEBIETEN UND -BAHNEN

Um die Kaltluftströmungen beizubehalten sollten innerhalb der Täler keine Bauwerke errichtet werden, welche relevante Kaltluftbahnen unterbrechen oder verringern könnten. Auch für die Nebentäler ist dies zu empfehlen. Da die Kaltluftversorgung überwiegend über steile, bewaldete Tallagen erfolgt, ist aber davon auszugehen, dass auch zukünftig keine wesentliche Gefährdung dieser Kaltluftversorgung eintreten wird. Denn aufgrund der überwiegend sehr steilen topografischen Verhältnisse ist eine Bebauung über die bereits vorhandenen baulichen Strukturen hinaus (z.B. durch neue Baugebiete) nicht zu erwarten.

Lokale Gegebenheiten, welche nicht auf den Karten in Kapitel 5 dargestellt werden konnten, sind zu beachten und vor Ort zu bewerten, z.B. durch detaillierte Messungen bzw. Modellierung. Innerhalb der Städte und Dörfer kann durch Grünflächen und Gebäudebegrünung, z.B. an Hausfassaden oder auf Hausdächern, die lokale Kaltluftentstehung gefördert werden. Besonders für größere Gebiete wie in St. Goar - Biebrichheim, wo es keine nennenswerten Kaltluftschneisen gibt, ist dies eine Möglichkeit für eine lokale Abkühlung. Weiterhin sollten die zur Kaltluftentstehung maßgeblich beitragenden Wälder in der Umgebung erhalten bleiben, was

insbesondere bei Klimawandel und zunehmenden Trocken- und Insektenschäden eine Herausforderung darstellt. Innerhalb vom Rheinwirkungsbereich besteht hingegen kaum Handlungsbedarf an fördernden Kaltluftmaßnahmen. Es ist außerdem sehr empfehlenswert besonders für die berechneten Risikobereiche der untersuchten Städte zusätzlich eine genauere 3D Modellierung des Kaltluftabflusses durchzuführen, um die Anpassungsmaßnahmen effizienter planen zu können.

7 STEUERUNGSTRUMENTE UND FÖRDERMÖGLICHKEITEN

7.1 STEUERUNGSTRUMENTE

Steuerungsinstrumente sind rechtlich festgesetzte Planungsinstrumente der Raumordnung (Gestaltungs- und Ordnungsrahmen), welche die Landes- und Regionalentwicklung der Bundesländer gewährleisten. Dabei handelt es sich zumeist um Planwerke mit textlichen Erläuterungen. Dazu zählen:

- **Landesentwicklung Hessen** (<https://landesplanung.hessen.de/>) und **Rheinland-Pfalz (RLP)** (<https://ris.rlp.de>)

Hessen: Landesentwicklungsplan (2000) mit zurzeit vier Änderungsverfahren (2020)

RLP: Landesentwicklungsprogramm (2008) mit zurzeit drei Fortschreibungen (2017)

- **Regionale Raumordnungspläne**

Hessen:

- Regionalverband Südhessen (RP Darmstadt)
 - <https://rp-darmstadt.hessen.de/planung/regionalplanung/regionalplan-suedhessen>

Rheinland-Pfalz:

- Planungsgemeinschaft Mittelrhein-Westerwald
 - <https://mittelrhein-westerwald.de/>
- Planungsgemeinschaft Rheinhessen-Nahe
 - <http://www.pg-rheinhessen-nahe.de/>

7.2 FÖRDERMÖGLICHKEITEN

Auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene bestehen verschiedene Fördermöglichkeiten, um die Anpassung an den Klimawandel in Kommunen zu finanzieren – mit Anpassungskonzepten, der Förderung von Personalmitteln und Dienstleistungen sowie investiven Maßnahmen für die Umsetzung. Dabei gibt es Programme, bei denen die Klimafolgenanpassung selbst im Vordergrund steht. Aber auch für einzelne Handlungsfelder der Klimafolgenanpassung stehen entsprechende Förderprogramme zur Verfügung.

Übergeordnete Programme

- Dorferneuerung: Bauliche Infrastrukturen; Anteilsfinanzierung mit Höchstbetragsregelung (keine Anhäufung mit Bundesmitteln); Zuständig: Bundesländer
- Städtebauförderung: verschiedene Programmlinien, vor allem grüne Infrastruktur; Zuschuss (Förderbetrag mindestens 100.000 Euro); Zuständig: Bundesländer
- Programm „Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels“ (Bund); Zuschuss mit angemessener Eigenbeteiligung; Projektträger/Ansprechpartner: ZUG (Zukunft Umwelt Gesellschaft):
 - Förderschwerpunkt 1: Anpassungskonzepte für Unternehmen

- Förderschwerpunkt 2: Entwicklung von Bildungsmodulen zu Klimawandel und Klimaanpassung
- Förderschwerpunkt 3: Kommunale Leuchtturmvorhaben sowie Aufbau von lokalen und regionalen Kooperationen
- Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten im kommunalen Umfeld „Kommunalrichtlinie“; Zuwendung; Projektträger/Ansprechpartner: Jülich
- Förderung von Hochwasser- und Starkregenkonzepten
 - Rheinland-Pfalz fördert örtliche Hochwasser- und Starkregenvorsorgekonzepte mit 90%. Außerdem stellt das Land den Verbandsgemeinden und Städten Starkregengefährdungskarten zur Verfügung, aus denen nach Prüfung geeignete Maßnahmen zur Minderung des Starkregenrisikos abgeleitet werden können. Im Mittelrheintal sind Koblenz und die Verbandsgemeinde Loreley dabei, solche Konzepte zu erstellen (Manthe-Romberg, 2020).
 - In Hessen werden Klimaanpassungsmaßnahmen mit 59-80% gefördert. Zusätzlich können über die Klimaanpassungsmittel des Bundes Klimaanpassungsmaßnahmen mit 50-70% gefördert werden (HLNUG, 2018).

Oft ist eine Kombination verschiedener Fördermittelgeber im Rahmen einer Gesamtfinanzierung sinnvoll oder sogar notwendig, um den Eigenanteil des Projektträgers bestmöglich zu reduzieren oder vollständig aufzubringen. So können Förderprojekte der DBU beispielsweise durch Landes- oder EU-Mittel (aber nicht Bundesmittel), andere Stiftungen, Mittel aus der naturschutzrechtlichen Kompensation von Eingriffen oder durch Agrarumweltmaßnahmen kofinanziert werden.

Fördermittelgeber

- Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU): fördert neben ihrem umwelttechnischen Schwerpunkt maßgeblich auch Projekte des Naturschutzes, der nachhaltigen Landnutzung, der Umweltbildung und Umweltkommunikation. Notwendig ist eine bundesweite Modellhaftigkeit und Übertragbarkeit. Gefördert werden meist 50 % der Kosten, in Ausnahmefällen ist die Förderquote höher. Antragstellung ist jederzeit möglich. Die Laufzeit geförderter Projekte beträgt maximal vier, z.T. fünf Jahre; eine spätere kostenneutrale Verlängerung um bis zu ein Jahr ist möglich. Projekte mit bis zu 125.000 € Förderung werden in einem vereinfachten Verfahren nach externer Begutachtung durch den Generalsekretär bewilligt; größere Projekte entscheidet das Kuratorium. www.dbu.de
- Bundesprogramm Biologische Vielfalt (beim Bundesamt für Naturschutz): Gefördert werden Vorhaben, denen im Rahmen der Nationalen Strategie zur Biologischen Vielfalt eine gesamtstaatlich repräsentative Bedeutung zukommt oder die diese Strategie in besonders beispielhafter und maßstabsetzender Weise umsetzen. An der Durchführung der Vorhaben muss ein erhebliches Bundesinteresse bestehen. Die geförderten Maßnahmen sollen dazu beitragen, den Rückgang der biologischen Vielfalt in Deutschland zu stoppen und mittel- bis langfristig in einen positiven Trend umzukehren. Sie müssen dem Schutz und der nachhaltigen Nutzung sowie der Entwicklung der biologischen Vielfalt dienen und über die rechtlich geforderten Standards hinausgehen. Akzeptanzbildende Maßnahmen der Information und Kommunikation sollen dazu beitragen, das gesellschaftliche Bewusstsein für die biologische Vielfalt zu stärken. Das Programm soll die Kooperation unterschiedlicher Akteure bei der Umsetzung der Ziele der Nationalen Strategie fördern. Der Bund gibt 75 %, das Land o.a. 15 %, der Träger soll i.d.R. 10 % der Kosten einbringen. Anträge sind jederzeit möglich. www.biologischevielfalt.de/bundesprogramm.html. Es bestehen 4 Förderschwerpunkte:

- Ökosystemleistungen
- Verantwortungsarten
- Hot Spots der Biodiversität
- Weitere herausragende Projekte
- Umweltforschungsplan (beim Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, BMU via BfN): Es werden Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (F+E-Vorhaben) im Themenbereich Naturschutz und Ökologie vergeben, die Entscheidungsgrundlagen und -hilfen für die Naturschutz- und Umweltpolitik der Bundesregierung liefern sollen. Das Procedere ist eher schwierig – spätestens ein Jahr vor Veröffentlichung des Ufoplane sind Projektskizzen einzureichen. Im Falle einer Aufnahme in den Ufoplan erfolgt eine Ausschreibung für Interessensbekundungen; aus diesen werden dann besonders geeignet erscheinende Bieter zur Abgabe eines Angebots aufgefordert. Anwendungsnahe Forschung und Forschung in Verbindung mit Wirtschaftsförderung steht im Vordergrund. <https://www.bfn.de/foerderung/ufoplan-f-e-vorhaben.html>
- Erprobungs- und Entwicklungsvorhaben (beim Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, BMU via BfN): Mit E+E-Vorhaben sollen Erfolg versprechende Naturschutzideen realisiert und wichtige Forschungsergebnisse in die Naturschutzpraxis umgesetzt werden. Sie dienen der beispielhaften Erprobung und Weiterentwicklung neuer Methoden und Verfahren im Naturschutz. Der Fördertitel des BMU soll konzeptionelle Vorstellungen des Bundes zur Naturschutzpolitik beispielhaft demonstrieren, in der Praxis weiterentwickeln und so die Entscheidungsgrundlagen für die künftige Arbeit verbessern. Der Fördertitel wird fachlich und administrativ vom BfN betreut. E+E-Vorhaben sollen zur Erhaltung der biologischen Vielfalt beitragen. Von besonderer Bedeutung sind dabei Projekte, die Schutz- und Nutzaspekte zusammenführen. Förderkriterien sind Bundesinteresse, Neuartigkeit, Modellcharakter sowie Naturschutzzielsetzung. Separat beantragt und bearbeitet werden eine Voruntersuchung (nur bei Bedarf, bis 100 % Förderung), Hauptvorhaben als der praktische und zentrale Baustein des E+E-Vorhabens (bis zu 2/3 der Kosten gefördert) sowie wissenschaftliche Begleitung (zu 100 % gefördert). <https://www.bfn.de/foerderung/e-e-vorhaben.html>. Die Förderschwerpunkte und beispielhaften Lösungsansätze erstrecken sich auf die Bereiche:
 - Artenvielfalt bewahren: Wiedereinbürgerung und Schutz hochgradig gefährdeter Tiere und Pflanzen
 - Biotope schützen: Erhaltung, Wiederherstellung und Vernetzung wertvoller Lebensräume
 - Naturschutzgerechte Regionalentwicklungen anstoßen: Naturschutzgerechte Land-, Forst- und Wasserwirtschaft
 - Ökologische Stadterneuerung stärken: Naturschutzgerechte Entwicklung urbaner Räume.
 - Gesellschaftliche Akzeptanz für den Naturschutz steigern: Kommunikations-, Informations- und Partizipationsmodelle
 - Dem Klimawandel begegnen: Naturschutzmaßnahmen zum aktiven Klimaschutz
- Weitere Förderschwerpunkte durch das Bundesamt für Naturschutz kommen für das hier erarbeitete Rahmenkonzept bzw. einem möglicherweise folgenden Projekt in der untersuchten Gebietskulisse eher nicht in Frage, sollen aber zumindest genannt werden:
 - Naturschutzgroßprojekte
 - Verbändeförderung
- (Umwelt-)Stiftungen: Neben der DBU kommen weitere national fördernde Stiftungen infrage – notwendig nachzuweisen ist jeweils eine bundesweite Vorbildhaftigkeit der Projekte. Vor allem zu nennen sind folgende:

- Allianz Umweltstiftung <https://umweltstiftung.allianz.de/>
- Gregor Louisoder Umweltstiftung <https://www.umweltstiftung.com/>
- LIFE (L'Instrument Financier pour l'Environnement): LIFE - Climate action sub-programme: Zwei Schwerpunkte: climate change mitigation; climate change adaptation. Zum Schwerpunkt Klimawandelanpassung: Das LIFE-Programm kofinanziert Projekte in den Bereichen Widerstandsfähigkeit gegen Wasserknappheit, Dürren, Waldbrände oder Überschwemmungen, adaptive Technologien für Wirtschaftssektoren und Schutz natürlicher Ressourcen. Sie stellt Aktionszuschüsse für Best-Practice-, Pilot- und Demonstrationsprojekte bereit, die zu einer erhöhten Widerstandsfähigkeit gegen den Klimawandel beitragen. Die Europäische Kommission ist insbesondere auf der Suche nach Technologien und Lösungen, die während der Projektlaufzeit unter marktnahen Bedingungen in industriellem oder kommerziellem Maßstab umgesetzt werden können. Das Teilprogramm Klima fördert auch die Entwicklung und Umsetzung der EU-Politik zur Anpassung an den Klimawandel, bewährte Praktiken und Lösungen für die Anpassung an den Klimawandel, einschließlich ökosystembasierter Ansätze und des Wissensaustauschs. Projekte erhalten eine Kofinanzierung von bis zu 55%. <https://ec.europa.eu/easme/en/section/life/life-climate-action-sub-programme>

Es sei noch auf das europäische Förderprogramm INTERREG bzw. Europäische Territoriale Zusammenarbeit (ETZ) verwiesen. Hier werden aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) grenzüberschreitende Maßnahmen der Zusammenarbeit unterstützt.

