

# Integriertes Klimaschutzkonzept der Stadt Bayreuth

POTENZIALSTUDIE  
KLIMAWANDELANPASSUNG



# Potenzialstudie Klimawandelanpassung

---

## Impressum

Im Auftrag der Stadt Bayreuth  
Luitpoldplatz 13  
95444 Bayreuth



Ansprechpartner  
Klimaschutzmanagement  
Amt für Umwelt- und Klimaschutz  
Stadt Bayreuth  
Kanalstr. 3  
95444 Bayreuth



Sachbearbeiterinnen: Jana Edlinger und Gesa Thomas

Tel. 0921 / 25-1142 und 0921 / 25-1141

Endenergie- und Treibhausgasbilanz und Potenzialstudien erstellt von  
EVF - Energievision Franken GmbH  
Schwarzenbacher Str. 2  
95237 Weißdorf  
Tel. 09251 / 85 99 99 0  
Email: [mail@energievision-franken.de](mailto:mail@energievision-franken.de)  
Web: [www.energievision-franken.de](http://www.energievision-franken.de)



Autoren:  
Valeska Schönlaue (M. Sc. Geoökologie)  
Dipl.-Geogr. Univ. Ralf Deuerling (Projektleitung)

## Urheberrechtshinweis

Die vorliegende Studie unterliegt dem geltenden Urheberrecht. Sollte einer Nutzung durch Dritte zugestimmt und der Inhalt an anderer Stelle wiedergegeben werden, sind die Autoren gemäß anerkannten wissenschaftlichen Arbeitsweisen zu nennen.

## Haftungsausschluss

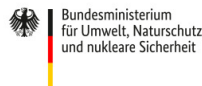
Die vorliegenden Ausführungen wurden nach dem aktuellen Stand der Technik, nach den anerkannten Regeln der Wissenschaft sowie nach bestem Wissen und Gewissen der Autoren erstellt. Irrtümer vorbehalten.

Fremde Quellen wurden entsprechend gekennzeichnet. Die Ergebnisse basieren weiterhin im dargelegten Maß auf Aussagen und Daten von fachkundigen Dritten, die im Rahmen von Befragungen ermittelt wurden. Alle Angaben und Quellen wurden sorgfältig auf Plausibilität geprüft. Die Autoren können dahingehend jedoch keine Garantie für die Belastbarkeit der ausgewiesenen Ergebnisse geben.

Weiterhin basieren die Ergebnisse der vorliegenden Ausführungen auf Rahmenbedingungen, die sich aus den dargelegten Gesetzen, Verordnungen und rechtlichen Normen ergeben. Diese, bzw. deren gerichtliche Auslegung, können sich ändern. Die Ausführungen können dahingehend nicht den Anspruch erheben, eine Rechtsberatung zu ersetzen und darf auch ausdrücklich nicht als eine solche verstanden werden.

Gefördert durch Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI) und der Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten im kommunalen Umfeld „Kommunalrichtlinie“ vom 22. Juli 2020.

Im Auftrag des:



## Inhaltsverzeichnis

Impressum .....	2
Inhaltsverzeichnis .....	4
1. Einleitung .....	5
1.1. Der Klimawandel .....	5
1.2. Bereits heute absehbare Klimaänderungen .....	6
1.3. Klimaschutz vs. Anpassung an den Klimawandel .....	10
2. Ausgangssituation in Bayreuth .....	12
2.1. Der Klimawandel in Bayern .....	12
2.2. Der Klimawandel in der Region Oberer Main .....	13
2.3. Der Klimawandel in der Stadt Bayreuth .....	17
3. Zukünftige Herausforderungen für die Stadt Bayreuth .....	20
3.1. Hitze in der Stadt und Folgen für Wohnen, Gesundheit und Demographie .....	20
3.1.1. Auswirkungen in Bayreuth .....	21
3.1.2. Handlungsempfehlungen .....	23
3.2. Starkregen und Hochwasser .....	28
3.2.1. Auswirkungen in Bayreuth .....	28
3.2.2. Handlungsempfehlungen .....	30
3.3. Starkwind und Sturm .....	36
3.3.1. Auswirkungen in Bayreuth .....	36
3.3.2. Handlungsempfehlungen .....	38
4. Fazit .....	40
Verwendete Abkürzungen .....	43
Abkürzungen allgemein: .....	43
Abkürzungen für Namen: .....	43
Physikalische und mathematische Einheiten: .....	43
Literatur- und Quellenverzeichnis .....	1
Wichtige Hinweise zu Nutzungs- und Urheberrechten sowie verwendeter Lizenzen Dritter .....	7
Abbildungsverzeichnis .....	8
Tabellenverzeichnis .....	9

# 1. Einleitung

## 1.1. Der Klimawandel

„Der Klimawandel stellt eine dringende und potenziell unumkehrbare Bedrohung für die menschlichen Gesellschaften und den Planeten dar und erfordert daher eine möglichst umfassende Zusammenarbeit aller Länder“ (UNFCCC 2015).

Dieser Satz leitet den völkerrechtlichen Vertrag des Übereinkommens von Paris ein, in welchem sich im Jahr 2015 die Bundesregierung zusammen mit 195 Staaten dazu verpflichtet hat, die globale Erwärmung bis Jahrhundertende auf deutlich unter 2°C gegenüber vorindustriellem Niveau zu begrenzen. Obwohl bereits im Jahr 2005 mit dem Kyoto-Protokoll ein erster rechtlicher Beschluss in Kraft trat, die globale Erwärmung einzudämmen, werden aktuell in allen Regionen weltweit und im gesamten Klimasystem Veränderungen hin zu einer globalen Erwärmung beobachtet (IPCC 2021). Verursacht wird dieser weltweite Temperaturanstieg vor allem durch die Emission von Treibhausgasen (THG).

Treibhausgase sind natürlicher Bestandteil der Atmosphäre, entstehen aber seit der Industrialisierung vor allem durch den Einfluss des Menschen. Vor allem in der Landwirtschaft, im Verkehr oder der Industrie werden diese Gase beispielsweise durch Massentierhaltung, Düngemittelproduktion und die Verbrennung fossiler Energieträger emittiert. Sie entstehen also durch die Herstellung aller alltäglichen Produkte und durch den Verbrauch von Energie. Da sowohl die Weltbevölkerung als auch der Lebensstandard zunimmt und sich damit die Nachfrage nach Gütern sowie der Energieverbrauch weltweit erhöht, ist es nicht verwunderlich, dass die globalen THG-Emissionen noch immer ansteigen. Auch wenn sie in Deutschland seit 1990 deutlich verringert werden konnten, sind sie im Jahr 2021 im Vergleich zum Vorjahr laut erster Berechnungen erneut deutlich angestiegen (HEIN ET AL. 2021) – und Deutschland hätte damit auch das Klimaziel 2020 verfehlt.

Den höchsten Anteil an THG-Emissionen in Deutschland haben mit 4,6 % Distickstoffoxid (Lachgas, N<sub>2</sub>O), mit 6,5% Methan (CH<sub>4</sub>) und – mit dem deutlich größten Anteil von 87,1 % – Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) (UBA 2021). Letzteres gilt als das wichtigste klimaschädliche Gas, weshalb Treibhausgase oft in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2</sub>e), also die Erwärmungswirkung eines Gases im Vergleich zu CO<sub>2</sub>, angegeben werden. All diese Gase verursachen den sogenannten Treibhauseffekt – daher auch der Name Treibhausgase. Der Treibhauseffekt sorgt – wie eben unter einem Glashaus – für die Erwärmung der Erdoberfläche und ist im Grunde eine gute Sache. Denn die Erdatmosphäre enthält natürlicherweise derartige Gase, welche verhindern, dass warme Sonnenstrahlung direkt wieder ins Weltall abgegeben wird. Aufgrund des natürlichen Effekts hat die Erdoberfläche eine Durchschnittstemperatur von 15°C, ohne ihn betrüge sie nur -18°C und Leben auf der Erde wäre nicht möglich. Doch durch den

anthropogenen Treibhauseffekt wird zusätzliches CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre emittiert und die Durchschnittstemperatur weiter erhöht – dies hat den menschengemachten Klimawandel zur Folge.

Dass ein Wirkzusammenhang zwischen menschengemachten Emissionen und einer Erwärmung des Planeten besteht, ist seit einiger Zeit so gut wie unbestritten (IPCC 2007; IPCC 2021B). So lässt sich genau nachverfolgen, dass THG-Emissionen seit Beginn der Industrialisierung drastisch anstiegen und parallel dazu der Temperaturanstieg begann (Abb. 1). So wurden innerhalb von fast 140 Jahren Wetteraufzeichnung in Deutschland 9 der 10 wärmsten Jahre im 21. Jahrhundert erfasst (IMBERY ET AL. 2021).

## 1.2. Bereits heute absehbare Klimaänderungen

Auch wenn der Klimawandel im öffentlichen Diskurs immer häufiger auftaucht und bei politischen Entscheidungen zunehmend eine Rolle spielt, konnten sich auf globaler Ebene noch keine Verbesserungen zeigen. So ergab der sechste Sachstandsbericht des Weltklimarates aus dem Jahr 2021, dass die globale Durchschnittstemperatur über Land und Ozean von 2001 bis 2020 rund 1°C wärmer war als im vorindustriellen Zeitraum 1850-1900 (Abb. 1). Auch in den letzten Jahren erwärmte sich die Erde weiter. Von 2011 bis 2020 waren Temperaturen sogar rund 1,1°C wärmer als im Vergleichszeitraum. Der Weltklimarat kommt zu dem Schluss, dass der Mensch das Klima in einer Geschwindigkeit erwärmt hat, die in den letzten 2.000 Jahren beispiellos ist (IPCC 2021B).

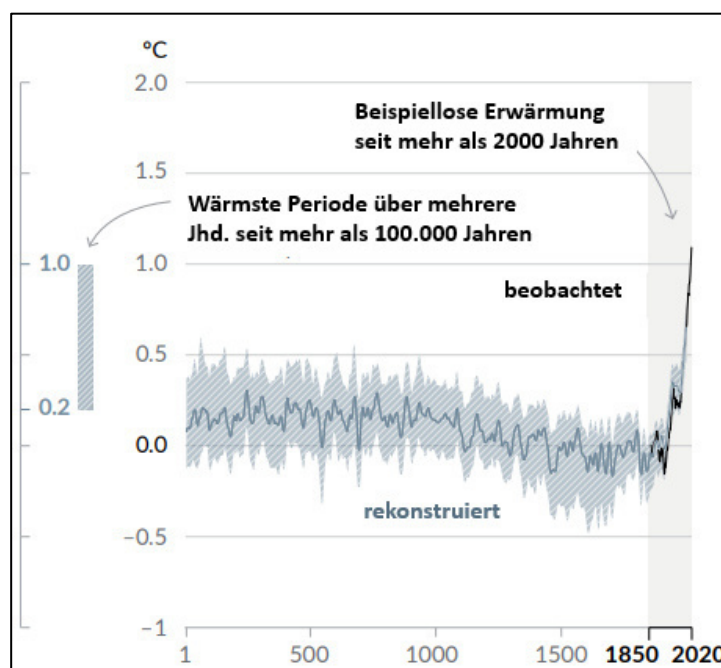


Abbildung 1: Änderungen der globalen Oberflächentemperatur in Relation zu 1850-1900. Rekonstruierte (Jahr 1-2000) und beobachtete (Jahr 1850-2020) Änderung der Oberflächentemperatur (Jahrzentschnitt)

(QUELLE: IPCC 2021B, MIT ÜBERSETZUNG LEICHT VERÄNDERT DURCH EVF 2022)

Der Temperaturanstieg wirkt sich bereits heute auf das thermodynamische Gesamtsystem der Erde aus. Im Zusammenhang damit spielen so genannte Kipp-Punkte im Klimasystem eine wichtige Rolle. Überschreitet die Erwärmung gewisse Schwellenwerte, die Kipp-Punkte, führt dies zu starken, unumkehrbaren und langfristigen Schädigungen des Erdsystems. Derartige Schwellenwerte beziehen sich etwa auf das Schmelzen der grönländischen und arktischen Eismassen (LENTON ET AL. 2008). Messbar ist der Schmelzvorgang bereits – so stieg der globale Meeresspiegel zwischen 1901 und 2018 um rund 0,2 m an (IPCC 2021B).

Da die steigenden THG-Emissionen neben dem Temperaturanstieg eine Störung des Wasserkreislaufes bewirken, wird mit dem Klimawandel die Dauer, Häufigkeit und Intensität von klimatischen Extremereignissen ansteigen (SALINGER 2005; IPCC 2007), was auch in Deutschland in den vergangenen Jahren verheerende Auswirkungen hatte. Dazu zählen Überschwemmungen und Sturzfluten, wie sie beispielsweise erst im vergangenen Jahr in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz mit desaströsen Folgen, oder auch Überschwemmungen, die in geringerem Maße im unmittelbaren Umfeld der Stadt Bayreuth - in Bindlach, Pegnitz und anderen Stellen im Landkreis Bayreuth - auftraten. Auch führte der extreme Dürresommer im Jahr 2018 zur schlechtesten Getreideernte seit 1994 (BMEL 2018) und damit zu schwerwiegenden wirtschaftlichen Folgen für die Landwirtschaft.

Dass die klimatischen Änderungen bereits heute messbare Schäden verursachen, spiegelt sich in etwa im Handeln der Rückversicherungsgesellschaft Münchner Rück wider. Als Versicherungsgesellschaft spürt diese die Sachschäden an Gebäuden und Infrastruktur infolge des Extremwetters direkt und investiert seit einigen Jahren in Erneuerbare Energien. Die Dringlichkeit, den Auswirkungen der Klimaänderung entgegenzuwirken, zeigt sich auch im direkten Vergleich der Einschätzung des Weltwirtschaftsforums (WEF) mit anderen globalen Risiken. Sollten die Klimaschutzbemühungen scheitern, würden die Auswirkungen des Klimawandels die von Atomwaffen und eines Atomkriegs übertreffen (vgl. Abb. 2).

Auch wird in Deutschland das Auftreten schwerer Hagel- und Gewitter-Schadensereignisse sehr wahrscheinlich und das von Tornados womöglich ansteigen (BROOKS 2013; GERSTENGARBE ET AL. 2013). Kürzliche Ereignisse wie das Auftreten eines Tornados in Kiel im Herbst 2021 und in Tschechien im Juni 2021 nahe der österreichischen Grenze führten zu massiven Schäden und vielen Verletzten. Begründet wird dies vor allem durch die Tatsache, dass sich durch erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen mehr Energie in der bodennahen Atmosphäre befindet, welche sich in derartigen Extremwettern entladen kann. Außerdem geht mit dem Klimawandel eine

Zunahme an Dürren und Hitzewellen sowie Waldbränden und Buschfeuern einher (MEEHL & TEBALDI 2004; STERL ET AL. 2008).