Rheinland-Pfalz hat für Kommunen ein Anpassungsportal im Internet eingerichtet: <http://www.kwis-rlp.de/de/anpassungsportal/fuer-staedte-und-kommunen/>. Es bietet eine Zusammenstellung grundlegender Aspekte für die Entwicklung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel. **Wichtig:** Kommunen in Rheinland-Pfalz erhalten eine Unterstützung durch den KlimawandelAnpassungsCOACH (Laufzeit (April 2018 – März 2021). In dem BMU-geförderten Projekt werden Kommunen über jeweils 6 Monate zum Thema Anpassung an die Folgen des Klimawandels beraten, auf ihrem Weg zur Anpassung begleitet und bei der Integration des Themas in Verwaltungsabläufe unterstützt.

Fachbezogene Programme

Klimaschutz und Klimaanpassung

- Kommunale Klimaschutz-Modellprojekte: Schwerpunkt Klimaschutz (weniger Klimaanpassung), aber Programm spricht auch Infrastrukturen an; Zuwendung

Wasserwirtschaft

- Förderrichtlinie Hochwasserrisikomanagement und Wasserrahmenrichtlinie; Zuständig: RP (Hessen), siehe Förderrichtlinie der Wasserwirtschaft (RLP; https://mueef.rlp.de/fileadmin/mulewf/Publikationen/Foerderrichtlinien_der_Wasserwirtschaftsverwaltung_2018.pdf)
- LIFE Programm; Zuwendung; Projektträger/Ansprechpartner: ZUG (Zukunft Umwelt Gesellschaft)
- Aktion BlauPlus: Förderung der Renaturierung von Fließgewässern im Rahmen der mit 90 % (Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz Abteilung Wasserwirtschaft [MULEWF RLP], 2015); in Natura 2000 Ge-

bieten ist eine 100%ige Förderung möglich. Weiterführende Informationen zu Gewässerrenaturierungen gibt die neue Informationsplattform des Umweltbundesamtes (UBA, 2020b).

Grüne Infrastruktur / Forst

- Bund: Zukunft Stadtgrün; Lebendige Zentren
- RLP: Verschiedene (s. <https://www.gruen-in-die-stadt.de/foerdercheck/rheinland-pfalz>)
- Hessen: „Hessen aktiv: Die Klima-Kommunen“ (<https://www.gruen-in-die-stadt.de/foerdercheck/hessen/klimaschutzprojekte>)
- Waldklimafond: Zuwendung; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR)

Kommunen

Kompensationsverordnung: Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen

Weiterführende Informationen

RLP: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/anpassung-an-den-klimawandel/anpassung-auf-laenderebene/bundesland-rheinland-pfalz>

Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen <http://www.klimawandel-rlp.de>

Hessen: <https://umwelt.hessen.de/klima/foerderung>

Fachzentrum Klimawandel und Anpassung Hessen <https://www.hlnug.de/themen/klimawandel-und-anpassung>

Interessante Informationen, Hilfestellungen und Beratungsangebote für Kommunen

Das Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (KomPass) im Umweltbundesamt (UBA) hält verschiedene Angebote bereit:

- Klimalotse: Der Klimalotse ist ein Online-Leitfaden, der Kommunen bei der Erstellung eigener Anpassungskonzepte unterstützt.
- KomPass-Tatenbank: Erfolgreich umgesetzte Maßnahmen und Projekte von Kommunen und anderen gesellschaftlichen Akteuren werden in der KomPass-Tatenbank vorgestellt und dienen als Best-Practice-Beispiele.
- Checkliste mit Erfolgsfaktoren: Eine Checkliste mit Erfolgsfaktoren soll Initiatoren und Beteiligte dazu befähigen, Beteiligungsprozesse zur Klimaanpassung erfolgreich umzusetzen.
- Themenblätter: KomPass stellt Informationen zu Klimarisiken und Anpassungsoptionen in Form von Themenblättern bereit.

- Veranstaltungen für Kommunen: KomPass führt verschiedene Veranstaltungen zum Thema durch, wie zum Beispiel nationale Dialoge, Kooperationsbörsen oder kommunale Workshops. Unter „Aktuelles“ finden Sie aktuelle Termine.
- Projekte & Forschungsvorhaben: KomPass setzt in verschiedenen Kommunen unterstützende Netzwerkprojekte und Forschungsvorhaben um. Alle Projekte finden sich im KomPass-Projektkatalog.

8 Anhang

8.1 ABBILDUNGEN UND TABELLEN



Abbildung 125 Kleine Fließgewässer, die dem Rhein von Boppard bis St. Goar zufließen- samt der Tiefenlinien
(Quelle: LGB RLP, 2017 – Ausdruck 04-2020, 1:100.000 im Originaldruck).

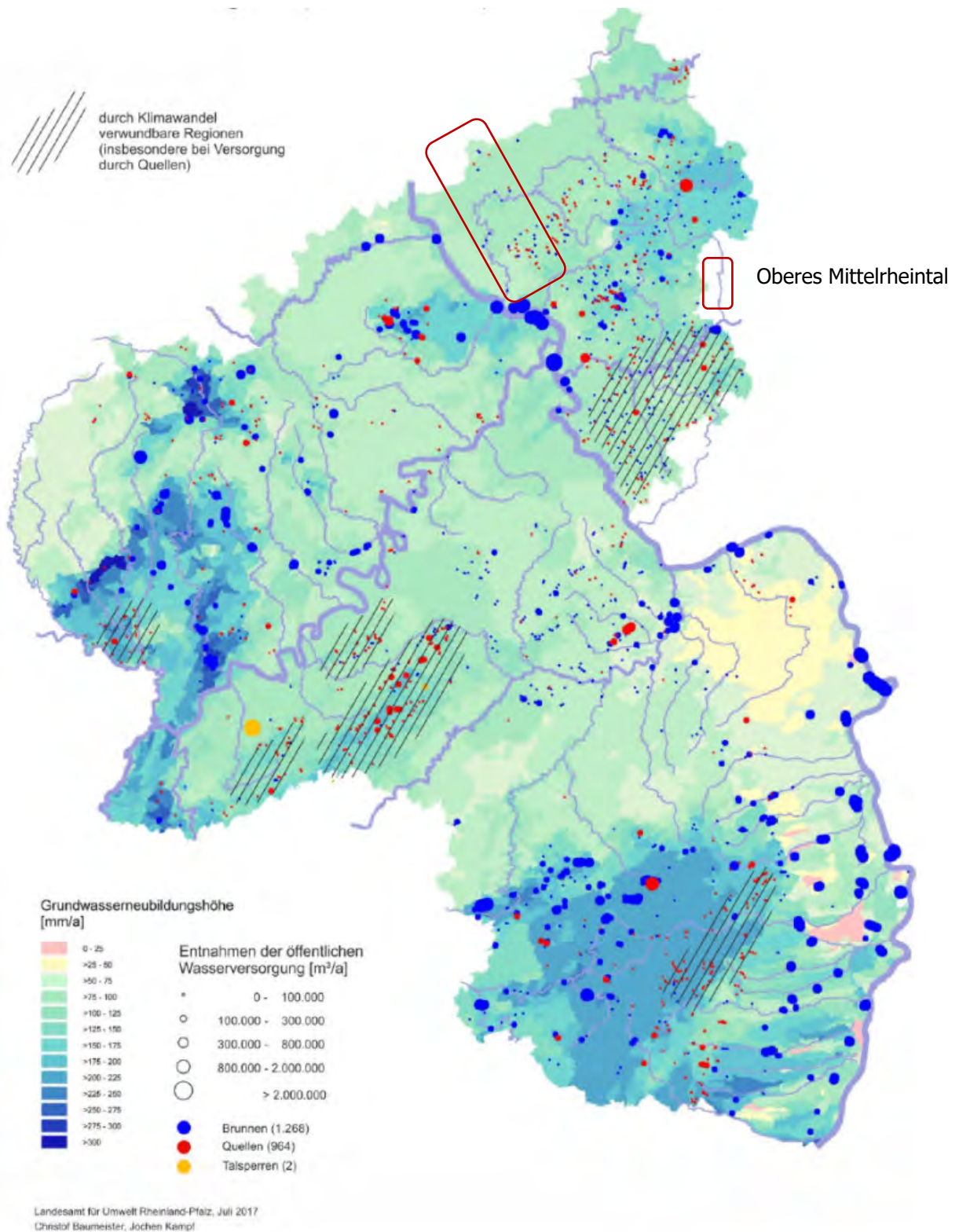


Abbildung 126: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung und Entnahmen durch die öffentliche Wasserversorgung in Rheinland-Pfalz (Quelle: MUEEF RLP, 2018, S. 10).

Tabelle 14 Jetzige Anzahl der Tropennächte sowie die Klimaänderungssignale für die nähere und ferne Zukunft an drei Stationen im Mittelrheintal.

Gegenwart								
Bacharach über 20°C			Oberwesel über 20°C			Boppard über 20°C		
	Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr
2004-2019	581	38,73	2013-2019	274	45,67	2004-2019	686	45,73
Klimaänderungssignal								
CLM_C20A1B_1_TMIN über 20°C (Tropennacht)			CLM_C20A1B_2_TMIN über 20°C (Tropennacht)			CLM_C20B1_1_TMIN über 20°C (Tropennacht)		
	Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr
1971-2000	11	0,37	1971-2000	8	0,27	1971-2000	11	0,37
2021-2050	41	1,37	2021-2050	30	1,00	2021-2050	32	1,07
2071-2100	237	7,90	2071-2100	187	6,23	2071-2100	97	3,23
Diff 2021-2050-1971-2000	30	1,00	Diff 2021-2050-1971-2000	22	0,73	Diff 2021-2050-1971-2000	21	0,70
Dff 2071-2100-1971-2000	226	7,53	Dff 2071-2100-1971-2000	179	5,97	Dff 2071-2100-1971-2000	86	2,87
CLM_C20B1_2_TMIN über 20°C (Tropennacht)			TMIN_WETTER_rcp85 über 20°C (Tropennacht)			TMIN_MIROC_rcp85 über 20°C (Tropennacht)		
	Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr
1971-2000	8	0,27	1971-2000	1	0,03	1971-2000	35	1,17
2021-2050	35	1,17	2021-2050	6	0,20	2021-2050	278	9,27
2071-2100	93	3,10	2071-2100	111	3,70	2071-2100	905	30,17
Diff 2021-2050-1971-2000	27	0,90	Diff 2021-2050-1971-2000	5	0,17	Diff 2021-2050-1971-2000	243	8,10
Dff 2071-2100-1971-2000	85	2,83	Dff 2071-2100-1971-2000	110	3,67	Dff 2071-2100-1971-2000	870	29,00
TMIN_Wetter_rcp26 über 20°C (Tropennacht)			TMIN_REMO über 20°C (Tropennacht)			TMIN_CCCma_rcp85 über 20°C (Tropennacht)		
	Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr
1971-2000	1	0,03	1971-2000	0	0,00	1971-2000	58	1,93
2021-2050	4	0,13	2021-2050	23	0,77	2021-2050	286	9,53
2071-2100	14	0,47	2071-2100	375	12,50	2071-2100	1420	47,33
Diff 2021-2050-1971-2000	3	0,10	Diff 2021-2050-1971-2000	23	0,77	Diff 2021-2050-1971-2000	228	7,60
Dff 2071-2100-1971-2000	13	0,43	Dff 2071-2100-1971-2000	375	12,50	Dff 2071-2100-1971-2000	1362	45,40

Tabelle 15 Jetzige Anzahl der Hitzetage sowie die Klimaänderungssignale für die nähere und ferne Zukunft an drei Stationen im Mittelrheintal.

Gegenwart								
Bacharach über 30°C			Oberwesel über 30°C			Boppard über 30°C		
	Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr
2004-2019	0	0	2013-2019	0	0,0	2004-2019	1	0,1
Klimaänderungssignal								
CLM_C20A1B_1_TMAX über 30°C (Hitzetag)			CLM_C20A1B_2_TMAX über 30°C (Hitzetag)			CLM_C20B1_1_TMAX über 30°C (Hitzetag)		
	Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr
1971-2000	411	13,7	1971-2000	412	13,73	1971-2000	411	13,70
2021-2050	608	20,27	2021-2050	444	14,80	2021-2050	455	15,17
2071-2100	1144	38,13	2071-2100	1163	38,77	2071-2100	848	28,27
Diff 2021-2050-1971-2000	197	6,57	Diff 2021-2050-1971-2000	32	1,07	Diff 2021-2050-1971-2000	44	1,47
Dff 2071-2100-1971-2000	733	24,43	Dff 2071-2100-1971-2000	751	25,03	Dff 2071-2100-1971-2000	437	14,57
CLM_C20B1_2_TMAX über 30°C (Hitzetag)			TMAX_WETTER_rcp85 über 30°C (Hitzetag)			TMAX_MIROC_rcp85 über 30°C (Hitzetag)		
	Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr
1971-2000	412	13,73	1971-2000	252	8,40	1971-2000	91	3,03
2021-2050	584	19,47	2021-2050	399	13,30	2021-2050	350	11,67
2071-2100	824	27,47	2071-2100	931	31,03	2071-2100	782	26,07
Diff 2021-2050-1971-2000	172	5,73	Diff 2021-2050-1971-2000	147	4,90	Diff 2021-2050-1971-2000	259	8,63
Dff 2071-2100-1971-2000	412	13,73	Dff 2071-2100-1971-2000	679	22,63	Dff 2071-2100-1971-2000	691	23,03
TMAX_WETTER_rcp26 über 30°C (Hitzetag)			TMAX_REMO_rcp85 über 30°C (Hitzetag)			TMAX_CCCma_rcp85 über 30°C (Hitzetag)		
	Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr
1971-2000	252	8,40	1971-2000	40	1,33	1971-2000	113	3,77
2021-2050	364	12,13	2021-2050	107	3,57	2021-2050	384	12,80
2071-2100	406	13,53	2071-2100	617	20,57	2071-2100	1642	54,73
Diff 2021-2050-1971-2000	112	3,73	Diff 2021-2050-1971-2000	67	2,23	Diff 2021-2050-1971-2000	271	9,03
Dff 2071-2100-1971-2000	154	5,13	Dff 2071-2100-1971-2000	577	19,23	Dff 2071-2100-1971-2000	1529	50,97

Tabelle 16 Jetzige Anzahl der Tage mit Starkniederschläge sowie die Klimaänderungssignale für nähere und ferne Zukunft an Stationen Oberwesel, Boppard, Bacharach im oberen Mittelrheintal.

Gegenwart								
Oberwesel über 20mm			Boppard über 20mm			Bacharach über 20mm		
	Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr
2013-2019	25	0,833333	2004-2019	51	1,7	2004-2019	42	1,4
Klimaänderungssignal								
CLM_C20B_1 über 20mm			CLM_C20B_2 über 20mm			MIROC-MIROC5 RCP 85 über 20mm		
	Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr
1971-2000	58	1,93	1971-2000	50	1,67	1971-2000	76	2,53
2021-2050	77	2,57	2021-2050	75	2,50	2021-2050	86	2,87
2071-2100	76	2,53	2071-2100	82	2,73	2071-2100	131	4,37
Diff 2021-2050-1971-2000	19	0,63	Diff 2021-2050-1971-2000	25	0,83	Diff 2021-2050-1971-2000	10	0,33
Dff 2071-2100-1971-2000	18	0,60	Dff 2071-2100-1971-2000	32	1,07	Dff 2071-2100-1971-2000	55	1,83
CLM_C20A1B_1 über 20mm			CLM_C20A1B_2 über 20mm			WETTREG2013 RCP 26 über 20mm		
	Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr		Summe	pro Jahr
1971-2000	58	1,93	1971-2000	50	1,67	1971-2000	40	1,33
2021-2050	64	2,13	2021-2050	82	2,73	2021-2050	54	1,80
2071-2100	90	3,00	2071-2100	91	3,03	2071-2100	58	1,93
Diff 2021-2050-1971-2000	6	0,20	Diff 2021-2050-1971-2000	32	1,07	Diff 2021-2050-1971-2000	14	0,47
Dff 2071-2100-1971-2000	32	1,07	Dff 2071-2100-1971-2000	41	1,37	Dff 2071-2100-1971-2000	18	0,60
CCCma-CanESM2 RCP 85 über 20mm						WETTREG2013 RCP 85 über 20mm		
	Summe	pro Jahr					Summe	pro Jahr
1971-2000	38	1,27				1971-2000	40	1,33
2021-2050	45	1,50				2021-2050	67	2,23
2071-2100	66	2,20				2071-2100	107	3,57
Diff 2021-2050-1971-2000	7	0,23				Diff 2021-2050-1971-2000	27	0,90
Dff 2071-2100-1971-2000	28	0,93				Dff 2071-2100-1971-2000	67	2,23

8.2 METHODEN

Kombinationen von Szenarien, Globalen und Regionalen Klimamodellen

In der Tabelle 1 wurden alle in dieser Untersuchung verwendeten und analysierten Kombinationen von Szenarien, Globalen und Regionalen Klimamodellen aufgelistet. Die Kombinationen, die für die Abbildungen des Kompetenzzentrums Klimafolgenforschung RLP verwendet wurden sind in der Tabelle nicht berücksichtigt.

Das der vorliegenden Arbeit zugrunde liegende Ensemble umfasst für die Variable Niederschlag vier CLM und vier CORDEX-ReKliEs Läufe und für Lufttemperatur - zwölf CLM und 15 CORDEX-ReKliEs Läufe. Die Datensätze wurden von der Internetseite des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) heruntergeladen. Die verwendeten regionalen Modelle haben eine räumliche Auflösung von ca. 18 km x 18 km (CLM) und ca. 12,5 x 12,5 km (CORDEX) (Climate Service Center [CSC], 2012).

Tabelle 17 Liste der verwendeten Kombinationen von Szenarien, Globalen und Regionalen Klimamodellen

Scenario	GCM	RCM
C20, SRES A1B, SRES B1	ECHAM5-MPIOM	CLM
CORDEX Historical	MPI-ESM-LR	WETTREG2013
CORDEX Historical	CCCma-CanESM2	CLM, REMO2015
CORDEX Historical	MIROC-MIROC5	CLM
RCP 8.5	MPI-ESM-LR	WETTREG2013
RCP 8.5	CCCma-CanESM2	CLM, REMO2015
RCP 8.5	MIROC-MIROC5	CLM
RCP 2.6	MPI-ESM-LR	WETTREG2013

Räumliche Erfassung des Welterbegebietes

Tabelle 18 Verwendete Datengrundlagen

Bezeichnung	Inhalt	Quelle
Digitale Orthophotos (DOP) für RLP und HE	Luftbilder mit Bodenauflösung 40 cm	LVerGeoRP, 2020; HVBG, 2020
Digitale Topografische Karten (DTK) für RLP und HE	Topografische Karten, 1:5.000 und 1:25.000	LVerGeoRP, 2020; HVBG, 2020
Rahmen- und Kernbereich WOM	Rahmen- und Kernbereich des Untersuchungsgebiets WOM	MWVLW RLP, 2013
Kulturlandschaftstypen und -elemente	Großräumige Kulturlandschaftstypen und -elemente im WOM	Zweckverband Welterbe Oberes Mittelrheintal, 2008
Überschwemmungsgebiete für RLP und HE	Überschwemmungsgebiete und Wasserstände am Rhein für HQ100	MUEEF RLP, 2020; HVBG, 2020
Bodenerosion ABAG für RLP	Bodenerosionsgefährdung durch Wasser und Erweitertes Gewässernetz (Tiefenlinien) für RLP	LGB RLP, o.J.
Digitales Geländemodell (ATKIS DGM 10x10 m)	Laserscandaten im Raster 10x10m (DGM10) für das WOM	LVerGeoRP, o.J.; HVBG, o.J.
Hochwassergefahrenkarten für RLP und HE	Hochwassergefahrenkarten des Rheins für RLP und HE mit Überschwemmungsgebiete und Wasserständen für HQ100	MUEEF, o.J.; HVBG, 2020
Gewässerstrukturgüte für RLP	Gewässerstrukturgüte der Gewässer in RLP	MUEEF, 2018
Bodenerosion (ABAG) und erweitertes Gewässernetz	Erosionsgefährdung durch Wasser anhand der ABAG inkl. erweitertem Gewässernetz für RLP	LBG, 20

Diese grundlegenden Daten wurden in einem geographischen Informationssystem (ESRI ArcGIS 10.6, ESRI, 2018) gesammelt. Als Hintergrundkarten wurden digitale Orthophotos (DOP, Bodenauflösung 40 cm) und Digitale Topografische Karten (DTK, 1:5.000 und 1:25.000) von Rheinland-Pfalz und Hessen über Web Map Services (WMS) eingebunden (LVerGeoRP, 2020; HVBG, 2020).

Zunächst wurden die Grenzen des Untersuchungsgebiets „Welterbe Oberes Mittelrheintal (WOM)“ digitalisiert. Als Grundlage diente eine georeferenzierte Karte des MWVLW RLP (2013) mit dem Rahmen- und Kernbereich des WOM.

Zur Analyse der Landnutzung und weiterer Verschneidung der Informationen, wurde die Landnutzung im WOM Kernbereich und zusätzlich das Gebiet um die Höhenlage Boppard-Buchholz, anhand der DTK25 (LVerGeoRP, 2020; HVBG, 2020) digitalisiert. Die Einteilung der Landnut-

zung erfolgte in Wald, Wiese, Acker, Park (öffentliche Spielplätze, Friedhöfe, öffentliche Grünanlagen), Bebauung, Industrie, HV-Straßen (Bundesstraßen), Straßen (Landesstraßen, Kreisstraßen) sowie Nebenstraßen (Gemeindestraßen).

Zur großräumlichen Gliederung des WOM in Kulturlandschaftstypen mit zugehörigen Kulturlandschaftselementen wurde die Einteilung vom Zweckverband Welterbe Oberes Mittelrheintal (2008) georeferenziert und digitalisiert. Folgende Klassifizierung wurde übernommen: Mittelrheinische Stadtlandschaft, Kleinstädtische Siedlungslandschaft, Felsen-Landschaft, Insel-Auen-Landschaft, Waldlandschaft, Großflächige Weinberglandschaft, Kleinteilige Weinberglandschaft, Obst- und Gartenlandschaft, Wilde (verbrachte) Terrassenlandschaft sowie Heidelandschaft (vgl. Zweckverband Welterbe Oberes Mittelrheintal, 2008).

Durch Überlagerung der Landnutzung (DTK25), den Kulturlandschaftstypen, sowie Kulturlandschaftselementen und verschiedene Ortschaften entlang des Rheintals kann ein Gesamteindruck der vorliegenden Nutzung und Verteilung entwickelt werden. Darüber hinaus ist eine Betrachtung mit Blick auf potenzielle Hitzeinseln, stark versiegelte Flächen, Grünstrukturen und Freiflächen durch die Fernerkundung möglich.

Für das Themenfeld Gewässer wurden die Hintergrundkarten durch thematische Karten erweitert. Das Gewässernetz (LfU-Gewässernetz 27150, MUEEF RLP, 2018) diene als Grundlage, um die im Untersuchungsgebiet vorkommenden Gewässer bestimmen zu können. Die Daten basieren auf der ATKIS-Gewässergeometrie und beinhalten neben Informationen zur Gewässerbezeichnung auch Kennziffern, Längen und Informationen zu Abschnitten. Die Betroffenheit der Ortslagen bei Rheinhochwasser wurde über die Einbindung von Hochwassergefahrenkarten des Landes Rheinland-Pfalz und Hessen identifiziert (MUEEF, 2018; HVBG, 2020). Herangezogen wurden die Überschwemmungsgebiete und Wasserstände für Hochwässer mit mittlerer Wahrscheinlichkeit (HQ100). Eine Einschätzung der anthropogenen Veränderung der Gewässer erfolgte durch Einbeziehung der Gewässerstrukturgüte der Gewässer in RLP (MUEEF, 2018). Dabei werden unter „anderem die Beschaffenheit des Ufers (z.B. Bewuchs, Verbau), die Ausformung der Gewässersohle (z.B. Bänke, Tief-/Flachwasserzonen), Strömungs- und Substratunterschiede oder der Verlauf des Gewässerbettes (z.B. mäandrierender, gewundener, begradigter Lauf)“ (MUEEF, 2018) als Strukturen bewertet. Diese Daten sind nicht für alle im Untersuchungsgebiet vorkommenden Gewässer erhoben wurden.

Die Erosionsgefährdung von Bodenabtrag durch Niederschläge, also die „Wassererosionsgefahr“, wurde mit Hilfe des WMS WebMapservers des Landesamtes für Geologie und Bergbau RLP bewertet (LGB, 2020). Die entsprechende Karte nutzt die Allgemeine Bodenabtragsgleichung (ABAG) nach Schwertmann et al. (1990 in LGB, 2017), der den mittleren langfristigen zu erwartenden Bodenabtrag durch Wasser abschätzt (LGB, 2017). Für die Berechnung der Erosionsgefährdung werden die Faktoren der Bodenerodierbarkeit (K-Faktor, die Regenerosität (R-Faktor), die Hanglänge (L-Faktor) sowie die Hangneigung (S-Faktor) und die Bodenbedeckung (C-Faktor) herangezogen, sodass sich für die Erosionsgefährdung durch Wasser folgende Formel ergibt (LGB, 2017):

$$A = K * R * L * S * C$$

Über selbigen Webmapserver (LGB, 2020) kann ebenfalls ein erweitertes Gewässernetz integriert werden. Dieses beinhaltet Informationen über Abflusswirksame Tiefenlinien, die An-

schluss an das Gewässernetz haben. Im Erosionsfall wird über diese Tiefenlinien Bodenmaterial transportiert und an Übertrittspunkten in Gewässer oder in Siedlungsbereiche eingetragen (LGB, 2017). Durch die Verknüpfung von Erosionsgefährdung und Tiefenlinien ist die Identifizierung erosionsgefährdeter landwirtschaftlicher Nutzflächen möglich, die gleichzeitig an das erweiterte Gewässernetz angeschlossen sind.