Abbildung 2: Globale Risiken im Vergleich

(QUELLE: WEF 2021, LEICHT VERÄNDERT DURCH EVF 2022)

Farbliche Legende: Risikokategorien: Blau = wirtschaftlich, grün = umweltbedingt, orange = geopolitisch, rot = gesellschaftlich, lila = technologisch.

Vor allem von der verlängerten Dauer dieser klimatischen Extremereignisse ist Mitteleuropa explizit betroffen. Dies hängt mit der durch den Klimawandel verursachten Verlangsamung des Jetstreams, ein starker Windstrom in einigen Kilometern Höhe, zusammen (SCREEN &



SIMMONDS 2014; PETOUKHOV ET AL. 2013). Durch die Abschwächung dieses globalen Windregimes werden die Großwetterlagen auf der Nordhalbkugel über längere Zeiträume stabil gehalten. Tief- und Hochdruckgebiete bewegen sich dann nur langsam weiter. Zu beobachten war dies kürzlich im Dürresommer 2018. Die außerordentlich heißen und trockenen Bedingungen dauerten in diesem Jahr für unüblich lange Zeit an.



Abbildung 3: Lang anhaltende Trockenheit in der Region Bayreuth im Juli 2019

(QUELLE: BT 2021B)

Im Gegensatz dazu hielt sich eine Unwettersituation im Sommer 2021 in Deutschland auffallend lange stabil, welche Starkregenereignisse in vielen Teilen Deutschlands verursachte.

Wetter

## Unwetter im Landkreis Bayreuth: Gemeinde nach Starkregen an vielen Stellen überschwemmt

Das Unwetter in der Region Bayreuth am Samstag (5.6.2021) ist in Bindlach besonders stark ausgefallen. Viele Orte innerhalb der Gemeinde wurden überschwemmt.



Bindlach wurde von dem Unwetter am Samstag hartgetroffen. Foto: NEWS5/Holzheimer

Abbildung 4: Hochwasser nach Starkregen in Bindlach im Juni 2021

(QUELLE: BT 2021A)

Die Dürre 2018 führte milliardenschwere Schäden allein in deutschen Wäldern herbei, mit gravierenden wirtschaftlichen Folgen (BMEL 2021) und die Hochwasserkatastrophe im Westen Deutschlands forderte neben Sachschäden in Milliardenhöhe über 100 Todesfälle (BEIERKUHNLEIN 2021).

All diese geschilderten Probleme wirken sich im Umkehrschluss direkt auf das menschliche Leben aus. Der Wassermangel in 2018 und Dauerniederschläge, Hagelereignisse und Hitze in 2019 führten zu gravierenden Obst- und Gemüsekulturschäden und Ernteeinbußen (BMEL 2019). Stürme, Dürren und Meeresspiegelanstieg wirken sich auf Welthandel und globale Beziehungen aus. Diese wirtschaftlichen Folgen sind auch in Bayern spürbar. Im Freistaat sind bestimmte Bevölkerungsschichten und Wirtschaftsgüter direkt von den Auswirkungen des Klimawandels bedroht. Ein prägnantes Beispiel ist der Alpenraum. Studien ergaben, dass sich die Alpenregion in Zukunft womöglich schneller erwärmen wird als das globale und bayerische Mittel (KOTLARSKI ET AL. 2018). Bereits heute spürt der Winter- und Skitourismus die Auswirkungen des Klimawandels durch eine verminderte Schneesicherheit (StMUV 2021).

### 1.3. Klimaschutz vs. Anpassung an den Klimawandel

Es ist somit von essenzieller Bedeutung, den klimatischen Änderungen durch Maßnahmen des Klimaschutzes entgegenzuwirken, da der Klimawandel nicht nur entfernte Länder und

Regionen betrifft, sondern auch Deutschland und seine Kommunen direkt. Auch wenn die Thematik eine übergeordnete, den gesamten Globus betreffende Problematik darstellt, kann es besonders effizient sein, Klimaschutzkonzepte auf kommunaler Ebene zu entwickeln, da explizit auf kleinräumige Strukturen und das Lokalklima eingegangen werden kann. Das Integrierte Klimaschutzkonzept für Bayreuth soll in diesem Zusammenhang ein erster Wegweiser sein und den Handlungsbedarf und mögliche Maßnahmen aufzeigen.

Klimaschutz kann aber nur bewirken, dass zusätzliche, den Klimawandel antreibende THG-Emissionen in Zukunft einen möglichst geringen Wert annehmen und damit der Klimawandel nicht weiter angetrieben wird. Er beinhaltet konkrete Handlungen, die die Klimaänderung vermindern, verlangsamen oder gar stoppen können. Es handelt sich dabei um so genannte Vermeidungsstrategien, die eine Mitigation des Klimawandels zum Ziel haben, vordergründig durch die Reduktion von THG-Emissionen.

Umschwünge im Klima als Folge der Erderwärmung sind aber bereits heute spürbar. Aller Wahrscheinlichkeit nach wird sich die Oberflächentemperatur bis zum Jahr 2050 weiter erhöhen, auch wenn Maßnahmen zur Emissionsminderung getroffen werden (IPCC 2021B). Dies liegt daran, dass das Erdsystem nicht sofort, sondern zeitlich verzögert auf Veränderungen reagiert. **Die Erde samt ihrer Atmosphäre ist ein träges System und würde sich also selbst dann noch eine Zeit lang weiter verändern, wenn ab sofort gar keine Emissionen mehr ausgestoßen werden würden. Deshalb ist es von enormer Bedeutung, sich an die heute bereits absehbaren Wirkfolgen anzupassen.** Hierbei sind Anpassungsstrategien, also eine Adaption an den Klimawandel, ein sinnvolles Instrument. Es handelt sich dabei um Handlungen, mit den bereits eingetretenen oder prognostizierten Veränderungen umgehen zu können und negative Chancen weitmöglichst abmildern zu können.

Maßnahmen zur Anpassung und zum Klimaschutz können und sollten dabei Hand in Hand gehen. Zum einen können dadurch die Lebensbedingungen für den Menschen teilweise gesichert, und zum anderen kann die Resilienz des Erdsystems erhöht werden. Resilienz kann definiert werden als „die Fähigkeit eines Systems, Störungen zu absorbieren und sich während des Wandels so zu reorganisieren, dass es im Wesentlichen dieselbe Funktion, Struktur, Identität und Rückkopplungen beibehält“ (WALKER ET AL. 2004). Innerhalb der letzten 10.000 Jahre war das Erdsystem hinsichtlich Umweltveränderungen ungewöhnlich stabil – ein Zustand, der nun, vor allem durch die große Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, gefährdet ist (ROCKSTRÖM ET AL. 2009). Es ist deswegen sehr wichtig, sich mit den Wirkfolgen einer Erwärmung auf globaler, und vor allem regionaler Ebene auseinanderzusetzen und Strategien für eine Adaption an die absehbaren Klimaänderungen herbeizuführen.

## 2. Ausgangssituation in Bayreuth

### 2.1. Der Klimawandel in Bayern

In Bayern sind die Folgen des Klimawandels bereits heute spürbar. Da sich Landmassen doppelt so schnell erwärmen wie Ozeane, ist auch Bayern als ozeanfernes Gebiet in hohem Maße betroffen. So ist die Erwärmung im Bundesland seit 1881 fast doppelt so stark wie im globalen Durchschnitt (LFU 2021A). Der Verlauf der Jahresmitteltemperatur in Bayern von Ende des 19. Jahrhunderts bis heute zeigt, dass sich seit Mitte des 20. Jahrhunderts der Wert um 1,9 °C erhöht hat (Abb. 5). Die zukünftige Entwicklung der Temperaturen hängt vor allem von Art und Umfang der globalen Klimaschutzmaßnahmen ab, die umgesetzt werden. Klimasimulationen zeigen jedoch deutlich, dass die Temperaturen ohne jegliche Maßnahmen bis Ende des Jahrhunderts kontinuierlich ansteigen würden – und mit besonders warmen Jahren wie 2018 öfter zu rechnen wäre. In Szenarien mit Klimaschutzmaßnahmen würden die Temperaturen – da das Erdsystem träge ist – zunächst trotzdem weiter ansteigen.

Bei Betrachtung der klimatischen Trends von 1951 bis 2019 zeigte sich, dass die Sommer heißer und trockener, die Winter wärmer, und die Frühlinge starkregenreicher wurden. Die Anzahl an Tagen mit über 30 °C im Sommer nahm um 9 Tage zu, während im Winter durchschnittlich 15 Tage weniger Temperaturen unter dem Gefrierpunkt aufwiesen (LFU 2021A).

Zukünftig wird sich die Erwärmung mit dem Klimawandel am drastischsten in den Sommermonaten bemerkbar machen: Die Anzahl an Hitzetagen und tropischen Nächten wird zunehmen. Vermehrte Hitzeereignisse können allerdings schwere Folgen für menschliche Gesundheit und die Landwirtschaft mit sich bringen. Greifen Klimaschutz- und Anpassungsstrategien nicht rechtzeitig, wird in Bayern gegen Ende des Jahrhunderts eine Erwärmung um 3,8 °C (gegenüber dem Bezugszeitraum 1971-2000) erwartet; mit sofortigen Maßnahmen lässt sich dieser Anstieg auf bestenfalls 1,1 °C begrenzen (LFU 2021A).

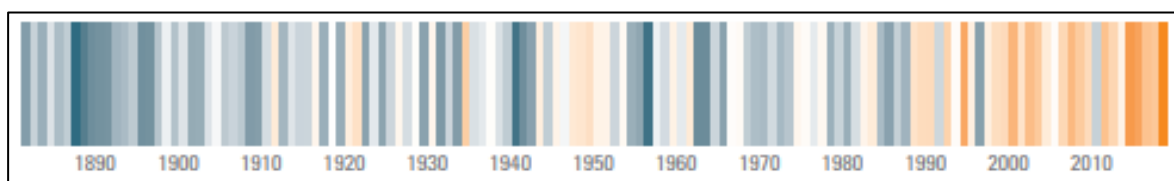


Abbildung 5: Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Bayern von 1881 bis heute. Jeder Streifen im Band steht für ein Jahr. Die Spanne reicht von 6,0°C (dunkelblau) bis 9,9°C (orange)

(QUELLE: LFU 2021A)

Daneben wird auch die kalte Jahreszeit im Trend milder werden. Vor allem für den Winter- und Skitourismus kann mit wirtschaftlichen Einbußen gerechnet werden, da anstelle von Schnee vermehrt Regen fallen wird (ABEGG ET AL. 2007). Bezüglich der über das Jahr verteilten Niederschlagsmuster gibt es bayernweit keinen eindeutigen Trend. Es wird allerdings von einer Umverteilung der jährlichen Niederschlagsmengen mit einer Abnahme im Sommer und einer Zunahme im Winter ausgegangen (LFU 2021A). Dabei wird es allerdings wahrscheinlich zu einem höheren Anteil an Starkregenereignissen kommen, wie sie etwa im Sommer 2016 in Bayern oder zuletzt im Juni 2021 in der Region Bayreuth auftraten und zu Überflutungen mit schweren Folgen für die ansässige Bevölkerung führten.

## 2.2. Der Klimawandel in der Region Oberer Main

Bayerns Klima ist nicht homogen über die gesamte Fläche des Freistaates ausgeprägt. Stattdessen lässt es sich in sieben Regionen einteilen, die sich hinsichtlich ihrer Temperatur- und Niederschlagsmuster sehr ähnlich sind. Diese Regionen folgen keinen Verwaltungsgrenzen, sondern sind vor allem durch das Relief, also unter anderem durch die Höhenlage, bestimmt. Grundsätzlich lässt sich in etwa sagen, dass eine höhere Lage kühlere Temperaturen und größere Niederschlagsmengen bedingt. Die Stadt Bayreuth liegt ganz im Osten der Klimaregion Mainregion (Abb. 6). Da regionale Klimamodelle keine feinere Auflösung ermöglichen, ist die Mainregion für Klimasimulationen Bayreuths von Bedeutung – es soll allerdings darauf hingewiesen werden, dass die Region auch deutlich wärmere Städte wie Bamberg und Würzburg miteinschließt.

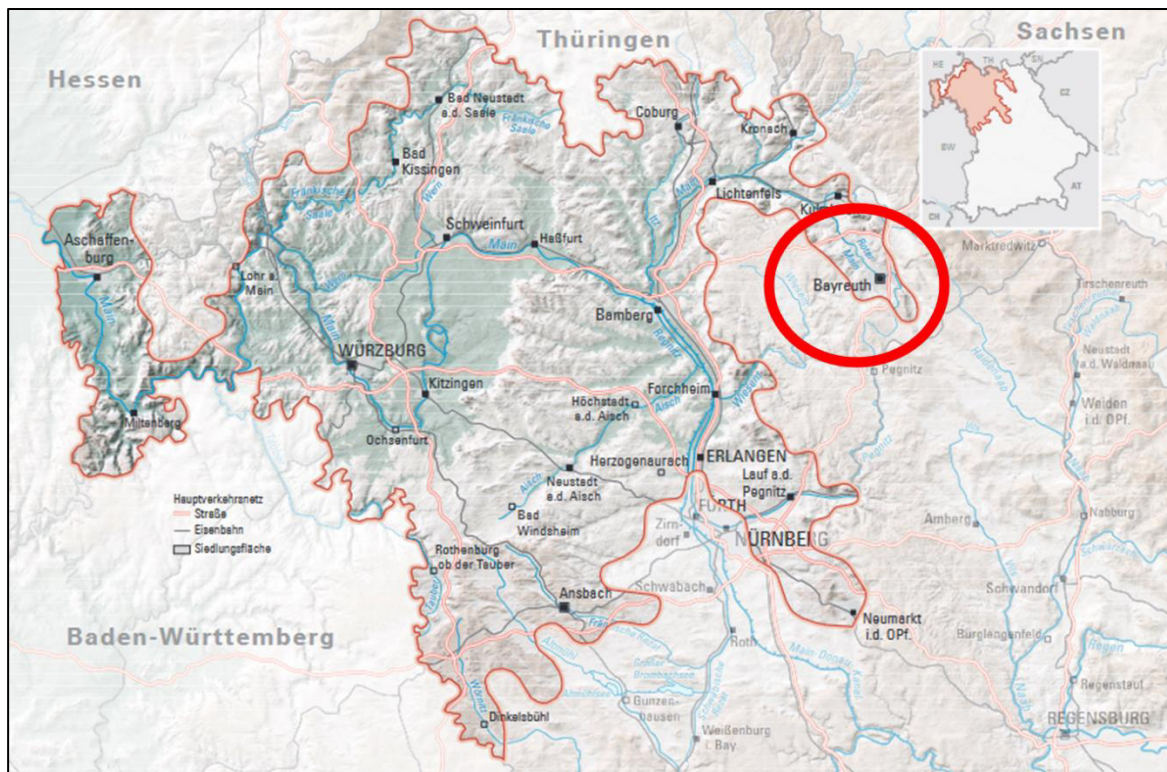


Abbildung 6: Die Klimaregion Main mit einer Höhenverteilung zwischen 102 und 603 m ü. NN

(QUELLE: LFU 2021B, LEICHT VERÄNDERT DURCH EVF 2022)

Geprägt wird die Main-Klimaregion durch Landschaftsformen wie etwa das Obermaintal oder das Regnitztal bei Bamberg. Diese Region zeichnet sich im Vergleich zu den anderen Klimaregionen durch wärmere Temperaturen aus. So liegt sowohl die kälteste, als auch die seit 1881 gemessene wärmste Jahresmitteltemperatur  $0,7^{\circ}\text{C}$  über dem bayerischen Mittel.