Für das gesamte WOM wurden zudem ein Digitales Geländemodell (DGM) in der Gitterweite 10 m verwendet, um das Geländere Relief und Höhendaten (mNN) abgreifen zu können. Die Laserscandaten (xyz Daten) wurden über ein Postprocessing mit der Open-Source-Programmiersprache R (R Core Team, 2018). Dazu wurden die Funktionalitäten durch eine Reihe von Zusatzpaketen erweitert (Raster (Hijmans, 2020); Data.Table (Dowle & Srinivasan, 2019); sp (Pebesma & Bivand, 2005); akima (Akima & Gebhardt, 2020); automap (Hiemstra et al., 2008); fields (Nychka et al., 2017); gstat (Pebesma, 2004) in flächige Rasterdaten überführt.

Die Verschneidung der verschiedenen Informationsquellen in einem Geografischen Informationssystem ermöglichte eine Analyse hinsichtlich der Betroffenheit von Hitze, Starkregen und/oder Hochwasser sowie weiterer Teilaspekte. Es waren großskalige und kleinskalige Betrachtungen möglich.

Neben der Analyse über Fernerkundung/ Auswertung von Kartenmaterial wurden gewässerkundliche Daten des Rheinpegels Kaub herangezogen (LfU, 2020). Der Pegel Kaub steht beispielhaft für die Wasserstände des Rheins im Mittelrheintal, dessen Aufzeichnungen bis 1900 zurückreichen. Er liegt ca. 10 km Flußaufwärts von St. Goar /St. Goarshausen .

Ortsbegehungen zur Abschätzung der Betroffenheit

Die Betroffenheit durch Hitze und Wasser sowie mögliche Handlungsoptionen wurden bei Ortsbegehungen durch Studierende im Mai 2020 sowie eine ergänzende Begehung am 02.09.2020 in den Ortschaften Boppard, St. Goar und St. Goarshausen überprüft und ergänzt. Für das Themenfeld Hitze wurde vor allem auf die Aspekte Verschattung und Grünstrukturen geachtet. Für das Themenfeld Wasser waren unter anderem der Gewässerverlauf, die Uferstrukturen und mögliche Engstellen interessant.

9 LITERATURVERZEICHNIS

- Akademie für Raumforschung und Landesplanung. (2018). *Begrenzung der Flächeninanspruchnahme in Bayern: Positionspapier aus der ARL 111*. Verlag der ARL. https://www.ssoar.info/ssoar/bitstream/handle/document/64432/ssoar-2018-jacoby_et_al-Begrenzung_der_Flachenneuanspruchnahme_in_Bayern.pdf?sequence=1&isAllowed=y&lnkname=ssoar-2018-jacoby_et_al-Begrenzung_der_Flachenneuanspruchnahme_in_Bayern.pdf
- Andernach Tourismus. (2020). *Die Essbare Stadt: Pflücken erlaubt! Die nachhaltige Grünraumplanung bringt die Natur zurück in die Stadt Andernach*. <https://www.andernach-tourismus.de/andernach/die-essbare-stadt>
- Artmann, M. (2014). Assessment of soil sealing management responses, strategies, and targets toward ecologically sustainable urban land use management. *Ambio*, 43(4), 530–541. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0511-1>
- Bartfelder, F. & Köhler, M [Manfred]. (1987). *Experimentelle Untersuchungen zur Funktion von Fassadenbegrünungen* [Dissertation]. Technische Universität Berlin, Berlin.
- Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG). (2015). *Stadtgrün 2021: Mein Freund der Stadtbaum*. 15. Münchner Wissenschaftstage. <http://www.lwg.bayern.de/landespflege/gartendokumente/poster/085832/index.php>
- Berliner Regenwasseragentur. (2020). *Einstiegsseite*. <https://www.regenwasseragentur.berlin/>
- Böll, S [S.], Schönfeld, P [P.] & Körber, K. (2018). *"Projekt Stadtgrün 2021" Selektion, Anzucht und Verwendung von Gehölzen unter sich ändernden klimatischen Bedingungen: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Nr.: KL/17/03*. Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiPtaOp8OHtAhUI5uAKHUo8AakQFjAAegQIB-hAC&url=http%3A%2F%2Fwww.lwg.bayern.de%2Fmam%2Fcms06%2Flandespflege%2Fdateien%2Fabschlussbericht_stadtgruen_2018-74_in.pdf&usq=AOvVaw00cGevw47E41BtuhkXk6z4
- Böll, S [Susanne], Dietrich, M. & Schönfeld, P [Philipp] (2020). In Bayern steigen die Temperaturen... *Stadt+Grün*(09). <https://stadtundgruen.de/artikel/in-bayern-steigen-die-temperaturen-14313.html> (Pfaffenhofen an der Ilm – klimagerechter Ausbau der Grünflächen).
- Böttcher, R. Dr.-Ing. (2020) [Telefonische Auskunft].
- Breitbach, S. (15. Januar 2011). Hochwasser am Mittelrhein: THW und Feuerwehr im Dauereinsatz. *Rhein-Zeitung*, 2011. https://www.rhein-zeitung.de/artikelarchiv_artikel,-hochwasser-am-mittelrhein-thw-und-feuerwehr-im-dauereinsatz-_arid,190130.html
- Breitbach, S. (12. Juli 2019). Starkregen überschwemmt Mittelrhein und Hunsrück - Wanderer unverletzt aufgefunden. *Rhein-Zeitung*, 2019(Rhein-Hunsrück-Zeitung). https://www.rhein-zeitung.de/region/aus-den-lokalredaktionen/rhein-hunsrueck-zeitung_artikel,-starkregen-ueberschwemmt-mittelrhein-und-hunsrueck-wanderer-unverletzt-aufgefunden-_arid,1999527.html
- Bretz, C., Bergfeld, D. & Krämer-Schick, C. (6. Juli 2017). Starkregen überrascht St. Goar: Wassermassen fließen den Schlossberg hinab. *Rhein-Zeitung*(Rhein-Hunsrück-Zeitung).

- https://www.rhein-zeitung.de/region/aus-den-lokalredaktionen/rhein-hunsrueck-zeitung_artikel,-starkregen-ueberrascht-st-goar-wassermassen-fliesen-den-schlossberg-hinab-updatefotos-_arid,1673109.html
- Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz. (2010). *Reduzierung der Flächeninanspruchnahme: Bericht der Umweltministerkonferenz*. https://www.labo-deutschland.de/documents/UMK-Bericht_98a.pdf
- Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser. (1999). *Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland: Verfahren für kleine und mittelgroße Fließgewässer*. https://www.lawa.de/documents/gewaesserstrukturguetekartierung_verfahren_kleine_mittelgrosse_fliessgewaesser_1552305499.pdf
- Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser. (2014). *Zusammenfassende Analyse der Ergebnisse der vom Hochwasser 2013 betroffenen Flussgemeinschaften*. https://www.lawa.de/documents/bv_top_34_anlage_bericht_1552299328.pdf
- Bundesanstalt für Gewässerkunde. (2019). *Das Niedrigwasser 2018*.
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). (2020). *Pegel im Rheingebiet: Pegel Kaub*. http://undine.bafg.de/rhein/pegel/rhein_pegel_kaub.html
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. (2012). *Raumordnungsbericht 2011*. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/sonderveroeffentlichungen/2012/DL_ROB2011.pdf;jsessionid=8536AAE05C1EEB3E2E89EBCCA0445552.live11292?__blob=publicationFile&v=1
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. (2018). *Leitfaden Starkregen-, Objektschutz und bauliche Vorsorge. Bürgerbroschüre*. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). (2020). *Flächenverbrauch – Worum geht es?* <https://www.bmu.de/themen/europa-internationales-nachhaltigkeit-digitalisierung/nachhaltige-entwicklung/strategie-und-umsetzung/reduzierung-des-flaechenverbrauchs/>
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). (2016). *Bundesverkehrswegeplan 2030*. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/bundesverkehrswegeplan-2030-gesamtplan.pdf?__blob=publicationFile
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (2017). *Handbuch zur Ausgestaltung der Hochwasservorsorge in der Raumordnung: MORO Regionalentwicklung und Hochwasserschutz in Flussgebieten. MORO Praxis: Heft 10*. Selbstverlag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. (2013a). *Hochwasserfibel. Objektschutz und bauliche Vorsorge*.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. (2013b). *Modellgestützte Klimanalysen und –bewertungen für die Regionalplanung: Grundlagen für einen Leitfaden*. Modellvorhaben der Raumordnung "Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel". https://landesplanung.hessen.de/sites/landesplanung.hessen.de/files/content-downloads/KlimaMORO_klamis_Leitfaden_Klimamodellierung.pdf
- Bundesregierung. (2016). *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie*. <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975292/730844/3d30c6c2875a9a08d364620ab7916af6/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-neuaufgabe-2016-download-bpa-data.pdf>

- Bundes-Bodenschutzgesetz (1998 & i.d.F.v. 27.09.2017). <https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/BBodSchG.pdf>
- Bundesverband GebäudeGrün e.V. (2019). *Positive Wirkungen von Gebäudebegrünungen (Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung). Zusammenstellung von Zahlen, Daten, Fakten aus verschiedenen Untersuchungen.*
- Bundeszentrale für politische Bildung (bpb). (2009). *Glossar: Anpassung an den Klimawandel / Adaptation.* <https://www.bpb.de/themen/YK5ZLW,6,0,Glossar.html#art6>
- Charzyński, P., Plak, A. & Hanaka, A. (2017). Influence of the soil sealing on the geoaccumulation index of heavy metals and various pollution factors. *Environmental science and pollution research international*, 24(5), 4801–4811. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8209-5>
- Climate Service Center. (2012). *Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble-Simulationen für die Klimafolgenforschung: CSC Report 6.* https://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/csc_report6.pdf
- Dedekind, J. (6. August 2011). Zug entgleist zwischen Kestert und Kamp-Bornhofen. *Rhein-Zeitung*, 2011(Rhein-Lahn-Zeitung Bad Ems). https://www.rhein-zeitung.de/region/ausden-lokalredaktionen/rhein-lahn-zeitung-bad-ems_artikel,-zug-entgleist-zwischen-kestert-und-kampbornhofen-_arid,286640.html
- Deutscher Wetterdienst (DWD). *Hitzewarnung.* <https://www.dwd.de/DE/leistungen/hitzewarnung/hitzewarnung.html>
- Deutscher Wetterdienst (DWD). (2020a). *Deutscher Klimaatlas.* https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html
- Deutscher Wetterdienst. (2020b). *Klimastatusbericht Deutschland Jahr 2019.* https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb_2019.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (06.2016). *Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Pflanzen und Pflanzarbeiten* (18916). Berlin. Beuth-Verlag.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (06.2018). *Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Bodenarbeiten* (18915). Berlin. Beuth-Verlag.
- Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinland-Pfalz (DLR-RLP). (o.J.). *Agrarmetereologie RLP. Wasserhaushalt Niederschlag: Mittlere Jahressumme des Niederschlages Periode 1981-2010.* [https://www.dlr.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/276f01b719aae6f8c1257d5f0037bf81/\\$FILE/Beschreibung_Niederschlag24.pdf](https://www.dlr.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/276f01b719aae6f8c1257d5f0037bf81/$FILE/Beschreibung_Niederschlag24.pdf)
- Dugord, P.-A., Lauf, S., Schuster, C. & Kleinschmit, B. (2014). Land use patterns, temperature distribution, and potential heat stress risk – The case study Berlin, Germany. *Computers Environment and Urban Systems*, 48, 86–98. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurb-sys.2014.07.005>
- Egeling, R. (28. November 2019). *Auswirkungen von Niedrigwasserereignissen und möglichen Anpassungsmaßnahmen auf die Flussnatur am Rhein.* Naturschutzbund (NABU). Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e.V. (BWK). 2. BWK Rheintag, Wiesbaden.
- European Commission. (2011). *Overview of best practices for limiting soilsealing or mitigating its effects in EU-27.* <https://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/sealing/Soil%20sealing%20-%20Final%20Report.pdf>

- European Commission. (2012a). *Guidelines on best practice to limit, mitigate or compensate soil sealing*. Publications Office of the European Union. https://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/guidelines/pub/soil_en.pdf
- European Commission (EC). (2012b). *Leitlinien für bewährte Praktiken zur Begrenzung, Milderung und Kompensierung der Bodenversiegelung* [ARBEITSUNTERLAGE DER KOMMISSIONSDIENSTSTELLEN]. <https://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/guidelines/DE - Sealing Guidelines.pdf>
- European Commission. (2012c). *The State of Soil in Europe: State and Outlook Report— SOER 2010*. Publications Office of the European Union. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC68418/lbna25186enn.pdf>
- Fickert, T. (2017). Zum Stadtklima von Passau: Räumliche Differenzierung, Effekte und Implikation für die Stadtplanung. *Der Bayerische Wald*, 30(2), 49–63.
- Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate* (2. Ausg.). (2010). FLL.
- Freie und Hansestadt Hamburg; Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft (BUKEA). (2020). *Handbuch Grüne Wände*. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEWjx6LaCuNPtAhVDzhoKHVGnBGwQFjAAegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.hamburg.de%2Fcontent-blob%2F13871400%2Ffab9561696501bf6902c7c48e86477d1%2Fdata%2Fd-fassadenguide.pdf&usq=AOvVaw3-Hpeh2CmXAdO9BV4_Dq6Q
- Freitag Hartmann Architekten (Hg.). *Grüngas Biogas-Blockheizkraftwerk Adlershof: Adlershofer Schaufenster*. <https://www.fh-architekten.de/gruengas-blockheizkraftwerk-adlershof>
- Frie, B. & Hensel, R. (2009). Schätzverfahren zur Bodenversiegelung: Ansatz der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen der Länder. In G. Meinel & U. Schumacher (Hg.), *Flächennutzungsmonitoring: Konzepte - Indikatoren - Statistik* (S. 17–45). Shaker.
- GALK e.V. (2020). *GALK-Straßenbaumliste*. <https://www.galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuebersicht/strassenbaumliste>
- GEO.de. *Hinein ins urbane Planschvergnügen!* [Flussbäder in Europa]. <https://www.geo.de/reisen/reiseziele/16769-bstr-hinein-ins-urbane-planschvergnuegen>
- GEO-NET. (2004). *Das mesoskalige Simulationsmodell FITNAH*. https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/download/FITNAH_Modellanwendung.pdf
- Gepflegt: Multifunktionale Klima-Baumstandorte (1. September 2020). *Garten + Landschaft*(09), S. 20.
- Gillner, S., Korn, S. & Roloff, A. (2015). Leaf-Gas Exchange of Five Tree Species at Urban Street Sites. *Arboriculture & Urban Forestry*, 41(3), 113–124.
- Google. (o.J.) [Satellitenaufnahme von St. Goarshausen]. <https://www.google.de/maps/@50.1620515,7.7185892,2773m/data=!3m1!1e3>
- Hamburg Wasser. (2020). *Hamburg Water Cycle. Wasser ist unsere Energie*. www.hamburg-watercycle.de

- Heinrich-Böll-Stiftung; Institute for Advanced Sustainability Studies; Bund für Umwelt- und Naturschutz Deutschland; Le Monde diplomatique. (2015). *Bodenatlas: Daten und Fakten über Acker, Land und Erde* (4. Aufl.). https://www.boell.de/sites/default/files/bodenatlas2015_iv.pdf
- Henninger, S. & Weber, S. (2019). *Stadtklima*. UTB. Ferdinand Schöningh.
- Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (HVBG). (o.J.). *Digitale Geländemodelle (ATKIS DGM)*. <https://hvbh.hessen.de/geoinformation/landesvermessung/geotopographie/3d-daten/digitale-gel%C3%A4ndemodelle-atkis%C2%AE-dgm>
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. (2018). *Starkregen und kommunale Vorsorge*.
- Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. (2016a). *Planung mit Tiefgang: Vorsorgender Bodenschutz: Wissen für die Praxis. Bodenschutz - damit Leben drin ist!*
- Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. (2016b). *Politik mit Tiefgang: Vorsorgender Bodenschutz: Wissen für Entscheider. Bodenschutz - damit Leben drin ist!*
- Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung. (2012). *Freiräume entwickeln Lebensräume schaffen*. <https://nachhaltige-stadtentwicklung-hessen.de/media/freiraeume.pdf>
- Hietel, E., Panforyov, O. & Rößner, U. (2016). Extensive Dachbegrünung im urbanen Raum. *Transforming Cities*(3), 18–22.
- Hochwasser Kompetenz Centrum (Hg.). *Hochwasser-Pass*. <https://hkc-online.de/de/Projekte/Hochwasserpas>
- Informations- und Beratungszentrum Hochwasservorsorge Rheinland-Pfalz; Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz. (2019). *Notabflusswege für Sturzflutendurch die Bebauung: Eine Arbeitshilfe für Ingenieure und Kommunen*. <https://ibh.rlp-umwelt.de/servlet/is/9240/Arbeitshilfe%20Notabflusswege%20-%20Endfassung%2014-11-2019.pdf?command=downloadContent&filename=Arbeitshilfe%20Notabflusswege%20-%20Endfassung%2014-11-2019.pdf>
- Informations- und Beratungszentrum Hochwasservorsorge Rheinland-Pfalz; WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH. (2013). *Starkregen - Was können Kommunen tun?* https://www.wbw-fortbildung.net/pb/site/wbw-fortbildung/get/documents_E1600523610/wbw-fortbildung/Objekte/PDFs/HWP/Downloads/Starkregenbroschuere.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2000). *Special Report on Emissions scenarios*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/emissions_scenarios-1.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg3_full_report-1.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2015). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related*

global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_Low_Res.pdf

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins. (2011). *Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins. Bericht 188d.*

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins. (2015a). *International koordinierter Bewirtschaftungsplan 2015 für die internationale Flussgebiets-einheit Rhein.* https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/BWP-HWRMP/DE/bwp_De_BWP2015.pdf

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins. (2015b). *Klimawandelanpassungsstrategie für die IFGE Rhein. Bericht 219.*

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins. (2020). *Bilanz Rhein 2020.*

Jurleit, A. (2013). Landschaftsarchitekten als Macher zukünftiger Stadtquartiere. *Garten + Landschaft*(9), 4–5.

Klimaveränderung und Wasserwirtschaft. (2016). *Klimawandel im Süden Deutschlands. Herausforderungen- Anpassungen. Folgen für die Wasserwirtschaft.* https://www.kliwa.de/_download/broschueren/KLIWA-Broschuere-2016-d.pdf

Klimaveränderung und Wasserwirtschaft. (2017). *Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen (1951-2015)* (2017. Aufl.). *KLIWA-Berichte: Heft 21.* https://www.kliwa.de/_download/KLIWAHeft21.pdf

Klimaveränderung und Wasserwirtschaft. (2019a). *Das Jahr 2018 im Zeichen des Klimawandels? Viel Wärme, wenig Wasser in Süddeutschland: Kurzbericht.* Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW); Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU); Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU RLP); Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG); Deutscher Wetterdienst (DWD). https://www.kliwa.de/_download/Rueckblick2018.pdf

Klimaveränderung und Wasserwirtschaft. (2019b). *Leitfaden zur Durchführung von KLIWA-Stresstests: Kurzbericht.* Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU); Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW); Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU RLP); Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). https://www.kliwa.de/_download/Leitfaden_KLIWA-Stresstest.pdf

Klimaveränderung und Wasserwirtschaft. (2019c). *Starkniederschläge. Entwicklungen in Vergangenheit und Zukunft: Kurzbericht.* Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU); Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW); Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU RLP); Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen; Deutscher Wetterdienst (DWD); Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). https://www.kliwa.de/_download/KLIWA-Kurzbericht_Starkregen.pdf

Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz. (2020). *Klimawandelinformationssystem Rheinland-Pfalz (kwis-rlp): Klimawandel Vergangenheit. Niederschlag.* http://www.kwis-rlp.de/index.php?id=11338&L=0#user_download_pi1-researcharea

- Kramer, G. (2003). Siedlungs- und Verkehrsfläche als Umweltindikator. *Statistische Monatshefte* (5/2003), 86–89. <https://www.statistik.rlp.de/fileadmin/dokumente/monatshefte/2003/Mai/05-2003-086.pdf>
- Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen. (2019). *Flächeninanspruchnahme und Bodenversiegelung in Niedersachsen*. Hannover. https://www.lbeg.niedersachsen.de/boden_grundwasser/bodenschutz/flaecheninanspruchnahme_und_bodenversiegelung/flaecheninanspruchnahme-und-bodenversiegelung-in-niedersachsen-797.html
- Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB RLP). (o.J.). *WMS Dienste*. <https://www.lgb-rlp.de/karten-und-produkte/wms-dienste.html#c802>
- Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz. (2017). *Materialien zur Bodenerosion durch Wasser in Rheinland-Pfalz. Themenheft Vorsorgender Bodenschutz: Heft 2*. NINO Druck GmbH.
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. (2017). *Erfassung von Entsiegelungspotenzialen in Nordrhein-Westfalen: LANUV-Arbeitsblatt 34*.
- Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU RLP). (o.J.–a). *Breyerbach und Tauberbach - Renaturierung in Brey*. <https://aktion-blau-plus.rlp-umwelt.de/servlet/is/11260/>
- Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU RLP). (o.J.–b). *Übersicht des Pegels Kaub - Hochwassermeldezentrum Rhein*. <https://www.hochwasser-rlp.de/hoechststaende/einzelpegel/flussgebiet/rhein/teilgebiet/mittelrhein/pegel/KAUB>
- Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU RLP). (o.J.–c). *Warum wird es am Rhein so schön? ...zwischen Braubach und Lahnstein*. <https://aktion-blau-plus.rlp-umwelt.de/servlet/is/11328/>
- Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU RLP). (2005). *Hydrologischer Atlas Rheinland-Pfalz: Gewässerstrukturgüte (Blatt 05)*. https://lfu.rlp.de/fileadmin/lfu/Wasserwirtschaft/Hydrologischer_Atlas/05_gewaesserstrukturguete.pdf
- Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz. (2018). *Gewässerstrukturgüte (Kartendienst)*. Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz (MUEEF RLP). Mainz. <https://geoportal-wasser.rlp-umwelt.de/servlet/is/9440/>
- Landesamt für Vermessung und Geobasisinformationen Rheinland-Pfalz (LVermGeoRLP). (2020a). *Digitale Geländemodelle (DGM)*. <https://lvermgeo.rlp.de/de/produkte/geotopografie/3d-geodaten/digitale-gelaendemodelle-dgm/>
- Landesamt für Vermessung und Geobasisinformationen Rheinland-Pfalz (LVermGeoRLP). (2020b). *Open Data - Freie Daten und Dienste der Vermessungs- und Katasterverwaltung Rheinland-Pfalz*. <https://lvermgeo.rlp.de/de/geodaten/opendata/>
- Manthe-Romberg, B. (2020) [Telefonische Auskunft].
- Matzinger, A., Riechel, M., Remy, C., Schwarzmüller, H., Rouault, P., Schmidt, M., Offermann, M., Strehl, C., Nickel, D., Pallasch, M., Sieker, H., Köhler, M [M.], Kaiser, D., Möller, C., Büter, B., Leßmann, D., von Tils, R., Säumel, I., Pille, L., . . . Reichmann, B. (2017). *Zielorientierte Planung von Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung - Ergebnisse des Projektes KURAS: KURAS-Leitfaden*. http://www.kuras-projekt.de/fileadmin/Dokumente_Verwaltung/pdf/20170428_Leitfaden_Regenwasser_full_final_med_res.pdf
- Mehl, D., Hoffmann, T. G., Iwanowski, J., Lüdecke, K. & Thiele, V. (2018). 25 Jahre Fließgewässerrenaturierung an der mecklenburgischen Nebel: Auswirkungen auf den ökologischen

- Zustand und auf regulative Ökosystemleistungen. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (HyWa)*, 62(1), 6–24. https://doi.org/10.5675/HYWA_2018,1_1
- Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz. (o.J.–a). *Gefahrenkarte HQ10, HQ100, HQextrem* [Online]. Mainz. <https://hochwassermanagement.rlp-umwelt.de/servlet/is/200041/>
- Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz. (o.J.–b). *Gewässernetz Rheinland-Pfalz* [GIS Shape File]. Mainz.
- Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz. (o.J.–c). *Risikokarte HQ10, HQ100, HQextrem* [Online]. Mainz. <https://hochwassermanagement.rlp-umwelt.de/servlet/is/200042/>
- Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz. (2018). *Auswirkungen des Klimawandels auf die Trinkwasserversorgung: Anpassungsstrategien zur Daseinsvorsorge*. https://wasser.rlp-umwelt.de/servlet/is/1340/Klimawandel_Trinkwasserversorgung.pdf?command=downloadContent&filename=Klimawandel_Trinkwasserversorgung.pdf
- Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz Abteilung Wasserwirtschaft. (2015). *Aktion Blau Plus. Gewässerentwicklung in Rheinland-Pfalz*. <https://aktion-blau-plus.rlp-umwelt.de/servlet/is/8380/>
- Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz (MWKEL RLP). (2010). *Raum+ Rheinland-Pfalz 2010 • Rheinland-Pfalz erkennt seine Chancen – Raum+ Rheinland-Pfalz 2010 • Rheinland-Pfalz erkennt seine Chancen – Die Bewertung von Flächenpotenzialen für eine zukunftsfähige Siedlungsentwicklung*. https%3A%2F%2Fmueef.rlp.de%2Ffileadmin%2Fmulewf%2FThemen%2FKlima-_und_Ressourcenschutz%2FBodenschutz%2FFlaechensparen%2FBRO-SCHUERE_Raum_Plus_Rheinland-Pfalz_2010.pdf
- Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz. (2013a). *Klimawandelbericht: Grundlagen und Empfehlungen für Naturschutz und Biodiversität, Boden, Wasser, Landwirtschaft, Weinbau und Wald*. https://mueef.rlp.de/fileadmin/mulewf/Themen/Klima-_und_Ressourcenschutz/Klimawandel/Klimaberichte/Klimawandelbericht_2013.pdf
- Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz. (2013b). *Masterplan Welterbe Oberes Mittelrheintal: Herausforderungen und Visionen für die zukünftige Entwicklung*. https://mdi.rlp.de/fileadmin/isim/Unsere_Themen/Landesplanung_Abteilung_7/WOM/Masterplan_Welterbe_Oberes_Mittelrheintal_2013_Broschuere_mit_Anlagen.pdf
- Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz (MWKEL RLP). (2013c). *Weinbergsböden in Rheinland-Pfalz: Steine. Böden. Terroir*. https%3A%2F%2Fsgdnord.rlp.de%2Ffileadmin%2Fsgdnord%2FBoden%2FBoden_des_Jahres_2014.pdf
- Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz. (2014). *Raumordnungsbericht 2013*. https://mwkel.rlp.de/fileadmin/mwkel/Broschueren/Raumordnungsbericht_2013.pdf
- Moss et. al. (2010). *Representativ Concentration Pathways*.