Sie ist damit die wärmste Klimaregion Bayerns und deswegen besonders von einer Zunahme an Hitze und Trockenheit betroffen. Seit Mitte des Jahrhunderts sind die Temperaturen in der Mainregion bereits um  $1,8^{\circ}\text{C}$  gestiegen (LFU 2021B). Würden THG-Emissionen weiterhin in gleichem Maße wie bisher erzeugt werden, könnte die Jahresmitteltemperatur bis Ende des Jahrhunderts auf  $3,6$  bis  $4,8^{\circ}\text{C}$  ansteigen – mit ambitionierten Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken, würde der Anstieg nur  $1,0$  bis  $1,6^{\circ}\text{C}$  betragen (Abb. 7).

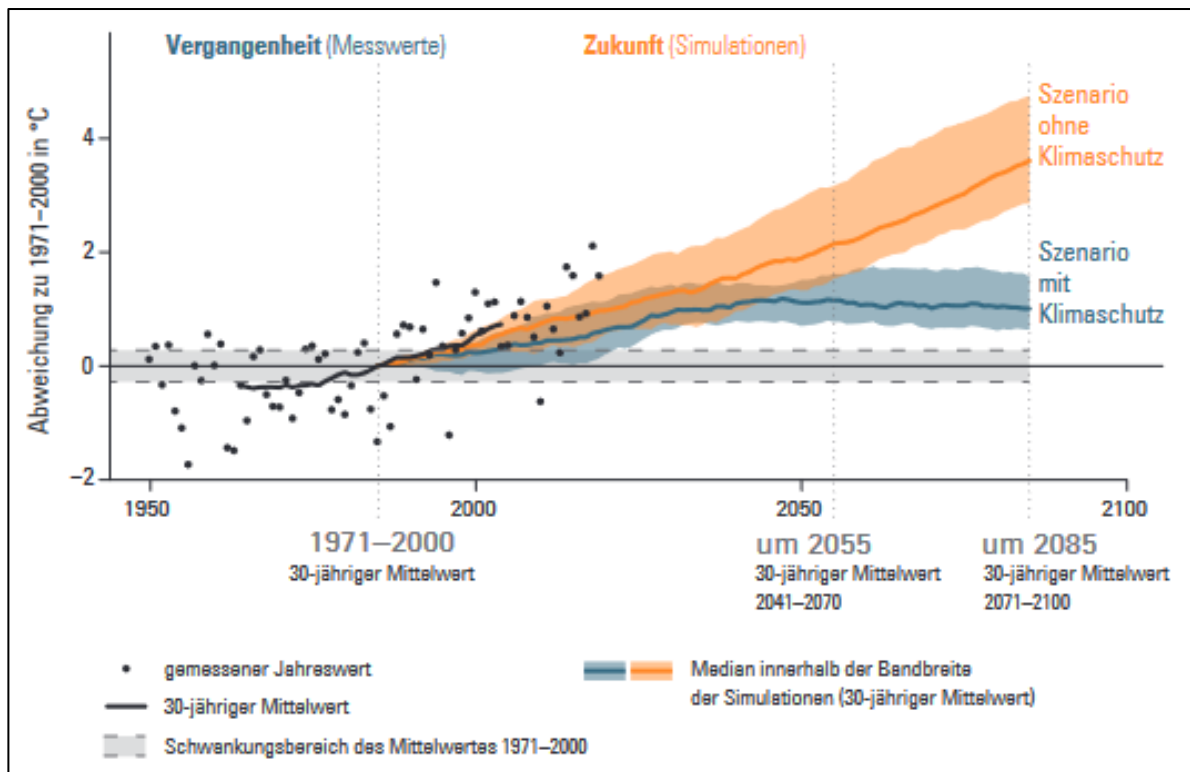


Abbildung 7: Jahresmitteltemperatur im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971-2000 in der Mainregion (QUELLE: LFU 2021B)

Wie die aktuellen Temperaturdaten zeigen (schwarze Linie sowie Punkte), folgt die Entwicklung bisher dem Szenario ohne zusätzliche Klimaschutzambitionen mit unveränderter Nutzung fossiler Energieträger. Anpassungsmaßnahmen an eine allgemeine Erwärmung in der Mainregion sind daher von großer Dringlichkeit. Der Trend zeigt, dass Hitzetage zunehmen, da die Anzahl an Tagen mit über 30°C auf etwa 10 Tage im Jahr angestiegen ist. Parallel kam im Schnitt eine Woche ohne Regen von April bis Juni hinzu – die Trockenperioden werden also länger. Die Bedingungen während der Wintermonate werden – wie bayernweit auch – milder. In der Mainregion hat die Anzahl an Tagen mit unter 0°C (Frosttage) im Jahr um 14 Tage abgenommen. Ähnlich wie in bayernweiten Prognosen zeichnet sich hinsichtlich der Jahresniederschlagsmenge kein eindeutiger Trend ab, allerdings nehmen die Tage mit Starkregenereignissen mit mindestens 30 mm Niederschlag um 0,4 Tage im Jahr zu (LFU 2021B). Werden einzelne Niederschlagsereignisse genauer betrachtet, ist eine signifikante Häufigkeit an langen Trockenperioden zwischen März und Mai innerhalb der letzten zwei Jahrzehnte erkennbar (FOKEN & LÜERS 2015). Dies wirkt sich nachhaltig auf die Land-, Wein- und Forstwirtschaft aus. Die Wälder der Region zeigten vor allem nach dem Dürresommer 2018 deutliche Schäden, von welchem sich einige Baumarten noch immer nicht erholen konnten (BELOIU ET AL. 2020). Die Nutzung der Ressource Wasser könnte in Zukunft deswegen konfliktreicher werden.

Die Klimaänderungen in der Mainregion lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Tabelle 1: Änderung des Klimas in der Mainregion und Modellierung für ein Szenario „ohne ambitionierten Klimaschutz“

Kennwert	Vergangenheit (gemessen)		Zukunft ohne Klimaschutz
	Seit 1951 bis 2019	Referenzzeitraum 1971-2000	Bis 2100 ggü. Referenz
	Trend	Mittelwert	Mittelwert
Jahresmitteltemperatur:	+1,8 °C	8,5 °C	+3,6 °C
Wintertemperatur:	+2,1 °C	0,3 °C	+3,8 °C
Frühlingstemperatur:	+1,9 °C	8,3 °C	+3,1 °C
Sommertemperatur:	+2,2 °C	16,9 °C	+3,9 °C
Herbsttemperatur:	+1,2 °C	8,4 °C	+3,9 °C
Anzahl der Sommertage:	+27	37	+39
Anzahl der Hitzetage:	+10	6,2	+26
Anzahl der Tropennächte:	+0,01	0,03	+8,2
Anzahl der Hitzewellen pro Jahr:	+2,8	2,3	+4
Anzahl der Kühltage pro Jahr:	+26	37	+48
Anzahl der Heitztage pro Jahr:	-28	282	-53
Anzahl der Frosttage pro Jahr:	-22	96	-57
Anzahl der Eistage pro Jahr:	-14	23	-18
Maximale Frostdauer:	-11 Tage	23 Tage	-14 Tage
Jahresniederschlag:	+2%	710 mm	+4 %
Winterniederschlag:	+10%	170 mm	+16 %
Frühjahrsniederschlag:	+9%	161 mm	+14 %
Sommerniederschlag:	-16%	209 mm	-12 %
Herbstniederschlag:	+11%	172 mm	+1 %
Niederschlag frühe Vegetationsperiode (Apr-Jun):	-10%	184 mm	+7 %
Niederschlag späte Vegetationsperiode (Jul-Sep):	-4%	188 mm	-13 %

(QUELLE: LFU 2021B)

Gezeigt ist in der linken Spalte die bereits erfolgte, beobachtete Änderung der klimatischen Parameter von 1951-2019. In der mittleren Spalte sind die Mittelwerte für den Referenzzeitraum von 1971-2000 angegeben. Die Werte in der rechten Spalte zeigen die mittleren erwarteten Änderungen gegenüber



dem Referenzzeitraum (mittlere Spalte) für ein Szenario bis 2100 ohne weitere verstärkte Klimaschutzmaßnahmen (Szenario RCP8.5).

In der Region wird es also durchweg wärmer. Sie hat sich bereits um mehr als 1,5°C erwärmt und erwärmt sich schneller als das globale Mittel. Bis 2100 ist ohne wirksamen Klimaschutz eine Erwärmung von +3,6°C erwartbar. Die Sommer- und Hitzetage sowie Hitzewellen und Kühltage nehmen demnach deutlich zu. Dies hat eine extreme zusätzliche Hitzebelastung für sensitive Bevölkerungsgruppen zur Folge. Ebenso steigt hierdurch der Energiebedarf für Kühlung.

Dem gegenüber gehen die Heiztage deutlich zurück. Es muss fast einen Monat lang (28 Tage) weniger geheizt werden. Ebenso gehen die Frost- und Eistage deutlich zurück. Von den im Referenzzeitraum durchschnittlichen 23 Eistagen (Tagen an denen die Temperatur ganztägig unter 0°C liegt) werden bis 2100 sehr wahrscheinlich nur noch ca. 5 Tage pro Jahr verbleiben. Innerhalb der Schwankungsbreite der Modellierung könnten sogar gar keine Eistage mehr verbleiben. Die Auswirkungen auf die Ausbreitung von Schädlingen und Krankheits-Vektoren können in der vorliegenden Studie nur angedeutet werden.

Der Gesamtjahresniederschlag bleibt nahezu gleich. Änderungen betreffen hier vor allem die Zeiträume und die Intensität der Niederschlagsereignisse. Gerade im Winter und in den Übergangszeiten sorgen erhöhte Niederschlagsmengen für ein erhöhtes Risiko für Starkniederschläge. Dagegen gehen die Niederschlagsmengen im Sommer deutlich zurück. Dies betrifft vor allem auch die entscheidenden Phasen der Vegetationsperiode. Dürren werden immer häufiger zu geringeren Ernteerträgen oder sogar zu ganzen Ausfällen führen. Aber auch Vitalität und Wachstum forstwirtschaftlich wichtiger Bäume wird stark beeinträchtigt.

### **2.3. Der Klimawandel in der Stadt Bayreuth**

Die Stadt Bayreuth liegt im westlichen Vorland des Fichtelgebirges in einem ausgedehnten Talkessel auf etwa 350 m ü. NN, wobei die Einrahmungen um die Stadt herum, wie etwa der Sophienberg, Höhen bis zu 600 m ü. NN erreichen. Der Jahresgang der Temperatur folgt einem für Mitteleuropa typischem Muster mit dem Herbst als kürzeste Jahreszeit. Die Niederschläge sind in den Monaten Juni bis Juli, sowie Dezember bis Januar am höchsten, daneben repräsentieren die Monate Februar bis April sowie der Spätwinter die trockensten Phasen. Im Zeitraum von 1961 bis 1990 betrug die langjährige Jahresmitteltemperatur 7,9°C, im Zeitraum 1971 bis 2000 waren es bereits 8,2°C und im Zeitraum 1991 bis 2020 sogar 8,6°C (FOKEN 2015; THOMAS 2022). Die Temperaturen in der Stadt werden somit generell wärmer, in allen Monaten (Abb. 8).

Meteorologische Daten werden in der Stadt durch den Deutschen Wetterdienst sowie die Universität Bayreuth regelmäßig erhoben, weswegen detaillierte Aussagen über die Entwicklung der Durchschnittswerte möglich sind. Der Verlauf der Durchschnittstemperatur über den langjährigen Zeitraum von 1851 bis 2018 zeigt seit 1960 einen aktuellen Erwärmungstrend von +3,8 °C alle 100 Jahre (Abb. 9). Zum Vergleich: Global beträgt selbiger Trend über Land eine Erwärmungsrate von +1,5 °C pro 100 Jahre. Dabei ist festzuhalten, dass ein Trend nicht mit einer Prognose gleichgestellt werden kann. Atmosphärische und thermodynamische Rückkopplungsprozesse, genauso wie THG-Emissionsszenarien, sind hier nicht eingebunden.

Wie Messungen der meteorologischen Messstationen im Ökologisch-Botanischen Garten in Bayreuth zeigten, sind Wärmeextreme innerhalb der letzten 30 Jahre in Bayreuth häufiger geworden. Demgegenüber sind Kälteextreme in den letzten 30 Jahren gar nicht mehr aufgetreten. Die jährliche Niederschlagsmenge zeigt – wie in der Klimaregion des Maingebietes – keinen klaren Trend. Allerdings verschieben sich genauso wie in der Region die Zeiträume, in welchen der Regen fällt. Der Trend zeigt eine Verlagerung der Niederschlagsmuster von einer Abnahme der Regenereignisse im Winter und Frühjahr hin zu einer Zunahme im Sommer und Herbst (BABEL 2021).