- Müller-Westermeier, G. (1995). *Numerisches Verfahren zur Erstellung klimatologischer Karten*. Deutscher Wetterdienst (DWD). Berichte des Deutschen Wetterdienstes. https://www.dwd.de/DE/leistungen/pbfb_verlag_berichte/pdf_einzelbaende/193_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (10. September 2019). *Global Annual Mean Surface Air Temperature Change*. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v3/
- Nitsch, A. (28. Mai 2018). Nach der Flut sitzt bei vielen der Schock tief: Im Kreis Birkenfeld hat das Aufräumen begonnen. *Rhein-Zeitung*, 2018(Rheinland-Pfalz). https://www.rhein-zeitung.de/region/rheinland-pfalz_artikel,-nach-der-flut-sitzt-bei-vielen-der-schock-tief-im-kreis-birkenfeld-hat-das-aufraeumen-begonnen-_arid,1820706.html
- Nolde, E. (2012). Hohe Energie- und Wassereffizienz durch Grauwasserrecycling mit vorgeschalteter Wärmerückgewinnung. *fbr Wasserspiegel*(1/13), 3–6. https://www.fbr.de/fileadmin/Daten/Artikel_aus_wsp/Artikel-Arnimplatz_GW__fbr_1_13.pdf
- Optigrün International AG. (2020). *Dachbegrünung Ratgeber. Pro Gründach*. <https://www.dachbegruenung-ratgeber.de/vorteile-dachbegruenung>
- Paulus, T. (9. Mai 2012). *Allgemeine Grundsätze und Methoden einer modernen Gewässerunterhaltung*. Gemeinnützige Fortbildungsgesellschaft für Wasserwirtschaft und Landschaftsentwicklung mbH (GfG), Mainz. https://gfg-fortbildung.de/web/images/stories/gfg_pdfs_ver/Hessen/NiddaNidder/12_niddanidder_f_v2.pdf
- Penn-Bressel, G. (2009). Umweltindikatoren: Die Flächeninanspruchnahme für Siedlungen und Verkehr sowie weitere relevante Indikatoren zum Zustand von Flächen und Böden. Anforderungen an das Flächenmonitoring aus Sicht des Umweltbundesamtes. In G. Meinel & U. Schumacher (Hg.), *Flächennutzungsmonitoring: Konzepte - Indikatoren - Statistik* (S. 71–103). Shaker.
- Planungsgemeinschaft Mittelrhein-Westerwald. (2017). *Regionaler Raumordnungsplan Mittelrhein-Westerwald (RROP MW)*. https://mittelrhein-westerwald.de/images/Downloads/Text_Regionaler_Raumordnungsplan_web.pdf
- Rautenberg, J., Fritsch, P., Hoch, W., Merkl, G., Otillinger, F., Weiß, M. & Wricke, B. (2014). *Mutschmann/Stimmelmayer Taschenbuch der Wasserversorgung* (16., vollst. überarb. und aktual. Aufl. 2014). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2561-2>
- Roepke, R. (28. November 2019). *Trinkwasserversorgung im Spannungsfeld des Klimawandels*. Wasserversorgung Rheinhessen-Pfalz GmbH. Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e.V. (BWK). 2. BWK Rheintag, Wiesbaden.
- Röpke, L. & Lippelt, J. (2014). Kurz zum Klima: Bodenversiegelung in Deutschland und Europa. *ifo Schnelldienst*, 67(3), 60–63. https://www.ifo.de/DocDL/ifosd_2014_03_7.pdf
- Sachverständigenrat für Umweltfragen. (2016). *Umweltgutachten 2016: Impulse für eine integrative Umweltpolitik*. https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2016_Umweltgutachten_HD.pdf?__blob=publicationFile&v=36
- Savin, A. (2017). *Renaturierung des Eschbachs in Waldesch* [Master-Arbeit]. Hochschule Koblenz, Koblenz.
- Scalenghe, R. & Marsan, F. A. (2009). The anthropogenic sealing of soils in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 90(1-2), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.10.011>

- Schädler, G. & Lohmeyer, A. (1994). Simulation of nocturnal drainage flows on personal computers. *Meteorologische Zeitschrift (metz)*, 3(3), 167–171. <https://doi.org/10.1127/metz/3/1994/167>
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin. (2010). *Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung: Gebäudebegrünung, Gebäudekühlung* [Leitfaden für Planung, Bau, Betrieb und Wartung]. http://www.gebaeudekuehlung.de/SenStadt_Regenwasser_dt.pdf
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin. (2014). *Stadtentwicklungsplan Klima: Urbane Lebensqualität im Klimawandel sichern*. https://www.stadtentwicklung.berlin.de/plannen/stadtentwicklungsplanung/download/klima/klimaanpassung_broschuere.pdf
- Sievers, U. (2005). *Das Kaltluftabflussmodell KLAM_F21: Theoretische Grundlagen, Anwendung und Handhabung des PC-Modells. Berichte des Deutschen Wetterdienstes: Bd. 227*. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes.
- Stadt Bingen. (2020). *Der Park am Mäuseturm*. <https://www.bingen.de/kultur/tor-zum-unesco-welterbe/der-park-am-maeuseturm>
- Stadt Köln. (2017). *Das Projekt: Klimagerechte Metropole Köln*. <https://www.stadt-koeln.de/leben-in-koeln/umwelt-tiere/klima/das-projekt-klimawandelgerechte-metropole-koeln>
- Stadt Remagen. (1. Oktober 2020). *Stadt Remagen errichtet Trinkwasserspender: Umwelt- und Klimaschutz zum Mitnehmen* [Press release]. Remagen. <https://www.aktiplan.de/stadt-remagen-errichtet-trinkwasserspender/>
- Stadt Wien. *Neue coole Plätze: Sprüh-Nebelduschen und mobile Wasserspiele sorgen für Abkühlung in der Stadt*. <https://www.wien.gv.at/umwelt/cooleswien/coole-plaetze.html>
- Stadt Wien. (2019). *Leitfaden Fassadenbegrünung*. <https://www.wien.gv.at/umweltschutz/raum/fassadenbegruenung.html>
- Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz. (2020). *Geowebdienste*. http://www.statistik.rlp.de/no_cache/de/regional/geowebdienste/
- Thönnessen, M. (2006). Staubfilterung und immissionshistorische Aspekte am Beispiel fassadenbegrünenden Wilden Weines (*Parthenocissus tricuspidata*). *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, 18(1), 1013. <https://doi.org/10.1065/uwsf2005.11.108>
- Umweltbundesamt. (2003). *Reduzierung der Flächeninanspruchnahme durch Siedlung und Verkehr: Materialienband*. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2587.pdf>
- Umweltbundesamt. (2014). *Hydromorphologische Steckbriefe der deutschen Fließgewässertypen: Anhang 1 von „Strategien zur Optimierung von Fließgewässer-Renaturierungsmaßnahmen und ihrer Erfolgskontrolle“*. UBA-Texte: 43/2014. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_43_2014_hydromorphologische_steckbriefe_der_deutschen_fliessgewaessertypen_0.pdf
- Umweltbundesamt. (2015a). *Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters und die Gesundheit bzw. die Leistungsfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland. Umwelt & Gesundheit: Bd. 6*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/ug_06_2015_einfluss_des_klimawandels_auf_die_biotropie_des_wetters_0.pdf
- Umweltbundesamt (UBA). (2015b). *Klimalotse*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/klimalotse#%C3%9Cber>

- Umweltbundesamt. (2016). *Rund um das Trinkwasser* (4. Aufl.). Ratgeber. www.umweltbundesamt.de/publikationen/rund-um-trinkwasser
- Umweltbundesamt (UBA). (2017). *Wasserwirtschaft in Deutschland: Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen*. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/wasserwirtschaft-in-deutschland-grundlagen>
- Umweltbundesamt. (2018). *Dynamik der Klarwasseranteile in Oberflächengewässern und mögliche Herausforderung für die Trinkwassergewinnung in Deutschland*. UBA-Texte: 59/2018. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/dynamik-der-klarwasseranteile-in>
- Umweltbundesamt. (2019a). *Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel: Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/das_monitoringbericht_2019_barrierefrei.pdf
- Umweltbundesamt. (2019b). *Vorsorge gegen Starkregenereignisse und Maßnahmen zur wassersensiblen Stadtentwicklung: Analyse des Standes der Starkregenvorsorge in Deutschland und Ableitung zukünftigen Handlungsbedarfs. Abschlussbericht*. UBA-Texte: 55/2019. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/vorsorge-gegen-starkregenereignisse-massnahmen-zur>
- Umweltbundesamt (UBA). (2020a). *Bodenversiegelung*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/boden/bodenversiegelung>
- Umweltbundesamt (UBA). (2020b). *Renaturierung von Fließgewässern*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/fluesse/gewaesserrenaturierung-start>
- UNESCO World Heritage Center (UNESCO WHC). (2017). *Richtlinien für die Durchführung des Übereinkommens zum Schutz des Kultur- und Naturerbes der Welt*. <http://whc.unesco.org/document/158581>
- Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (11.1999). *Umweltmeteorologie - Modelle zur Gasphasenchemie der Troposphäre* (Richtlinie 3783 Blatt 5).
- Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (05.2017). *Umweltmeteorologie - Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle: Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung* (Richtlinie 3783 Blatt 9).
- Warmuth, C. & Goeldner, M. (2018). *Urbane Stillgewässer als Anpassungsmaßnahme gegen Hitzestress*. Technische Universität Berlin, Berlin. https://www.klima.tu-berlin.de/insulaner/sites/default/files/2018-08/A1_Goeldner_Warmuth_final_0.pdf
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. (2017). *Abladeoptimierung am Mittelrhein: Nachhaltige Verbesserungen für Schifffahrt und Umwelt*. www.amsterdam.info. NEMO Science Museum in Amsterdam. <https://www.amsterdam.info/museums/nemo/>
- Zeit, T. (2019). *Auswirkungen der Dürre 2018 auf den Betrieb der Kläranlage Guldental* [Bachelor-Arbeit]. Hochschule Koblenz, Koblenz.
- ZinCo GmbH (Hg.). *Solarenergie und Dachbegrünung: Planungshilfe*. https://www.zinco.de/sites/default/files/2020-04/ZinCo_Solarenergie_und_Dachbegrueung.pdf

Zweckverband Welterbe Oberes Mittelrheintal. (o.J.). *Welterbe-Atlas: Im Einklang mit den Elementen*. <http://www.welterbe-atlas.de/natur/>

Zweckverband Welterbe Oberes Mittelrheintal. (2008). *Kulturlandschafts-Entwicklungskonzept (KLEK): Kurzfassung*. <https://www.welterbe-mittelrheintal.de/zweckverband-wom/projekte/grundlagen/kulturlandschafts-entwicklungskonzept-klek>

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 Räumliche Ausdehnung des Welterbes Oberes Mittelrheintal und Verwaltungsgrenzen (Quelle: Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz [MWKEL RLP], 2013b)	7
Abbildung 2: Einmündung des Schlierbachs in den Rhein zwischen Braubach und Lahnstein (LfU RLP, o.J.–c, Foto Rudolf May).....	10
Abbildung 3 Impressionen aus dem Mittelrheintal.....	11
Abbildung 4 Kulturlandschaftstypen (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020; Datengrundlagen: Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation [HVBG], o.J, Landesamt für Vermessung und Geobasisinformationen Rheinland-Pfalz [LVermGeoRLP], 2020a, MWKEL RLP, 2013b; Zweckverband Welterbe Oberes Mittelrheintal, 2008).....	13
Abbildung 5 Siedlungsräume im Mittelrheintal: Orte und Siedlungen entwickeln sich aus den Gegebenheiten der Landschaftsstruktur - sie schmiegen sich eng zwischen Fluss und Fels oder liegen auf den Höhen. (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020).....	14
Abbildung 6 Beobachtete Änderung der globalen Durchschnittstemperatur bezogen auf die Referenzperiode 1951-1080 (Quelle: National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2019)	16
Abbildung 7 Räumliche Verteilung der Temperaturänderungen auf der Erdoberfläche. Signifikante Änderungen sind mit ‚+‘ gekennzeichnet (Quelle: IPCC, 2015).....	17
Abbildung 8 Temperaturanomalie: Beobachtete Änderungen der Durchschnittstemperatur in Deutschland relativ zur Referenzperiode 1961-1990 (Quelle: Deutscher Wetterdienst [DWD], 2020a)	17
Abbildung 9 Weitere Klimawandelfolgen in Deutschland seit 1881 (Quelle: DWD, 2020b) ...	18
Abbildung 10 Entwicklung der Jahresdurchschnittstemperatur der Luft auf 2 m Höhe in Rheinland-Pfalz und Saarland während der Periode 1881-2019 (DWD, 2020a).....	19
Abbildung 11 Niederschlagsentwicklung in Rheinland-Pfalz und Saarland während der Periode 1881-2019: a) Jahressumme; b) Summe Sommerhalbjahr; c) Summe Winterhalbjahr (DWD, 2020a).	20
Abbildung 12 Entwicklung der Lufttemperatur im Mittelrheingebiet: a) Jahresmittelwert; b) Maximale Tagestemperatur im Mittelrheingebiet (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020).....	21
Abbildung 13 Räumliche Verteilung der mittleren Jahrestemperatur (Referenzzeitraum 1971-2000) im Mittelrheingebiet	22
Abbildung 14 Entwicklung der jährlichen Anzahl der Hitzetage im Mittelrheingebiet während der Periode 1951-2019 (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020. Datenquelle: DWD)	22
Abbildung 15 Entwicklung der jährlichen Anzahl der Sommertage im Mittelrheingebiet während der Periode 1951-2019 (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020. Datenquelle: DWD).	23

Abbildung 16 Entwicklung der Frosttage im Mittelrheingebiet während der Periode 1951-2019 (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020. Datenquelle: DWD).....	23
Abbildung 17 Entwicklung der Eistage im Mittelrheingebiet während der Periode 1951-2019 (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020. Datenquelle: DWD).....	24
Abbildung 18 Entwicklung der Durchschnittstemperatur (a) und Maximumtemperatur (b) im Mittelrheingebiet bis 2100 gemäß den Klimaszenarien SRES A1B, RCP 4.5 und RCP 8.5 (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020)	25
Abbildung 19 Entwicklung Tagesdurchschnittstemperatur vom 1960 bis 2100 im Oberen Mittelrheintal gem. den Szenarien: A1B, B1, RCP 2.6 und RCP 8.5 (siehe Tabelle 17, Anhang); eigene Darstellung: räumliche und zeitliche Mittelung für Region, Linearer Trend.....	26
Abbildung 20 Beispiel der räumlichen Verteilung des Klimaänderungssignals für Jahresdurchschnittstemperatur im Oberen Mittelrheintal von 2071-2100 zu 1971-2000 unter dem Modell CLM Szenario A1B Lauf 1, Angaben in °C (Jahresdurchschnitt).	27
Abbildung 21 Räumliche Verteilung des Jahresniederschlags im Mittelrheingebiet (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020)	28
Abbildung 22 Zeitliche Entwicklung des Jahresniederschlags im Mittelrheingebiet (a) sowie die Entwicklung des Mittelrhein-Niederschlags im hydrologischen Winter (b) und Sommer (c) (Kompetenzzentrum Klimawandelfolgen RLP, 2020).	29
Abbildung 23 Entwicklung der Starkniederschlagstage: Tagessumme > 20 mm (a), > 30 mm (b) sowie der Schneedeckentage (c) im Mittelrheingebiet (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020).....	30
Abbildung 24 Entwicklung der Jahressumme des Niederschlags (a) sowie Niederschlagssummen für meteorologische Sommer (b) und Winter (c) im Mittelrheingebiet bis 2100 gemäß Klimaszenarien SRES A1B, RCP 4.5 und RCP 8.5 (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz, 2020).....	32
Abbildung 25 Entwicklung Jahresniederschläge im Oberen Mittelrheintal während der Periode 1961- 2100 gem. den Szenarien: A1B, B1, RCP 2.6 und RCP 8.5.	33
Abbildung 26 Beispiel der räumlichen Verteilung des Klimaänderungssignals für Jahressumme des Niederschlags im Oberen Mittelrheintal von 2071-2100 zu 1971-2000 unter dem Modell CLM Szenario A1B Lauf 1 (mm pro Jahr).	33
Abbildung 27 Durch Sturzflut verursachte Schäden im Mittelrheintal: Erdrutsch und Zugentgleisung, Kestert (links, Quelle: Dedekind, 2011); Überschwemmung in St. Goar (Mitte, Quelle: Breitbach, 2019), Sturzflut in Fischbach (rechts, Quelle: Nitsch, 2018).....	35
Abbildung 28 Abflüsse der zehn größten Hochwasserereignisse am Pegel Kaub, abgeleitet aus Tagesmittelwerten von 01.11.1930 bis 31.12.2018 (Hochschule Koblenz/Kimmel 2020, Datengrundlagen: BfG, 2020; LfU RLP, o.J.–b).....	35
Abbildung 29 Hoch- und Niedrigwasser am Rhein: Hochwasser in St. Goar, 2011 (links, Quelle: Breitbach, 2011); Rhein-Niedrigwasser im Sommer 2018 – der Mäuseturm bei Bingen. (BfG, 2019, S. 12).....	36
Abbildung 30 Schema: Auswirkungen von Grün auf das Stadtklima: 1) Verdunstungskühle von Vegetations- und Wasserflächen verringert die Erwärmung, 2) Bebaute Umwelt speichert die	

Wärme der Sonneneinstrahlung, 3) Vegetations- und Wasserflächen, Kaltluftbahnen, Fassaden- und Dachbegrünungen etc. wirken positiv auf das Stadtklima (Quelle: Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung [HMWVL], 2012, grafisch leicht verändert)	39
Abbildung 31 Einfluss verschiedener Klimaanpassungsmaßnahmen auf die lokale Außentemperatur (Quelle: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin, 2014).....	40
Abbildung 32 Niederschlag und oberirdischer Abfluss in Abhängigkeit des Untergrundes (Quelle: BMVI, 2017)	41
Abbildung 33 Leistungen eines Stadtbaumes in Zahlen (Auszug, Quelle: (LWG, 2015)).....	42
Abbildung 34 Beispiel einer Fassadenbegrünung (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner).....	43
Abbildung 35. Beispiel einer extensiven Dachbegrünung mit Sedum- und Kräutergesellschaften (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner)	43
Abbildung 36 Temperaturverteilung und -änderungen durch bauliche Maßnahmen (Quelle: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin, 2010)	44
Abbildung 37. Verschiedene Varianten zur Begrünung von Dach, Hof- und Fassadenflächen (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner)	46
Abbildung 38 Beispiele für Grünstrukturen (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner)	47
Abbildung 39 Beispiele blau-grüner Infrastrukturen (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner)	47
Abbildung 40 Einsatz von Gemüsekulturen im öffentlichen Raum: Essbare Stadt Andernach" (Quelle: Andernach Tourismus, 2020)	48
Abbildung 41 Natürlicher Mittelgebirgsbach: Brühlbach/ Mörsbach (links, Quelle: UBA, 2014, Foto: LUWG, Mainz) sowie verändertes, hier mit Mauern eingefasstes Gewässer: Eingemauerter Abschnitt des Eschbachs in Waldesch bei Koblenz (Savin, 2017).....	49
Abbildung 42: Beispiel der Umgestaltung eines Gewässerquerschnitts, um den Hochwasserschutz und die biologische Vielfalt zu verbessern (UBA, 2020b)	49
Abbildung 43: Renaturierter Gewässerabschnitt mit Zugang zum Gewässer in der Verbandsgemeinde Rhens, Ortsteil Brey (Paulus, 2012)	50
Abbildung 44: Leitfäden zum Umgang mit Starkregen (HLNUG, 2018; IBH & WBW, 2013)..	51
Abbildung 45: Einfluss der Oberflächen auf die Abflussbildung (Ingenieurbüro Reinhard Beck, in BBSR, 2018).....	52
Abbildung 46: Mulden und Mulden-Rigolensysteme zum Wasserrückhalt (Quelle: Matzinger et al., 2017, S. 12–13; Fotos: IPS).....	53
Abbildung 47: Wasserkreislauf mit und ohne Dachbegrünung (Optigrün International AG, 2020)	53
Abbildung 48: Wasserführende Gräben (links, Quelle: Matzinger et al., 2017, Foto: Dreiseitl) und tiefergelegte Freiflächen zum Wasserrückhalt (Mitte, rechts): Frankfurt Riedberg, rechts nach starkem Regen (Fotos: Hochschule Koblenz/Ziegler 2018)	54
Abbildung 49 Leitfaden Starkregen – Objektschutz und bauliche Vorsorge (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung [BBSR], 2018)	55

Abbildung 50: Nebelduschen (links, Quelle: Stadt Wien) Trinkwasserspender (Mitte, Quelle: (Stadt Remagen, 2020) und Wasserspielplätze zur Kühlung (rechts, Quelle: Stadt Bingen, 2020)	56
Abbildung 51: Badeschiff in Berlin (Foto: mauritius images/ travelstock44/Alamy über GEO.de, Wasserlauf und „Strand“ auf dem Science Center „Nemo“ in Amsterdam (Quelle: www.amsterdam.info.....	56
Abbildung 52 Flächenversiegelung in Deutschland 1992 und 2012. (Quelle: (Röpke & Lippelt, 2014)).....	60
Abbildung 53 Vergleich unversiegelter und versiegelter Flächen der Bundesländer (außer Sachsen-Anhalt) 1992 und 2012 (Quelle: UBA, 2020a)	61
Abbildung 54 Trend-Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsfläche in Deutschland in Hektar pro Tag mit dem Ziel der Nachhaltigkeitsstrategie 2030 (Quelle: Bundesregierung, 2016)...	62
Abbildung 55 Bodenversiegelung im Wasserhaushalt (Quelle: (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen [LBEG NI], 2019).....	64
Abbildung 56 Einfluss von Bodenversiegelungen auf die Versickerung von Niederschlagswasser. (Quelle: Heinrich-Böll-Stiftung et al., 2015).....	64
Abbildung 57 Grafische Zusammenfassung der Auswirkungen der Bodenversiegelung im Welterbegebiet Oberes Mittelrheintal.....	65
Abbildung 58 Modellerte Kaltluftabflüsse mit 3D Modellen FITNAH und KALM Quelle: BMVBS, 2013b , Abb. 10)	67
Abbildung 59 Schematische Darstellung der Herkunftsräume, des Transportes und des belasteten städtischen Wirkungsraums der kalten Luft (Quelle: BMVBS, 2013bKLIMAMORO, 2013, Abb. 4).....	68
Abbildung 60 Schematische Darstellung von urbanen Wärmeinseleffekt, Flurwinden und orographischen Kaltluftströmungen (Quelle: BMVBS, 2013b, Abb. 5).	68
Abbildung 61 Übersichtskarte der gewählten Orte und Transekte im Mittelrheintal (Hochschule Koblenz/Kimmel 2020, Datenquellen: LVermGeoRLP, 2020a; Zweckverband Welterbe Oberes Mittelrheintal, 2008)	71
Abbildung 62: Anteil der Siedlungs- und Verkehrsflächen an der gesamten Bodenfläche der Gemeinden	74
Abbildung 63: Anteil der Siedlungsflächen an der Gesamt-Bodenfläche der Gemeinde Sankt Goar und Sankt Goarshausen (oben) sowie der Gemeinde Boppard (unten) (Quelle: Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz, 2020)	75
Abbildung 64 Zusammensetzung der Siedlungsflächen in Sankt Goar, Boppard und Sankt Goarshausen (Daten: Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz, 2020).....	76
Abbildung 65: Zusammensetzung der Verkehrsflächen in Sankt Goar, Boppard und Sankt Goarshausen (Daten: Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz, 2020).....	77
Abbildung 66 Steinernen Flächen um die Alte Burg (links), Warten am Fähranleger in praller Sonne (rechts) (Quelle: Hochschule Koblenz/ Kirchner 2020)	80