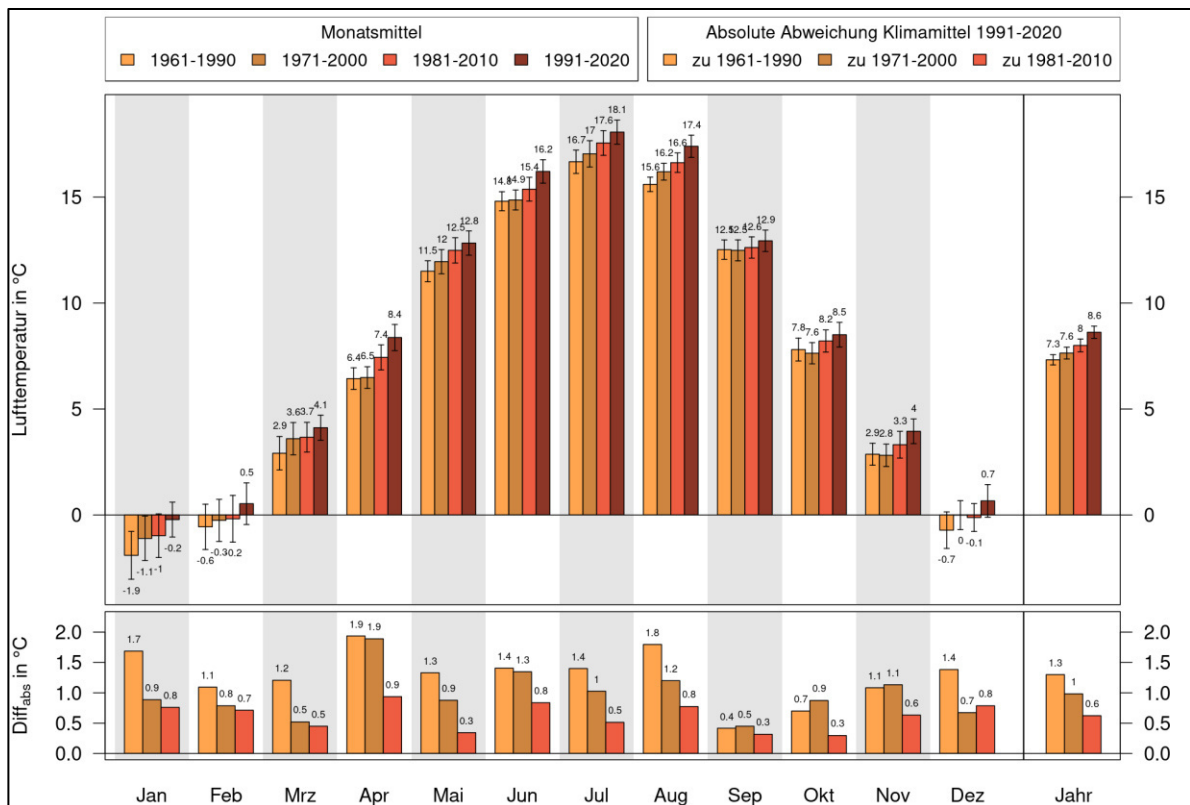


Abbildung 8: Durchschnittliche Monatstemperatur für die Klimaperioden 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 und 1991-2020, gemessen im Ökologisch-Botanischen Garten in Bayreuth.

(QUELLE: THOMAS 2022)

Vor allem der Monat April wird zunehmend trockener und seit 2002 trat kein Jahr mehr auf, in dem durchgehend feuchte Bedingungen herrschten. Parallel zur Verschiebung der Niederschläge in den Sommer und Herbst nimmt dabei der Anteil an Starkregenereignissen zu. Im Raum der Stadt Bayreuth treten diese vor allem in der Zeit von Januar bis Februar, sowie in den Monaten Mai und September auf (THOMAS ET AL. 2019). Da bei derartigen Regenereignissen innerhalb kurzer Zeit deutlich mehr Niederschlag als üblich fällt, impliziert dies eine erhöhte Hochwasser- und Überflutungsgefahr. Erst im Januar des letzten Jahres 2021 wurde am Roten Main in Bayreuth Hochwasser gemeldet. Am 05. Juni 2021 führte ein Starkregenereignis zu einem Hochwasser, welches im benachbarten Bindlach im unmittelbaren Umkreis Bayreuths erhebliche Schäden anrichtete (vgl. Abb. 4).

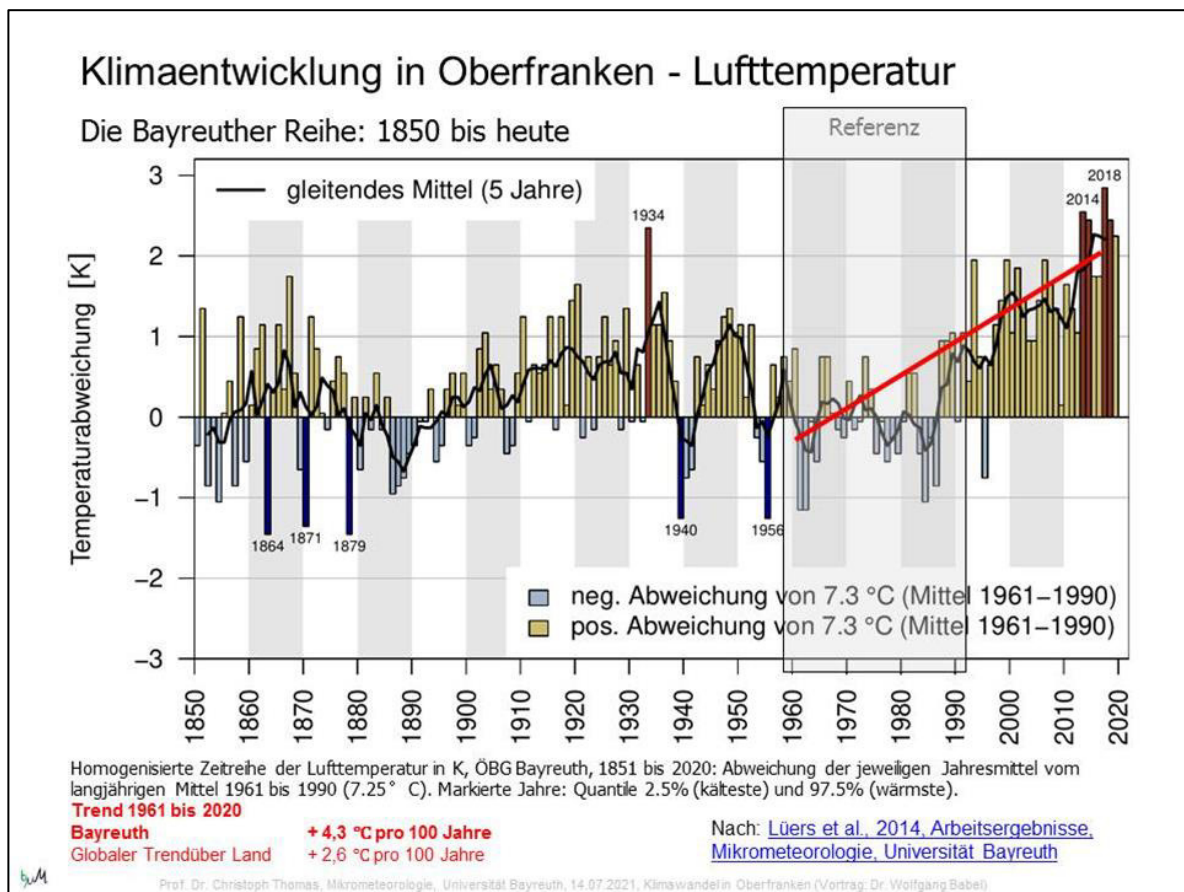


Abbildung 9: Abweichung der Jahresmitteltemperatur (1851 bis 2018) vom langjährigen Mittel 1961 bis 1990 in Bayreuth in Kelvin (K).

(QUELLE: THOMAS ET AL. 2019)

## 3. Zukünftige Herausforderungen für die Stadt Bayreuth

### 3.1. Hitze in der Stadt und Folgen für Wohnen, Gesundheit und Demographie

Die stark steigenden Durchschnittstemperaturen sowie die Häufung sommerlicher Wärmeextreme betreffen Bayreuth als Stadt besonders, da Städte sich durch den höheren Versiegelungsgrad stärker erhitzen als das ländliche Umfeld. Versiegelter Boden bedeutet eine luft- und wasserdichte Abdeckung des Bodens durch Bebauung, Asphaltierung, Bepflasterung oder anderweitige Befestigungen. In Städten befinden sich besonders viele versiegelte Flächen, und meist nur vereinzelt Wasserkörper oder Grünareale, die nächtliche Kaltluftbildung bewirken. So genannte Hitzeinseln entstehen dadurch, dass sich versiegelte Flächen wie dunkle Gebäude oder Straßen, stärker erwärmen als Grünflächen oder Gewässer und die Wärme auch über längere Zeit speichern. Dies hängt einerseits damit zusammen, dass dunkles

Material nur wenig der einfallenden kurzwelligigen Strahlung reflektiert, und andererseits den Großteil absorbiert und sich somit schnell erwärmt. Daneben entsteht aufgrund der großen menschlichen Aktivität und des hohen Energieverbrauches in Städten, wie etwa durch das hohe Verkehrsaufkommen oder klimaanlagenbetriebene Gebäude, Abwärme. Ungünstige städtische Architektur und enge Bebauung verhindert oftmals, dass Kaltluftmassen von offenen Flächen einströmen und sich Stadtkernbereiche nachts abkühlen können. Dieser Vorgang wird urbaner Hitzeinsel-Effekt genannt. Von diesem sind vor allem innerstädtische Gebiete betroffen. Der nächtliche Temperaturunterschied zwischen Innenstadt und Umland kann dabei bis zu 10°C betragen (RIECHEL & WIEMER 2022).

### 3.1.1. Auswirkungen in Bayreuth

Starke Hitze kann eine große Belastung für die menschliche Gesundheit darstellen. Vor allem in Innenstädten, wo Orte zur Abkühlung häufig fehlen, kann die räumliche Ballung von hohen Temperaturen gesundheitliche Beschwerden unter der Stadtbevölkerung hervorrufen. Besonders vulnerable Gruppen sind ältere Menschen, Personen mit chronischen Krankheiten und Kinder (RIECHEL & WIEMER 2021). Studien zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen extrem hohen Temperaturen und steigenden Todesfällen (KOPPE & JENDRITZKY 2014). Neben gesundheitlichen Risiken wird auch die Lebensqualität und Leistungsfähigkeit der Menschen beeinträchtigt. Bei lang andauernder Wärmebelastung können durch eine verminderte Leistung am Arbeitsplatz auch volkswirtschaftliche Schäden entstehen (ZEBISCH ET AL. 2005). Die Auswirkungen von Hitzeballung fanden in der Vergangenheit bereits Einfluss in die städtische Planung. Durch die Stadtklimabeurteilung im Jahr 2000 wurde die Renaturierung des Tappert initiiert und die Bedeutung des Kaltluftabflusses vom Sophienberg wurde hervorgehoben, welche nun mit der Umgestaltung des früheren Zapf-Geländes am Kreuzstein weiter etabliert wird. Ebenfalls wurde der Beirat für nachhaltige und stadtklimafreundliche Planung gegründet und mit der Freiflächensatzung ein wichtiger Schritt zur stadtklimaangepassten Freiflächengestaltung gemacht.

Allgemein hat sich gezeigt, dass sich Hitzeinseln umso intensiver aufheizen, je höher die Bevölkerungsdichte (und damit auch Wohnbebauung mit hitzespeichernden Massen) und je geringer der Anteil an Grün- und Wasserflächen in einer Stadt ist (AKBARI ET AL. 2016). Letztere sorgen durch Verdunstung und Beschattung für einen Abkühlungseffekt und bilden so genannte Park-Kälteinseln. **Obwohl die Stadt Bayreuth eine nur mittelgroße Stadt in Nordbayern ist, bildet sie eine Wärmeinsel im Stadtzentrum aus, welche genauso ausgeprägt ist wie in Großstädten.** Diese Wärmeinsel entsteht im Sommer zur Nachmittagszeit vor allem um den Bereich der Maximilianstraße und Kämmereigasse und bildet in Sommernächten den wärmsten Punkt des Stadtgebietes (THOMAS ET AL. 2019; BABEL 2021). Tagsüber heizen sich daneben auch die verdichteten, bebauten Flächen im Gewerbe- und Wohngebiet in St. Georgen im Sommer sehr stark auf (Abb. 10).

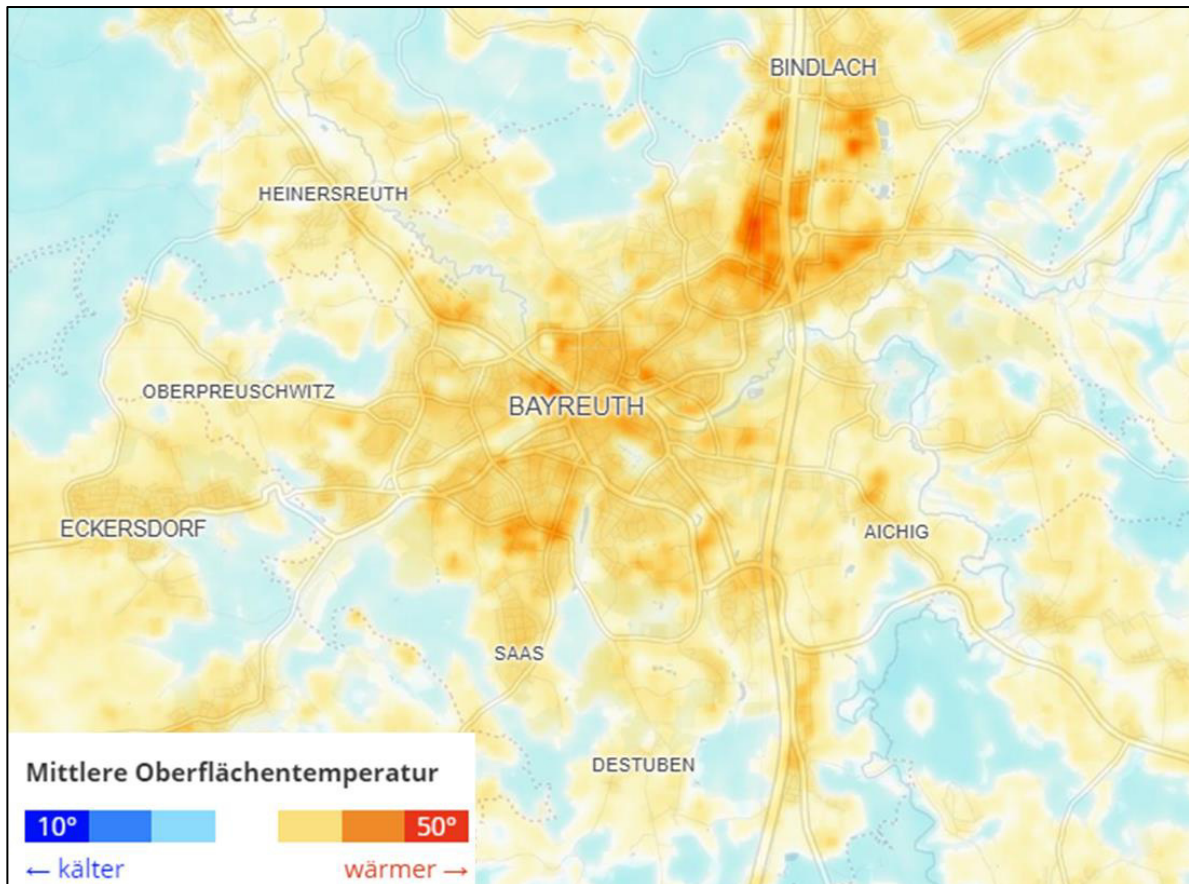


Abbildung 10: Satellitenaufnahme der Oberflächentemperatur im Raum der Stadt Bayreuth. Dargestellt ist die durchschnittliche Oberflächentemperatur aufgezeichnet an Sommertagen zur Mittagszeit (ca. 12 Uhr) bei geringer Wolkenbedeckung