Abbildung 67 Zwei Bereiche des steinernen Marktplatzes; im rot markierten Bereich wurde hier seitens der TH Bingen die höchste Temperatur in der Stadt gemessen (vgl. Kapitel 5.5 , Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)	81
Abbildung 68 Mainzer Straße in zwei Richtungen, breit und ohne Bäume (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020).....	81
Abbildung 69 Aufheizungspotenzial Parkdeck Marienberg (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020).....	82
Abbildung 70 Groß- und kleinräumige Stellplätze ohne Bäume; Ausnahme: Parken am Ufer (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020).....	82
Abbildung 71 Aufheizungspotenzial am Rheinbalkon; Stellplätze entlang der B9 (Bildquelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)	84
Abbildung 72 Aufheizungspotenziale Rathausplatz und Bahnhofsumfeld (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020).....	85
Abbildung 73 Kirchengrund (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)	85
Abbildung 74 stark besonnte Straßenräume (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020) ...	86
Abbildung 75 Unbeschattete Parkflächen am Rheinufer (Quelle: Hochschule Koblenz/Ulrike Kirchner)	87
Abbildung 76 Die Uferanlagen: weitgehend steinern, wenig Großgrün, Pergolen funktionslos, ohne Schatten (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020).....	89
Abbildung 77 Unbeschatteter Spielplatz in der Dolkstraße neben Stellplätzen (Quelle: maps.google.com; Hochschule Koblenz/Kirchner 2020).....	89
Abbildung 78 Versiegelte Stellplatzflächen als Aufheizungspotenzial (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020).....	90
Abbildung 79 Gewässerkarte von Boppard (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020, Datengrundlagen: LfU RLP, 2018 (Gewässerstrukturgüte), LGB RLP, o.J., 2017 (Tiefenlinien und Erosionsgefährdung), MUEEF RLP, o.J.–b (Wassertiefe))	93
Abbildung 80 Boppard: Einmündung des Bruder-Michels-Bachs in den Rhein. Betonierte Sohle, erschwerter Zugang. (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020), Fraubach, maroder Rechen vor verrohrtem Abschnitt (Quelle: Hochschule Koblenz/Kaspar 2020).....	94
Abbildung 81 Boppard: Eingeengter Verlauf des Bruder-Michels-Bachs zwischen Häusern nach dem Spielplatz, kein Zugang (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020)	94
Abbildung 82 Boppard, Burdenbach als Rinne neben Gebäuden, (Quelle: Hochschule Koblenz/Kaspar 2020).....	95
Abbildung 83 Boppard, Mühlthalbach, vermauerte Ufer, kein Zugang, enger Brückendurchlass. (Quelle: Hochschule Koblenz/Kaspar 2020).....	95
Abbildung 84 Gewässerkarte von St. Goar (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020, Datengrundlagen: LfU RLP, 2018 (Gewässerstrukturgüte), LGB RLP, o.J., 2017 (Tiefenlinien und Erosionsgefährdung), MUEEF RLP, o.J.–b (Wassertiefe))	97

Abbildung 85 St. Goar, Abfluss des Lohbachs unter dem Rheinbalkon (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020), Einlauf des Lohbachs in die Verrohrung, Rechen, der zu Verklausung neigt, Einlaufquerschnitt evtl. zu gering dimensioniert (Quelle: Hochschule Koblenz/Gelhard 2020)	98
Abbildung 86 St. Goar, Natürlicher Gewässerab-schnitt des Lohbachs zwischen dem Ortsteil Biebernheim und dem ufernahen St. Goar (Quelle: Gelhard 2020)	98
Abbildung 87 Die Heerstraße in St. Goar während der Sturzflut 2017 (Quelle: Bretz et al., 2017)	99
Abbildung 88 St. Goar, Zugang ans Wasser, sonnige Treppenstufen hinter dem Rheinbalkon (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020)	100
Abbildung 89 St. Goar, Nähe Rathaus: Neu angelegtes Wasserbecken (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020)	100
Abbildung 90 Gewässer in St. Goarshausen (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020, Datengrundlagen: LfU RLP, 2018 (Gewässerstrukturgüte), LGB RLP, o.J., 2017 (Tiefenlinien und Erosionsgefährdung), MUEEF RLP, o.J.–b (Wassertiefe))	102
Abbildung 91 St. Goarshausen, Hasenbach: Einlauf in eine Verrohrung, Weingut Leonhardt, Kellerei Loreley; Auslauf des Hasenbachs aus Verrohrung, kein Zugang, vermauerte Ufer (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020)	103
Abbildung 92 St. Goarshausen, Auslauf des Forstbachs aus Verrohrung (Hochschule Koblenz/Kimmel 2020); Auslauf des Wellmicher Bachs (Quelle: Hochschule Koblenz/Oblinger, Wintgens, Zerwas 2020)	103
Abbildung 93 St. Goarshausen: Luftbild, Feuerbach und Hasenbach sowie Forstbach (Quelle: Google, o.J. © 2020 GeoBasis-DE/BKG, Geo Content, Maxar Technologies, Kartendaten: © 2020 GeoBasis-DE/BKG (© 2009))	104
Abbildung 94 St. Goarshausen: Pumpen als „Wasserspiele“, kein Trinkwasser (Hochschule Koblenz/Kimmel 2020)	105
Abbildung 95: Berechnete Kaltluftschneisen für Boppard und Umgebung (Quelle der Topographie- und Landnutzungsdaten: LVermGeoRLP, 2020b)	106
Abbildung 96: Berechnete Kaltluftschneisen für Boppard Stadt (Quelle der Topographie- und Landnutzungsdaten: LVermGeoRLP, 2020b)	107
Abbildung 97: Standorte mobile Wetterstation und Handmessung vom 14.09.2020 in Boppard	108
Abbildung 98: Temperaturverlauf in °C am 14.09.2020 Boppard, mit vier Wetterstationen und der Station von Agrarmeteorologie RLP	108
Abbildung 99: Globalstrahlung in W/m ² am 14.09.2020 Boppard, mit vier Wetterstationen	109
Abbildung 100: Windgeschwindigkeit in m/s am 14.09.2020 in Boppard, mit vier Wetterstationen und der Station von Agrarmeteorologie RLP	110
Abbildung 101 Windrichtungsverteilung auf den Standorten Bahnhof (a), Kreuzberg (b) Andreas-Schüller-Straße (c) und Mühlthal (d)	111

Abbildung 102 Berechnete Kaltluftschneisen für St. Goar und St. Goarshausen (Quelle der Topographie- und Landnutzungsdaten: GeoBasis-DE/ LVermGeoRLP, 2020b)	112
Abbildung 103: Berechnete Kaltluftschneisen für Sankt Goar Stadt, Quelle der Topographie- und Landnutzungsdaten: GeoBasis-DE/ LVermGeoRLP, 2020b)	112
Abbildung 104: Berechnete Kaltluftschneisen für Sankt Goarshausen Quelle der Topographie- und Landnutzungsdaten: GeoBasis-DE/ LVermGeoRLP, 2020b)	113
Abbildung 105 Maßnahmen- und Forderungskatalog (Quelle: Deutscher Städtetag, 2019)	116
Abbildung 106 Kriterien für die Auswahl von Stadtbaumarten im Klimawandel – ein Forschungsprojekt der LWG (Quelle: (LWG, 2015))	117
Abbildung 107 Baumrigole in Hamburg geplant (Quelle "Gepflegt: Multifunktionale Klima-Baumstandorte," 2020).....	118
Abbildung 108 Handbuch Grüne Wände (Quelle: Freie und Hansestadt Hamburg, 2020) ..	118
Abbildung 109 Handbuch Grüne Wände (Quelle: Freie und Hansestadt Hamburg & Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft [BUKEA], 2020).....	119
Abbildung 110 Beispiel für angenehmes Sitzen am Wasser unter Bäumen und Sprühnebler in Hann. Münden (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)	120
Abbildung 111 Radweg linksrheinisch im Bereich Bad Salzig (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020).....	121
Abbildung 112 Schattenbildung durch Pergolen oder Stützengänge, berankt oder verlattet – z.B. am Markt in Boppard [Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner (links, Mitte), Freitag Hartmann Architekten (rechts)]	121
Abbildung 113 Schattenbildung durch Schirme oder Segel (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020).....	122
Abbildung 114 Baumpflanzungen/ Straßenbäume dienen der Kühlung und der Luftreinhaltung – sie wären in der Mainzer Str. in Boppard eine Verbesserung (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020).....	123
Abbildung 115 Baumlose Stellplätze: an der B 9 in Bacharach (links), in Boppard (Mitte), in St. Goarshausen (rechts) (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020).....	123
Abbildung 116 Ranksystem als Alternative (Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020) ...	124
Abbildung 117 Kombination von Fotovoltaik und Gründach (links, Quelle: ZinCo GmbH) - mögliche Lösung für das Parkdeck in Boppard (rechts, Quelle: Hochschule Koblenz/Kirchner 2020)	124
Abbildung 118 Boppard: Spielplatz, darunter verläuft der Bruder-Michels-Bach (Quelle: Hochschule Koblenz/Kimmel 2020); St. Goar: Gründelbach (Hochschule Koblenz/Klasen 2020)	126
Abbildung 119 St. Goar, Grünfläche am Lohbach mit geringer Retentionswirkung (Foto: Hochschule Koblenz/Gelhard 2020).....	127
Abbildung 120 Boppard: Möglicher Retentionsraum (hier als „Rückhaltebecken“ bezeichnet) am Lohbach (Quelle: Hochschule Koblenz/Steffes 2020)	128

Abbildung 121 Hochwasser-Pass (Quelle: HKC).....	129
Abbildung 122 Boppard: Älteres Rechenbauwerk am Fraubach (Foto: Hochschule Koblenz/Thomas Kaspar, Bernhard Steffes 2020)	129
Abbildung 123 St. Goar: Lohbach, Bestehender Einlauf in die Verrohrung; Vorschlag des Einbaus eines Rechens (Hochschule Koblenz/ Gelhard, 2020).....	130
Abbildung 124 St. Goar: Bachbett Gründelbach, in das Treibgutrechen eingebaut werden könnten (Foto: Hochschule Koblenz/ Gelhard 2020); Einfacher Treibgutrechen zum Rückhalt von Ästen und Zweigen (IBH WBW 2013, Abb. 31)	130
Abbildung 125 Kleine Fließgewässer, die dem Rhein von Boppard bis St. Goar zufließen- samt der Tiefenlinien (Quelle: LGB RLP, 2017 – Ausdruck 04-2020, 1:100.000 im Originaldruck)..	A
Abbildung 126: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung und Entnahmen durch die öffentliche Wasserversorgung in Rheinland-Pfalz (Quelle: MUEEF RLP, 2018, S. 10).....	B

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 Mittlere Temperaturen und die Temperatur-Klimaänderungssignale zwischen Gegenwart, Näherer und ferner Zukunft im Oberen Mittelrheintal nach unterschiedlichen Modell-/Szenario Kombinationen.....	26
Tabelle 2 Mittlere Jahresniederschläge für die drei ausgewählte Klimaperioden (30-jährige Mittel) und die entsprechende Klimaänderungssignale für die nähere und ferne Zukunft nach unterschiedlichen Modell/Szenario Kombinationen.	31
Tabelle 3 Tabellarische Darstellung der zehn größten Hochwasserereignisse am Pegel Kaub, abgeleitet aus Tagesmittelwerten von 01.11.1930 bis 31.12.2018 (Hochschule Koblenz/Kimmel 2020, Datengrundlagen: BfG, 2020; LfU RLP, o.J.–b)	36
Tabelle 4 Die Tabelle zeigt fünf Elemente Grüner Infrastruktur und deren Vorteile im Hinblick auf Wasserhaushalt und Lebensqualität (Quelle Jurleit, 2013)	45
Tabelle 5 Anpassungspotenziale verschiedener Stadtstrukturtypen am Beispiel Berlins (Quelle: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin, 2010)	46
Tabelle 6 Typische Kaltluft- bzw. Kälteproduktionsraten unterschiedlicher Landnutzungen (Quelle: BMVBS, 2013b, Tabelle 8)	66
Tabelle 7 Lokale und regionale Wirksamkeiten von Kaltluftabflüssen in Tälern nach Kaltluftabflussraten (Quelle: BMVBS, 2013b, Tabelle 9)	66
Tabelle 8: Anteil der Siedlungsflächen an der gesamten Bodenfläche der Gemeinden (Daten: Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz, 2020)	73
Tabelle 9: Anteil der Verkehrsflächen an der gesamten Bodenfläche der Gemeinden (Daten: Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz, 2020)	73
Tabelle 10 Mögliche Betroffenheit von Boppard bezogen auf Klimawandelfolgen im Handlungsfeld Wasser und Gewässer	92
Tabelle 11 Mögliche Betroffenheit von St. Goar bezogen auf Klimawandelfolgen im Handlungsfeld Wasser und Gewässer	96
Tabelle 12 Mögliche Betroffenheit von St. Goarshausen bezogen auf Klimawandelfolgen im Handlungsfeld Wasser und Gewässer	101
Tabelle 13 Entsiegelungspotenziale in Kern-, Misch-, Wohn-, Gewerbe- und Industriegebieten sowie im Bereich von Hauptverkehrszügen. (Quelle: LANUV, 2017)	135
Tabelle 14 Jetzige Anzahl der Tropennächte sowie die Klimaänderungssignale für die nähere und ferne Zukunft an drei Stationen im Mittelrheintal.	C
Tabelle 15 Jetzige Anzahl der Hitzetage sowie die Klimaänderungssignale für die nähere und ferne Zukunft an drei Stationen im Mittelrheintal.....	C
Tabelle 16 Jetzige Anzahl der Tage mit Starkniederschläge sowie die Klimaänderungssignale für nähere und ferne Zukunft an Stationen Oberwesel, Boppard, Bacharach im oberen Mittelrheintal.....	D
Tabelle 17 Liste der verwendeten Kombinationen von Szenarien, Globalen und Regionalen Klimamodellen	E

Tabelle 18 Verwendete Datengrundlagen	F
---	---