(QUELLE: CIESIELSKI ET AL. 2021 MIT LANDSAT 8-AUFNAHMEN, LEICHT VERÄNDERT DURCH EVF 2022)

Messungen zeigten, dass sich mit dem Sonnenuntergang die Fläche des Ökologisch-Botanischen Gartens im Sommer bereits abkühlte, während die Abkühlung in der Stadt noch nicht begonnen hatte. Auslöser hierfür ist die allgemein hohe Verdichtung in Bayreuth sowie die Tallage des Stadtgebietes (BABEL 2021). Städteplanerisch sollte deswegen ein großer Fokus darauf gelegt werden, nachts eine Durchlüftung der Stadt mit kalter Luft aus dem Umland zu ermöglichen. Bayreuth verfügt im direkten Umfeld über gute Kaltlufttrassen, über welche kalte Umlandluft in die Stadt fließen kann. Diese wurden östlich allerdings teilweise durch Bauten der Autobahn A9 verbaut.

Die erhöhten Temperaturen und veränderten Niederschlagsmuster begünstigen darüber hinaus die Verbreitung gesundheitsschädlicher Tier- und Pflanzenarten. Verschiedene Mückenarten profitieren von den Auswirkungen der Klimaänderung. Problematisch ist, dass dabei eine Verbreitung von Arten, die tropische Infektionskrankheiten übertragen können,

gefördert wird. Diese Arten reagieren zeitnah auf Klimaumschwünge. Darunter zählen etwa die Tigermücke (*Aedes albopictus*), die Asiatische Buschmücke (*Ae. japonicus*) und die Gelbfiebermücke (*Ae. aegypti*), die als Krankheitsvektoren vieler Krankheiten, wie Chikungunya, Dengue- und West-Nil-Fieber gelten. Von dem in der Mainregion beobachteten Rückgang an Frosttagen profitieren Populationen, da in Versuchen nachgewiesen wurde, dass kalte Temperaturen den Reproduktionserfolg der Tigermücke erheblich vermindern (THOMAS ET AL. 2012). Populationen der Tigermücke werden seit 2015 in Bayern gesichtet (NAT. EXPERTENKOMMISSION FÜR STECHMÜCKEN AM FLI 2021). Auch wenn die in Bayern nachgewiesenen Mücken derzeit noch kein tropisches Virus übertragen können, ist das Risiko in der Zukunft vorhanden und auch für das Stadtgebiet Bayreuths nicht zu unterschätzen.

### 3.1.2. Handlungsempfehlungen

#### Kaltluftschneisen

Von großer Bedeutung für eine Kaltlufttrasse in die Stadt ist der Tappert, welcher ab dem Kreuzsteingelände komplett unterirdisch verläuft und unter dem Sternplatz im Untergrund endet. Im Rahmen des Integrierten Städtebaulichen Entwicklungskonzeptes soll dieser über eine größere Strecke an die Oberfläche gelegt werden, um einen kühlenden Luftstrom in die Stadt zu bewirken. Vor dem Hintergrund der innerstädtischen Hitzeballung und des Hitzeinseleffekts ist dieses Vorgehen in jedem Fall durchzuführen.

Daneben besteht eine Kaltluftzufuhr im Süden durch den Studentenwald und den Röhrensee (FOKEN 2015), allerdings kann die Luft nicht bis in die Innenstadt vordringen, sondern wird spätestens ab Moritzhöfen durch den Wittelsbacherring gestoppt.

Weiterhin haben Messungen die Wilhelminenaue als Kältetrasse in die Stadt identifiziert. Letztere wurde im Rahmen der Landesgartenschau bereits erfolgreich renaturiert, allerdings kann Kaltluft aufgrund der Wehrhöhe nicht komplett in Richtung Stadtkern fließen.

Daneben bilden der Mistelbach und der Ökologisch-Botanische Garten kühle Bereiche in der Stadt. Diese Kälteinseln und -trassen sind von essentieller Bedeutung, um eine Abkühlung der Stadt an heißen Tagen, wie sie mit dem Klimawandel in Zukunft häufiger auftreten werden, zu ermöglichen. Im Vergleich zu diesen Grünflächen bildet der Hofgarten, trotz seiner Begrünung, eine vergleichsweise geringere Park-Kälteinsel mit wenig Kühlungseffekt, wahrscheinlich da er disjunkt der Kaltluftschneisen im Innenstadtbereich liegt und seine Größe den Wärmeeffekt des Stadtkernes kaum kompensieren kann (SPIES 2019). In diesem Kontext ist die innerstädtische Nachverdichtung in der Altstadt und im Stadtteil Birken problematisch, da jede neu versiegelte Fläche eine messbare Erwärmung bewirkt.

#### Erweiterung des Stadtgrüns

Jede Bepflanzung im Stadtbereich erzeugt einen Abkühlungseffekt an Hitzetagen, da Pflanzen, so lange sie ausreichend bewässert werden, durch die Verdunstung von Wasser und die Erzeugung von Schatten zu einem feuchteren Mikroklima beitragen. Parks, Grünflächenanlagen, Seen oder Fließgewässer erzeugen dabei die effektivste Abkühlung. Allerdings trägt auch eine ausgedehntere Begrünung im Innenstadtbereich, wie etwa die Bepflanzung von Parkplätzen oder Fußgängerzonen mit hitzetoleranten Laubbäumen zu einer merklichen Hitzeentlastung bei.

### Fassaden- und Dachbegrünung

Auch die Begrünung von Fassaden (Vertikalbegrünung; Abb. 11) und Dächern trägt zu einer merklichen Hitzeentlastung bei.



Abbildung 11: Beispiele für Vertikalbegrünung in Städten

(QUELLE: LINKS: GÜNTHER 2016 VON FBR/GÖLLER; RECHTS: MAGISTRAT LINZ 2020 VON URBANSCAPE GREENWALL/ SEMPERGREENWAL)

Maßnahmen, die in Bayreuth bereits umgesetzt wurden, sind etwa die Dachbegrünung auf dem Sparkassengebäude, die Gebäudebegrünung des Umweltbüros, sowie die geplanten Dachbegrünungen für Neubauprojekte. Standardisiert könnten Gebäudebegrünungen für alle geplanten Neubauten (Fassadengebundene Begrünungssysteme) und Sanierungen geprüft werden. Auch Sanierungen öffentlicher Einrichtungen (u.a. Schulen, Seniorenheime, Kindergärten) dürfen bei der Einplanung von Grünflächen nicht unberücksichtigt bleiben. Um eine ausreichende Statik zu gewährleisten, sollten Architekten, Fachplaner oder Dachdecker zurate gezogen werden. Für Fassadenbegrünung sind Gebäude mit vielen Wandrissen und Fugen sowie Fachwerkhäuser ungeeignet.



Potential bietet derartige Begrünung im stark befahrenen und versiegelten Bereich um das Rotmaincenter, wo sich im Sommer erkennbar Wärme anstaut (vgl. Abb. 10). Nicht außer Acht gelassen werden sollte auch die Innenstadt um den Bereich Maximilianstraße und Kämmereigasse, wo sich im Sommer die nächtliche Hitzeinsel bildet. Auch das Industriegebiet Glocke, das Gewerbegebiet am Bauhof oder St. Georgen (hier gibt es außerdem Wohnbebauung) in Richtung Bindlach sollten in Erwägung gezogen werden, wo es tagsüber ebenfalls zur Hitzeballung kommt (vgl. Abb. 10). Vor allem Gewerbegebiete heizen sich aufgrund ihres hohen Versiegelungsgrades (oft über 80 %), der typischen Baumaterialien von Produktionshallen und der allgemein dichten Bebauung sehr stark auf (VALENTIN 2022). Gezielte Begrünungsmaßnahmen von Dächern (auf Hallendächern oft schwierig aufgrund der gegebenen Statik), Fassaden oder Bepflanzung mit stadtklimatoleranten Bäumen auf Flächen müssen konsequent in Planungen einbezogen werden, da sie zu einer Abschwächung des Hitzeinseleffekts in der Bayreuther Innenstadt führen.

Gezielte Begrünungsmaßnahmen können darüber hinaus auch die durch Nachverdichtung hervorgerufene Verschlechterung des innerstädtischen Mikroklimas kompensieren (ERLWEIN ET AL. 2022).

Eine konsequente Einbindung in Planungen der Stadt ist ebenso wichtig wie die größtmögliche Einflussnahme der Stadt auf Investoren. Für neue Planungen bei städtischen Sanierungen ist die Möglichkeit der Dach- oder Fassadenbegrünung, idealerweise mit Brauchwasserbewässerung, immer mit abzufragen.

### **Bewässerung des Stadtgrüns**

Für die Bewässerung des Stadtgrüns ist eine trinkwasserschonende Regenwasserverwendung zu etablieren. Regenwasser kann dezentral in Zwischenspeichern (Zisternen, Rigolen) gesammelt werden, Bewässerungssäcke können Stadtbäumen in Trockenphasen helfen, und stadtweite Bewässerungskampagnen und Gieß-Initiativen (z.B. Baumpatenschaften) können beworben werden.

### **Entsiegelung von versiegelten Flächen**

Auch die Entsiegelung derzeit versiegelter Flächen wie etwa in Parks oder sonstigen unbefahrenen Arealen sollte konsequent durchdacht werden. Gerade asphaltierte Flächen sind dabei vom erwärmungstechnischen Aspekt her als prioritär einzustufen, da sie sich aufgrund ihrer Farbe und Oberflächenstruktur besonders stark erhitzen. Weitere Möglichkeiten bieten die Entsiegelung von Höfen, Umstrukturierung von Parkplatzflächen etwa mit Rasengittersteinen oder anderweitigem Material, welche dadurch gut befahrbar bleiben, sich aber weniger erhitzen und größere Versickerungsmöglichkeiten bilden. Umgesetzt wurde ähnliches etwa durch Rasenkantensteine am Parkplatz Frankengut, weitere Umgestaltungen sollten geprüft werden.

## Andere Verschattungsmaßnahmen

Wenn eine Entsiegelung aufgrund der hohen Belastung nicht möglich ist, sollte eine Beschattungsmöglichkeit durch Bäume (besonders gut für die Klimaanpassung), Solarcarports (bedeutsam für die Erzeugung erneuerbarer Energien; vgl. Abb. 12), oder sonstige Verschattungen bewertet werden. Auch begrünte Überdachungen von Parkplätzen oder Fahrradunterständen (Abb. 12) bieten Möglichkeiten im Innenstadtbereich. Dies ergibt einen Beschattungseffekt, welcher sich auch positiv auf die Gesundheit der Stadtbevölkerung auswirkt.



Abbildung 12: Beispiele für begrünte Fahrradstellplätze (oben) und Solar-Carports (unten)

(QUELLE: LINKS: HEINZE GMBH 2022; RECHTS: HOLZON GMBH 2022)

Generell sollten alle größeren Verkehrsflächen auf derartige Maßnahmen geprüft werden. An der Freiluft befindliche Parkplatzflächen etwa am Opernhaus oder Annecyplatz bieten hierbei Potentiale zur Mitigation. Parkplatzflächen könnten mit Solarcarports kombiniert werden, welche Strom (Möglichkeit der Kombination mit Ladestation für Elektrofahrzeuge) und Beschattung erzeugen. Im Bereich der Maximiliansstraße könnten neben Dach- und Fassadenberührung von Gebäuden etwa überdachte, begrünte Fahrradstellplätze und Trinkwasserbrunnen Abhilfe schaffen. Solche Pergolen können individuell angefertigt werden. Eventuell könnten sogar solche Vorrichtungen mit Photovoltaik kombiniert werden, eine vertikale Bepflanzung müsste dann regelmäßig geschnitten werden. Eine Beschattung würde den Aufenthalt in der Innenstadt im Sommer, etwa auch zur Zeit der Bayreuther Festspiele, attraktiver gestalten und sich positiv auf ansässigen Handel und Dienstleistungen auswirken.

## Interdisziplinäre Planungen

Frühere Pläne in Zusammenarbeit mit Klinikum und Universität beinhalteten eine Untersuchung zur gesundheitsfördernden Radweg- und Stadtgrünplanung, bei der interdisziplinäre Handlungsempfehlungen erarbeitet werden sollten. Dieser wurde nicht finanziert, allerdings wären ähnliche interdisziplinäre Projekte mit Experten aus dem

Gesundheitssektor zielführend, um besonders vulnerable Bevölkerungsgruppen identifizieren und Maßnahmen empfehlen zu können. Berücksichtigt werden sollten hier die Standorte von etwa Kindergärten, Altenheimen und Schulen, wobei in der Folge, falls diese hitzeexponiert liegen, Minderungsmaßnahmen ergriffen werden müssen.

Außerdem sollten Katastrophenpläne für starke Hitzeereignisse mit Rettungsdiensten ausgearbeitet werden. Besonders sensitive Bevölkerungsgruppen finden sich in den Betreuungseinrichtungen für ältere und besonders junge Menschen. Diese und deren Betreuer sollten für stark ausgeprägte Hitzeereignisse und mögliche Handlungsmaßnahmen sensibilisiert werden.

### **Förderungen für Klimaanpassungsmaßnahmen an sozialen Einrichtungen**

Klimaanpassungsmaßnahmen an derartigen Einrichtungen können von der Z-U-G (Zukunft – Umwelt – Gesellschaft gGmbH) gefördert werden, sofern bisher noch keine stattgefunden haben. Prioritär wäre eine Prüfung für die Umsetzung nahe des Innenstadtbereiches, wo mehrere soziale Einrichtungen liegen (wie unter anderem das Senioren-Forum Jean Paul nahe des Rotmaincenters, oder die Kindergärten St. Vinzenz und Löwenzahn). Gefördert werden Kommunen in der Regel mit bis zu 80% bereits für Beratungsleistungen und Konzeptaufstellungen (**BMU 2020**). Das zweite Förderantragsfenster für das Frühjahr 2022 hat derzeit noch nicht begonnen. Derartige Beratungen können Aufschluss darüber geben, wie in den Einrichtungen speziell effektive Anpassungsmaßnahmen durchgeführt werden können. Ein Austausch mit den Einrichtungen wäre dabei notwendig. Anreize geben jedoch die hohen Förderquoten, eine Imageverbesserung sowie die positiven Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden der Angestellten, Bewohner und Kinder.

### **Ausbau der Radwegeinfrastruktur**

Die von Verbrennungsmotoren erzeugte Abwärme verstärkt die Hitzebelastung im Sommer und die Abgase wirken sich deutlich negativ auf die Gesundheit der Anwohner und Passanten aus. Durch einen konsequenten attraktiven Ausbau von Fahrradwegen kann der hohen Verkehrs- und Hitzebelastung vor allem im Sommer entgegengewirkt werden. Eine attraktive und sichere Gestaltung von Fahrradwegen kann die Anzahl an Fahrradfahrern erhöhen und Hitze-, Lärm- und Schadstoffbelastung senken. Auch eine Vergünstigung der Kosten für die öffentliche Infrastruktur (Busverbindungen) können einen verringenden Effekt auf die Verkehrsbelastung auf stark befahrenen Straßen bieten.

## Bereitstellen von Trinkwasser

Starke Hitzebelastung kann vor allem für sensitive Bevölkerungsgruppen gefährlich sein. Durch frei zugängliche Trinkwasserbrunnen im Stadtgebiet kann zum einen Erfrischung und zum anderen der Dehydratation dieser Bevölkerungsgruppen entgegengewirkt werden.

## Überwachung von Krankheitsvektoren

Bezüglich der Ausbreitung gesundheitsschädlicher invasiver Arten, die Infektionskrankheiten übertragen können, gibt es an der Universität Bayreuth einen Forschungsschwerpunkt auf die potentiellen zukünftigen Ausbreitungsgebiete derartiger Insektenarten. Eine Einbeziehung der Forschungsergebnisse in zukünftige Handlungen bezüglich der Ausweisung von sensiblen Regionen und frühzeitigen Überwachungsmaßnahmen ist daher von großer Bedeutung (vgl. THOMAS ET AL. 2012).

## 3.2. Starkregen und Hochwasser

### 3.2.1. Auswirkungen in Bayreuth

Die im Stadtgebiet Bayreuth häufiger auftretenden und intensiver werdenden Starkregenereignisse implizieren eine größere Gefahr vor Hochwasser und Überflutungen. Hinzu kommt, dass die Bruchschollenzone, in der Bayreuth sich befindet, viele Mergel- und Tonschichten aufweist, auf denen Böden mit geringer Wasseraufnahmefähigkeit vorherrschen, bei denen die reduzierte Aufnahme nach langer Trockenheit noch verstärkt werden kann. Starkregenereignissen im Stadtgebiet kann aufgrund geringer Versickerungsmöglichkeiten nur bedingt begegnet werden. Vom Stadtplanungsamt soll deshalb eine Beurteilung der Versickerungspotentiale im Stadtgebiet in Auftrag gegeben werden.

Auch Starkregenereignisse im Einzugsgebiet außerhalb der Stadt erhöhen durch einen erhöhten Abfluss das städtische Hochwasserrisiko. Hochwasserereignisse bergen nicht nur Gefahren für die Bevölkerung des urbanen Raumes, sondern können auch schwere wirtschaftliche Schäden herbeiführen. Beispielsweise befindet sich auch das UNESCO-Weltkulturerbe Markgräfliches Opernhaus in unmittelbarer Nähe des Roten Mains und auf einer potentiellen Hochwasserrisikofläche ( $HQ_{\text{extrem}}$ , unmittelbar neben der  $HQ_{100}$ -Risikofläche).

Da Winterniederschläge im Maingebiet zunehmen werden, erhöht sich die Abflussmenge und Hochwassergefahr während dieser Jahreszeit (FLUSSGEBIETSGEMEINSCHAFT RHEIN 2021). In Bayreuth ergeben sich die meisten Hochwassergefahren durch eine erhöhte Schneeschmelze im Fichtelgebirge. Ausgehend von der Tatsache, dass die Schneedecke dort in den letzten Jahren immer weiter abgenommen hat, kann sich das fluviale Hochwasserrisiko, welches von Extremjahren mit hoher Schneeschmelze ausgeht, in Grenzen halten, sollte aber nicht außer Acht gelassen werden.

Mit dem Klimawandel wird es vermehrt zu Starkniederschlägen vor allem im Sommer, aber auch im Winter kommen. Anpassungsmaßnahmen an Starkniederschlag und Hochwasser sollten somit städteplanerischen Einfluss finden. Erneut zu erwähnen ist hier die Problematik versiegelter Flächen. Auf versiegeltem Boden kann Regenwasser nicht in den Boden infiltrieren, sondern muss an der Oberfläche abfließen. Vor allem Städte haben aufgrund des geringen Anteils an naturbelassenem Boden die Herausforderung, für genügend Versickerungsmöglichkeiten von Regenwasser zu sorgen. In Bayreuth kommt wahrscheinlich die Erschwernis durch Böden mit geringem Versickerungspotential hinzu, sodass Flächen, auf denen Infiltration gut möglich ist, und die entsiegelt werden könnten, begrenzt sind. Vor allem bei sehr starken Niederschlagsereignissen kann es zu überlasteten Abwassersystemen und einem sehr starken Oberflächenabfluss im urbanen Gebiet kommen. Erneut spielen Grünflächen, wie der Hofgarten, der Röhrenseepark oder die Wilhelminenaue eine essentielle Rolle, um extremen Niederschlagsereignissen begegnen zu können.

Die Vermeidung von Hochwasser bei extremen Starkniederschlägen erfordert jedoch eine integrative Planungsbasis, die über das städtische Abwassersystem hinausgeht. Da sich Bayreuth in einer Tallage befindet, kann es bei Starkniederschlägen zu hohem Oberflächenabfluss von den um die Stadt gelegenen Hügeln ins Bayreuther Stadtgebiet kommen. Vor allem bei langer Trockenheit – wie sie parallel zu extremen Niederschlägen zukünftig wahrscheinlich häufiger auftreten wird – kann der Boden die großen, in kurzer Zeit auftretenden Wassermengen nicht gut aufnehmen. Er verhält sich in diesem Fall wie ein trockener Schwamm, der erst bei einer gewissen Durchfeuchtung höhere Infiltrationsraten besitzt. Bei Starkregen sind die Folge dann ein hoher Abfluss an der Geländeoberfläche und Bodenerosion. Extremniederschlagsereignisse können räumlich eng eingeschränkt verlaufen. Beim Starkregen am 05. Juni 2021 im Raum Bayreuth fielen innerhalb weniger Stunden bis zu 72 mm Niederschlag im nördlich an Bayreuth angrenzenden Bindlach, während es in naheliegenden Arealen, wie im südlichen Teil Bayreuths, etwa 33 mm waren (Abb. 13).

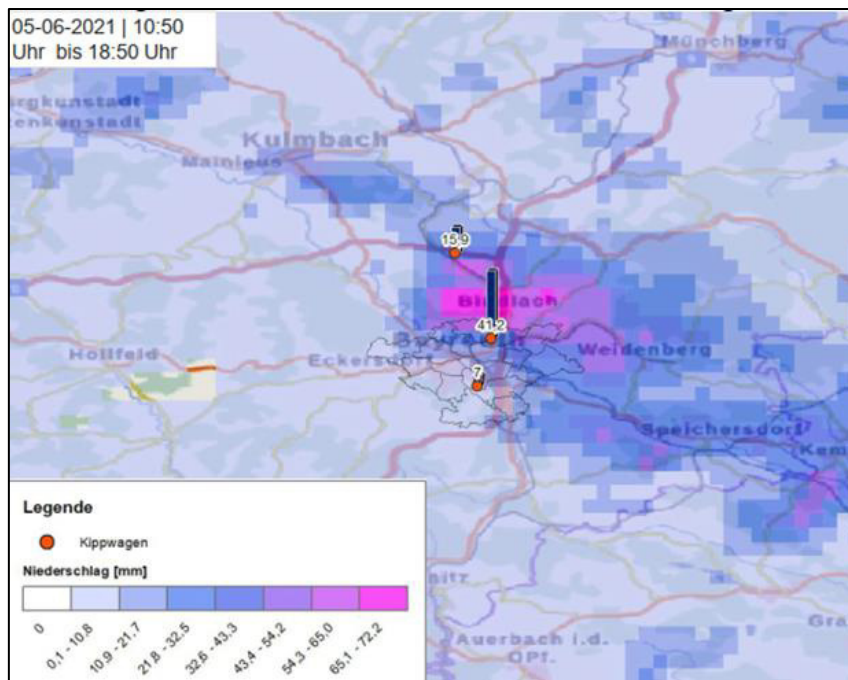


Abbildung 13: Starkniederschlagsereignis am 05. Juni 2021 – räumliche Niederschlagsverteilung

(QUELLE: BABEL 2021)

### 3.2.2. Handlungsempfehlungen

#### Entsiegelung

Die oben bereits angesprochenen Studien zum Bodenversickerungspotenzial sollten durchgeführt werden. Entsprechende Maßnahmen zur Entsiegelung sollten im Anschluss umgesetzt werden.

#### Hochwasserrückhaltung

Das Abflussverhalten im hügeligen Umland beeinflusst dieses im Stadtgebiet direkt. Im Raumordnungsverfahren aus dem Jahr 2014 wurden zwei grundsätzliche Möglichkeiten benannt, um Hochwasserschutz in Bayreuth erreichen zu können:

1. Entweder einen Ausbau im Stadtgebiet mit ausreichendem Abstand zwischen Gebäuden und Wasserspiegel, der nur durch Abriss von Bebauung und Infrastruktur entlang des Roten Maines am Ring zu bewerkstelligen gewesen wäre, was städtebaulich nicht möglich ist,

2. oder ein geringerer Ausbau in der Stadt mit der Errichtung von Hochwasserrückhaltebecken oberhalb des Stadtgebietes (REGIERUNG VON OBERFRANKEN 2014).

Aus wasserwirtschaftlicher Sicht entschied man sich für die zweite Möglichkeit, bei der es wesentliches Element des Hochwasserschutzes ist, das Hochwasser in der Flussaue und vom Stadtbereich fernzuhalten.

Um den Hochwasserschutz vor einem  $HQ_{100}$  (s.u.) zu erreichen, ist es notwendig, ca. 2,6 Mio.  $m^3$  Wasser oberhalb der Stadt Bayreuth zurückzuhalten. Der Begriff  $HQ_{100}$  meint einen Hochwasserabfluss, der statistisch nur alle 100 Jahre auftritt, umgangssprachlich meint ein  $HQ_{100}$  eine mittlere Hochwasserkatastrophe. Eine schwere Hochwasserkatastrophe wird als  $HQ_{\text{extrem}}$  bezeichnet. Grundsätzlich kann jedoch auch davon ausgegangen werden, dass mit voranschreitendem Klimawandel die als 100-jährlich ausgewiesenen Hochwässer nicht mehr alle 100 Jahre eintreten, sondern häufiger. Um die Stadt Bayreuth vor einem  $HQ_{100}$ -Ereignis ausreichend zu schützen, müssten drei Hochwasserrückhaltebecken (HRB) errichtet werden. Abb. 14 zeigt die Planungen des Wasserwirtschaftsamtes Hof.

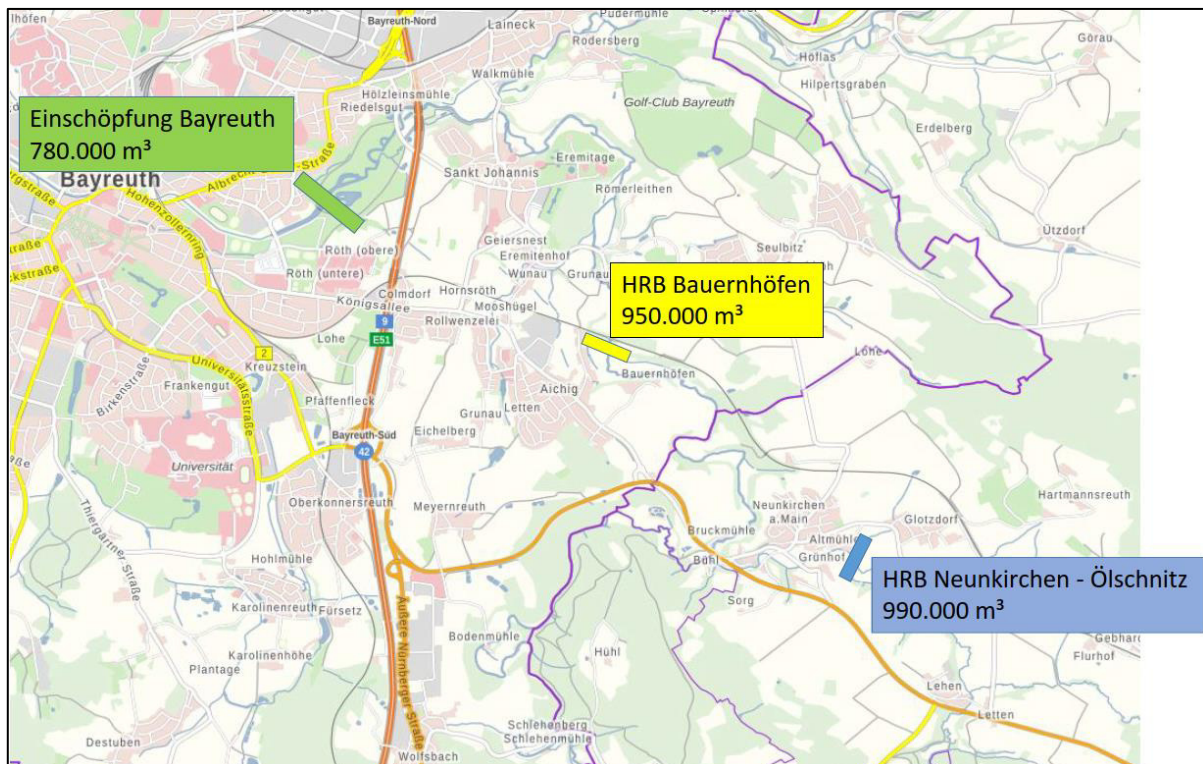


Abbildung 14: Standorte des existierenden und der geplanten Hochwasserrückhaltebecken im Raum Bayreuths

(QUELLE: WASSERWIRTSCHAFTSAMT HOF 2021)

Die Einschöpfung Bayreuth in der Wilhelminenaue wurde im Jahr 2013 im Rahmen der Vorbereitungen der Landesgartenschau 2016 fertiggestellt.

Das HRB Bauernhöfen befindet sich aktuell in der Vorplanung und wird voraussichtlich ab 2024 ins Wasserrechtverfahren gehen.

Nachdem das Wasserrecht dafür abgeschlossen ist, soll die Planung für das HRB Neunkirchen vergeben werden und wird somit nicht in den nächsten Jahren angegangen werden.



Abbildung 15: Hochwasserrückhaltebecken Einschöpfung Bayreuth auf dem Landesgartenschau Gelände

(QUELLE: WASSERWIRTSCHAFTSAMT HOF 2021)

Da die Stadt Bayreuth von Fließgewässern durchzogen wird, existieren auch im unmittelbaren Stadtbereich Flächen, die fluviales Hochwasserrisiko bieten (Abb. 16). Im Stadtgebiet Bayreuth fließen Gewässer 1., 2. und 3. Ordnung. Der Rote Main ist bis zur Einmündung der Mistel Gewässer 2. Ordnung und durchzieht so die Innenstadt, ab der Einmündung der Mistel verläuft er weiter flussabwärts als Gewässer 1. Ordnung.

Daneben durchqueren mehrere Gewässer 3. Ordnung das Stadtgebiet, wie etwa der Aubach oder der Sendelbach. Es ist daher nicht gänzlich verwunderlich, dass im Stadtbereich mehrere Areale Hochwasserrisikoflächen darstellen, diese beziehen sich aber vor allem auf den Roten Main.

Der Freistaat Bayern ist für den Hochwasserschutz vor einem  $HQ_{100}$  an Gewässern 1. und 2. Ordnung verantwortlich, in Bayreuth sind dies Roter Main, Mistel und Warme Steinach. Im



westlichen Stadtteil, im Bereich des Roten Mains als Gewässer 1. Ordnung, bestehen im Abstand einiger 100 m von beiden Seiten des Flusses Gefahrenflächen für ein häufiges Hochwasser ( $HQ_{\text{häufig}}$ ), also einen Abfluss, der statistisch gesehen etwa alle 10 Jahre auftritt. Im östlichen Stadtgebiet befinden sich in Umgebung des Roten Mains Gefahrenflächen für ein  $HQ_{100}$  (vgl. Abb. 16). Auch wenn statistisch gesehen ein derartiges Hochwasser nur etwa alle 100 Jahre auftritt, sollte die Notwendigkeit nicht unterschätzt werden, im Zuge der mit der Klimaänderung vermehrt auftretenden Starkniederschläge in und um Bayreuth für Anpassungsmaßnahmen an hohe Abflüsse zu sorgen. Von großer Bedeutung spielt dabei die Identifikation von Flächen mit hohen Infiltrationsraten. Gefahrenflächen für ein  $HQ_{\text{extrem}}$  sind im Zentrum nahe der B22 im Umkreis des Roten Mains, sowie etwas außerhalb des Stadtkerns im Umfeld der Mistel und der Steinach ausgewiesen. Ein derartiges Hochwasser übersteigt die Ausmaße eines  $HQ_{100}$  und ist grundsätzlich seltener zu erwarten. Dennoch steigt die Eintrittswahrscheinlichkeit durch den bereits stattfindenden Klimawandel deutlich an.

Die Hochwasserrisiken wurden erst Ende 2021 mit der Fortschreibung des Hochwasserrisikomanagement-Plans (alle 6 Jahre) festgelegt. Laut dieses Planes entstehen Mainhochwasser überwiegend als Folge winterlicher, langdauernder Niederschläge, verbunden mit Schneeschmelzen. Hauptentstehungszeitraum ist Dezember bis April. Es wird jedoch deutlich darauf hingewiesen, dass eine Hochwasserentstehung für einzelne Teilgebiete und Gewässer differenziert betrachtet werden muss, da lokale Starkniederschläge infolge der sich verändernden Wetterverhältnisse häufiger auftreten und zu großen Hochwasserabflüssen in Nebengewässern des Mains führen können (FLUSSGEBIETSGEMEINSCHAFT RHEIN 2021). Das durch Starkregen hervorgerufene Auftreten von Sturzfluten spielt somit eine wichtige Rolle im bundesländerübergreifenden Managementplan. Der Fokus der Hochwasserprävention sollte also nicht ausschließlich auf die großen Fließgewässer in Bayreuth, wie den Roten Main, gelegt werden. Vielmehr müssen auch andere, den Boden- und Wasserhaushalt betreffende Maßnahmen berücksichtigt werden (etwa durch Entsiegelung oder Erhaltung naturbelassenen Bodens).

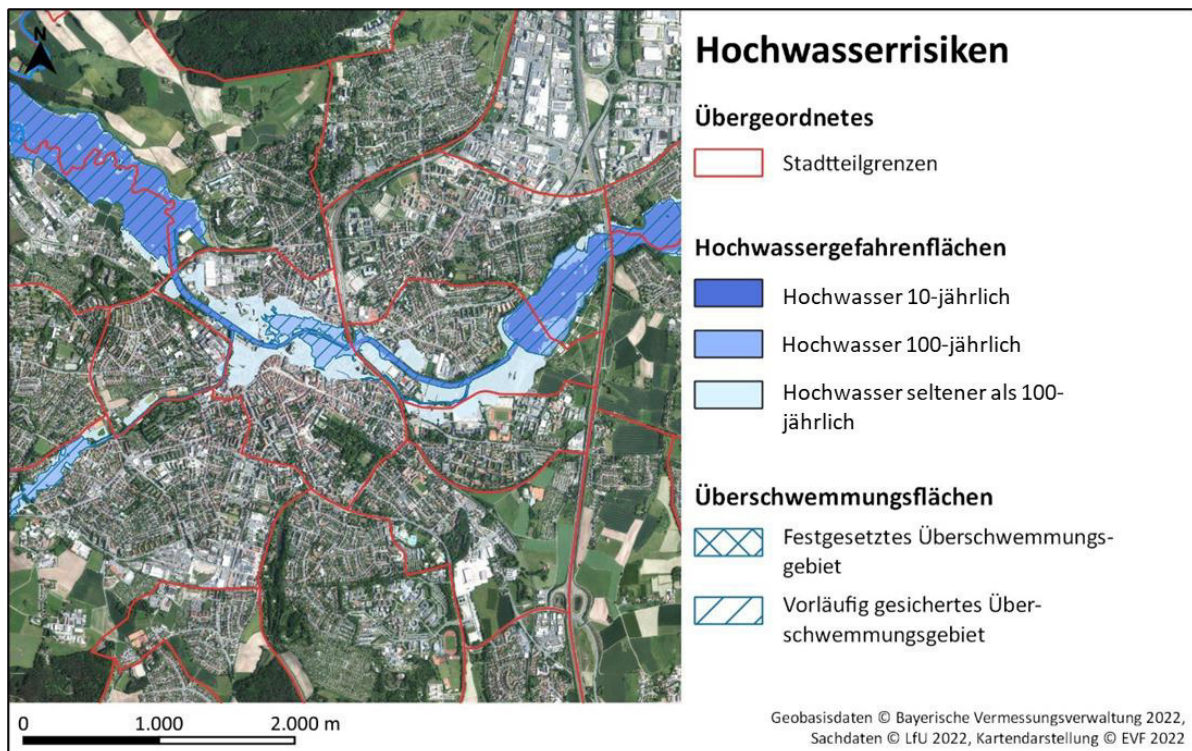


Abbildung 16: Bekannte Hochwasserrisikoflächen in Bayreuth

(QUELLE: BASISDATEN: LfU 2021c, BEARBEITET DURCH EVF 2022)

Auch das Risiko, das von kleineren Gewässern 3. Ordnung ausgeht, darf nicht unterschätzt werden. Bayreuth durchfließen mehrere dieser kleineren Gewässer. Diese sind, neben den bereits erwähnten Fließgewässern Aubach und Sendelbach, folgende: Mühlbach, Preuschwitzerin, Teufelsgraben, Thalmühlbach, Tappert, Mühlwässerlein, Büblersbach, Gereutbach. Da der Freistaat Bayern nur für den Hochwasserschutz größerer Flüsse verantwortlich ist, liegt das Hochwassermanagement für Gewässer 3. Ordnung in den Händen der Kommune. Die Stadt besitzt zwei kleinere HRB in der Dr.-Konrad-Pöbner-Str. für Tappert und Sendelbach und am Maisweg für den Thiergartenweihergraben. Die Freilegung des Tappert an die Oberfläche bietet neben einer Kaltluftzufuhr auch Hochwasserschutz für die Stadt Bayreuth. Mit der Quartiersneugestaltung im Kreuzstein soll dieses Vorhaben durchgeführt werden und ist auch im Hinblick auf Hochwasserprävention außerordentlich erforderlich. Mit der Richtlinie für Zuwendungen zu wasserwirtschaftlichen Vorhaben (**RZWAS 2021**) wurden explizite Förderungen für Gemeinden für derartige wasserbauliche Maßnahmen festgelegt. Gefördert werden neben Ausbauprojekten zur Erstellung des Hochwasserschutzes auch bereits die Erstellung von Hochwasserschutz- und Rückhaltekonzepten oder Vorhaben zur Verbesserung des Boden- und Landschaftswasserhaushalts. Gefördert werden können maximal 75% der aufgewendeten Ausgaben.

## Konzept der Flut-Präventions-Photovoltaik-Anlagen

Eine integrative Möglichkeit, der Überflutungsgefahr bei Starkregen entgegenwirken zu können, sind neuere Konzepte der Flutprävention, die die regenerative Energieerzeugung durch Solarkraft mit Hochwasserschutzanlagen verbinden. Diese soll hier nur als Beispiel kurz vorgestellt werden, da es veranschaulicht, wie verschiedene Bereiche der Klimawandelanpassung miteinander kombiniert werden können.

Bei derartigen Projekten werden auf Hängen, auf welchen während Regenereignissen viel Oberflächenabfluss erzeugt wird, quer zum Gefälle schmale Reihen von Solaranlagen errichtet, unter welche zeitgleich eine Flutschutzmauer und ein Auffangbecken installiert ist. Die Reihen werden dabei in einem Abstand errichtet, welcher eine landwirtschaftliche Bewirtschaftung zwischen den Solaranlagen noch weitestgehend ungestört ermöglicht (Abb. 17). Für Städte, die lediglich von kleinen Flüssen durchflossen werden und von Hügeln umgeben sind, kann diese Maßnahme eine gute Anpassungsstrategie darstellen.

Bei Bayreuth liegen mehrere Hangflächen im direkten Umfeld, auf welchen derartige Errichtungen durchaus Potential bieten, starken Oberflächenabfluss zu verhindern. Auf den landwirtschaftlichen Hangflächen können durch die Abfangdämme keine großen Abflusswellen mehr entstehen, gleichzeitig wird die Bodenerosion vermindert. Die Energie, die durch die Photovoltaikanlagen erzeugt wird, könnte beispielsweise direkt von Landwirten genutzt oder in das örtliche Stromnetz eingespeist werden. Weiterhin erzeugen die Solarplatten stellenweise einen Beschattungseffekt, fördern somit Abkühlung bei hohen Temperaturen und bieten eine Schutzmöglichkeit für verschiedene Tier- und Pflanzenarten. Hierfür muss die Anschlussmöglichkeit an das Mittelspannungsnetz im Vorfeld geprüft werden. Da relevante Hanglagen zum Teil außerhalb des Stadtgebietes liegen, ist eine Zusammenarbeit mit den jeweiligen Nachbarkommunen wichtig. Auch hier ist eine Bodenbeurteilung im Vorfeld relevant.

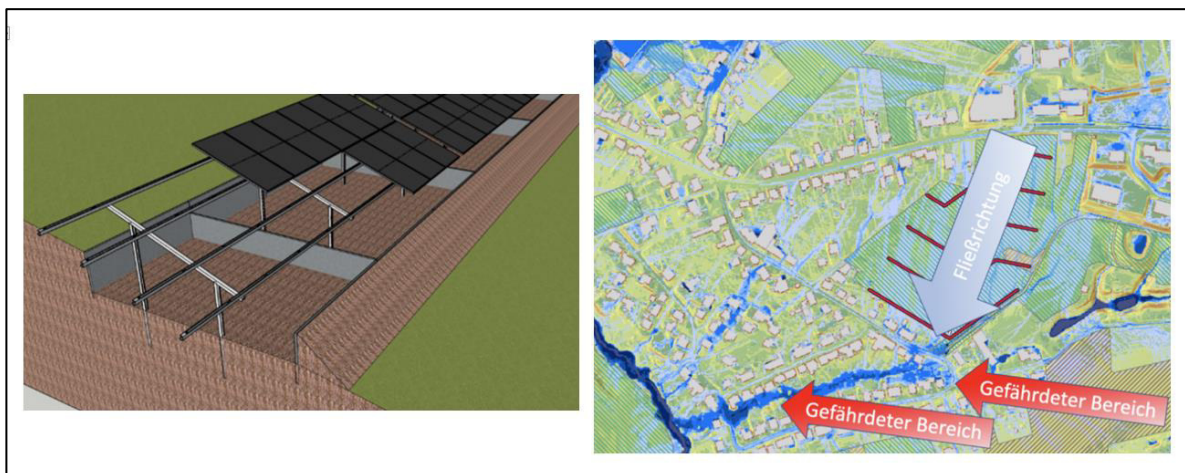


Abbildung 17: Konzept der Flutpräventions-Photovoltaik

(QUELLE: IRRIGATIONNETS 2022)

### 3.3. Starkwind und Sturm

#### 3.3.1. Auswirkungen in Bayreuth

Mit der Zunahme von Extremereignissen kann es im Zuge der steigenden Temperaturen auch häufiger zu auftretenden Starkwinden und Stürmen kommen. Modelle zeigen dabei allerdings bisher keine übereinstimmenden Trends. Im Zuge der Verlangsamung des Jetstreams wird Mitteleuropa vor allem häufiger von langanhaltenden Regenstürmen betroffen sein (ABDULLAH ET AL. 2021). Auf der anderen Seite zeigen Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes eine Zunahme der gesichteten Tornados. So lag die Zahl der bestätigten Tornados in Deutschland zwischen 1986 und 1995 bei 9 pro Jahr und stieg im Zeitraum 1996 bis 2005 auf rund 40 pro Jahr an. Im jüngsten Zeitraum wurden von 2006 bis 2020 im Mittel 50 Tornados pro Jahr in Deutschland bestätigt (KASPAR ET AL. 2021).

Im städtischen Bereich kann es in Straßen mit beidseitiger Bebauung und ohne Stadtgrün auch zu einem Effekt kommen, bei welchem der Wind kanalisiert wird und dann höhere Windgeschwindigkeiten aufweist, als im sonstigen Umfeld (eine Art Tunnel-Effekt). Gefahren können durch Starkwindereignisse im Straßenverkehr, sowie durch umstürzende Bäume oder herabfallende Äste oder umherwehende Materialien entstehen. Bäume können durch eine erhöhte Oberflächenrauigkeit allerdings auch die Intensität von Windböen vermindern. Besondere Sensitivität gegenüber Sturmereignissen weisen Industrie- und Gewerbegebiete auf, da sich auf ihnen häufig Leichtbaukonstruktionen befinden und auf Außenflächen gelagerte Materialien und Produkte von Starkwinden umhergeweht werden können. Gewerbe- und Industrieflächen weisen damit ein vergleichsweise hohes Schadenspotential auf.

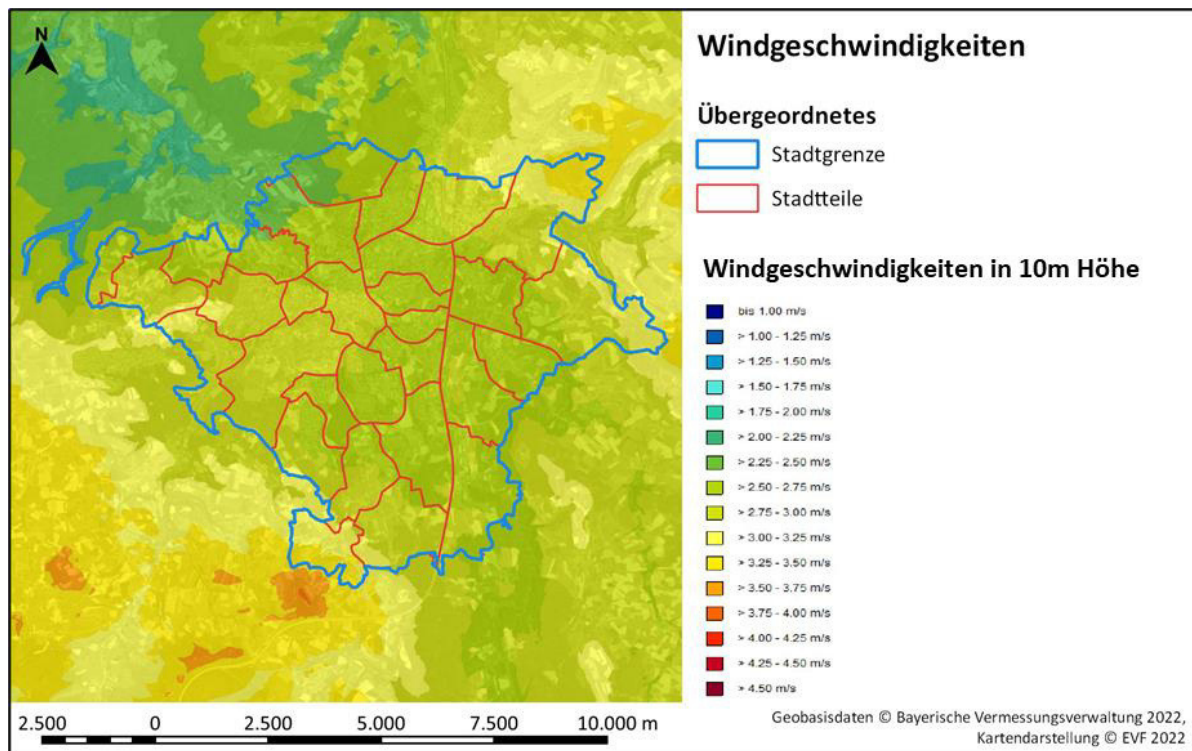


Abbildung 18: Jahresmittel der Windgeschwindigkeit 10m über Grund in Bayreuth

(QUELLE: DATEN ZU MITTLERER WINDGESCHWINDIGKEIT: BAYERISCHER WINDATLAS 2021, ERSTELLT DURCH EVF 2022)

Als Indiz für die Häufigkeitsverteilung höherer Windgeschwindigkeiten kann vereinfacht die mittlere Windgeschwindigkeit herangezogen werden. Denn mit steigender mittlerer Windgeschwindigkeit erhöht sich im Durchschnitt auch das Risiko für Extremereignisse. In 10 m Höhe verzeichnet die Stadt Bayreuth jährliche durchschnittliche Windgeschwindigkeiten im unteren Bereich von etwa 2-3 m/s (vgl. Abb. 18). Vor allem im zentralen Bereich des Stadtraumes liegen die Werte innerhalb einer geringen Spannweite von etwa 2,25-2,75 m/s. Ein Zusammenhang besteht dabei mit der Tallage der Stadt.

Das Umland, vor allem in höheren Lagen, zeigt dagegen deutlich höhere mittlere Jahreswindgeschwindigkeiten. Diese exponiertere Höhenlage wird in den Stadtteilen am Rand des Stadtgebietes veranschaulicht: Die Stadtteile Laineck, Seulbitz und Industriegebiet im Nordosten, oder der Stadtteil Rödendorf im Südwesten, weisen windigere Bedingungen auf: Hier können die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe bis zu 3,5 m/s betragen.

### 3.3.2. Handlungsempfehlungen

#### Sturmsicherung von Gewerbe- und Industriegebieten

Vor allem in Industrie- und Gewerbegebieten sollte die Sturmsensitivität der Bauwerke, Lagerflächen und Infrastruktur überprüft werden. Bei extremen Sturmböen können die meist großen Dächer abgedeckt oder auf Lagerflächen gelagerte windanfällige Produkte und Verpackungsmaterialien umhergeweht und für umliegende Gebäude und Güter zur Gefahr werden.

Sturmschäden stellen in erster Linie einen wirtschaftlichen Schaden der Unternehmen dar. Durch die Kommunikation der vorhandenen und zunehmenden Gefahren kann erste Informationsarbeit geleistet werden. Anreize zur Umsetzung von Adaptionsmaßnahmen für Unternehmen bilden darüber hinaus etwa finanzielle Anreize seitens der Kommune (Beispiele existieren für Baumpflanzungen über Mittel der Baumschutzsatzung), Aufzeigen von Anpassungsmöglichkeiten durch Umgestaltungsmaßnahmen oder ein Imagegewinn des Unternehmens (z.B. Initiierung von gemeinsamen Presseterminen, die die Umgestaltung kommunizieren).

Es ist empfehlenswert, langfristig ortsansässige Unternehmen mit persönlichem Bezug zur Stadt, Grundstückseigentümer/innen des Firmenareals, Unternehmer/innen mit Wohnsitz nahe des Gewerbegebiets oder Unternehmen, die in der Vergangenheit bereits Interesse für Klimaschutz zeigten, zuerst für ein Gespräch zu erwägen. Zukünftige Steuerungsmodelle bilden die Berücksichtigung von Maßnahmen in der Bauleitplanung und Ansiedlung von nachhaltig strukturierten Unternehmen.

Auch wenn die Stadt nicht sehr windexponiert ist, warnte der Deutsche Wetterdienst erst Ende Oktober sowie Anfang Dezember 2021 vor starken Sturm- und Windböen in Stadt- und Landkreis Bayreuth. Orkanartige Böen führten in Oberfranken im nahen Umkreis Bayreuths Ende Oktober zu Sachschäden (BAYREUTHER TAGEBLATT REDAKTION 2021; KIND 2021). Insgesamt ist der dicht besiedelte Bereich Bayreuths aufgrund der mittleren Windgeschwindigkeiten von Starkwindereignissen allerdings nicht in besonderem Maße betroffen. Dennoch sollten Dächer bestehender und zukünftiger Gebäude auf Kuppenlagen, sowie vor allem die Industrie- und Gewerbegebiete Bayreuths (v.a. Industriegebiet-Nord und St. Georgen) hinsichtlich der Anfälligkeit für Sturmböen geprüft werden. In Genehmigungsverfahren für Neubauten oder bei Umbauten sollte ein verstärkter Blick auf die Anfälligkeit für Sturmböen geworfen werden.

#### Sturmsicherung im City-Bereich / Straßencafés

Nicht nur in Gewerbe- und Industriegebieten besteht die Gefahr von umherwehenden Teilen bei Starkwinden, sondern auch im City-Bereich. Gerade im Sommer werden im City-Bereich an Cafés und Restaurants Sonnenschirme, Bestuhlung und Tische aufgestellt, die sich bei

Starkwindereignissen zu gefährlichen Geschossen verwandeln können. Durch entsprechende Auflagen zur Sturmsicherung sollte dieser Gefahr entgegnet werden.

### **Stadtgrün**

Stadtgrün mindert in den Straßen nicht nur die solare Strahlungsintensität und kann die Quartiere abkühlen, sondern verringert auch die Windgeschwindigkeiten in den Straßen, verhindert starke Windböen und sorgt auch in diesem Zusammenhang für Entspannung.

Da durch vermehrtes Stadtgrün in den Straßen aber auch die Gefahr des Windbruchs steigt, sollte das Stadtgrün stets gut gepflegt und beobachtet werden. Nur gesunde Bäume widerstehen starken Winden. Es ist deshalb auch im Zusammenhang mit den zunehmend höheren Temperaturen auf die Pflanzung von resilienten, dem Klimawandel angepassten Bäumen zu achten. Außerdem sind die Bäume in Dürreperioden im Sommer ausreichend zu bewässern, damit keine schadhafte Stellen entstehen, die bei Wind zum Bruch führen können. Ganz allgemein sollten schadhafte Stellen regelmäßig gesucht und beseitigt werden.

## 4. Fazit

Bereits heute ist die Klimaerwärmung durch steigende Durchschnittstemperaturen in der Mainregion und in Bayreuth messbar. Im Zuge des Klimawandels werden klimatische Extremereignisse immer häufiger auftreten. Teilweise ist dieser Wandel bereits heute erkennbar. In den letzten Jahren machte sich dies bereits durch starke Niederschlagsereignisse oder die Dürrejahre 2018 und 2019 bemerkbar. Auch in Bayreuth und Umgebung sind die Auswirkungen dieser klimatischen Umschwünge spürbar. Kürzliche Ereignisse wie das Hochwasser in Bindlach und die Auswirkungen der trockenen Jahre 2018 bis 2020 machen deutlich, dass Anpassungsstrategien an die Klimaänderung sehr wichtig sind und sollte keine deutliche Warnung sein. Wie die Situation 2018 zeigte, sind geringe Niederschläge keine zwingende Voraussetzung für das Auftreten eines Dürreereignisses, sondern es sind bereits im Mittel steigende Temperaturen ausreichend. Dürre entsteht primär durch ein Verdunstungsdefizit und nicht durch geringere Niederschläge. Dies ist in der Stadt Bayreuth überdurchschnittlich der Fall, da die Erwärmung in der Stadt mit einem Trend von 3,8°C in 100 Jahren deutlich über dem globalen Durchschnitt von 1,5°C in 100 Jahren liegt.

Im Zuge der ausgedehnten Wärmeperioden sollten Anpassungsmaßnahmen an entstehende Hitzeinseln in der Innenstadt getroffen und sensitive Bevölkerungsgruppen geschützt werden. Das Projekt MiSKOR der Universität Bayreuth im Bayerischen Verbundprojekt hat bestätigt, dass in Bayreuth Wärmeinseln genauso ausgeprägt sind, wie in Großstädten. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Erhaltung und die Förderung der Kaltlufttrasse über den Tappert mit Kaltluft vom Sophienberg, welcher durch die geplante erweiterte Oberflächenfreilegung einen Abkühlungseffekt für die Innenstadt erzeugen sollte. Wichtig ist auch die Erhaltung und keine weitere Verbauung der Kaltluftzufuhren über Studentenwald und Röhrensee oder Rotmainau und Mistelbach, sowie von Park-Kälteinseln wie dem Ökologisch-Botanischen Garten. Städtische Nachverdichtung sollte hier nie die Kaltluftzufuhr beeinträchtigen. Eine enge Einbindung der Erkenntnisse aus den Auswertungen der Netzwerkdaten in die Stadtplanung und Gestaltung der Nachverdichtung sollte beibehalten werden.

Außerdem sollten Katastrophenpläne für Hitzeereignisse ausgearbeitet und/oder angepasst werden. Warn- und Informationsstrukturen für Extremereignisse sollten aus- und aufgebaut werden. Sensitive Bevölkerungsgruppen sollten durch Kampagnen weiter für Maßnahmen zur Abhilfe sensibilisiert werden.

Im bebauten Stadtbereich sollte der Fokus auf Gebäudebegrünung gelegt werden. Der Hitzeballung, die sich auch tagsüber im Bereich um das Rotmaincenter bildet, kann durch Fassaden- und Dachbegrünung begegnet werden. Bewässerungswasser könnte aus Rigolen gesammelt werden, welche unter (teil)entsiegelten Flächen angebracht werden können (z.B. im Bereich um den Anceyplatz oder den Parkplatz am Opernhaus).



Der nachmittäglichen Hitzeballung im Bereich um Maximilianstraße und Kämmereigasse kann neben Gebäudebegrünung beispielsweise durch überdachte, begrünte Fahrradunterstände sowie durch Pflanzenkübel, stadtklimatolerante Laubbaumarten oder Trinkwasserbrunnen begegnet werden.

Bezüglich der Anpassung an nächtliche Hitzeinseln und die Hitzeballung tagsüber muss weitere Flächenversiegelung so weit wie möglich eingeschränkt werden. Fassaden- und Dachbegrünungen an nicht denkmalgeschützten Gebäuden können ein gangbarer Kompromiss sein. Auch begrünte Parkhäuser, Bushaltestellen (eventuell ZOH), oder eine Entsiegelung von Parkplätzen in Kombination mit Solarcarports bewirken einen Kühlungseffekt. Mit den Stadtwerken oder den Betreibern des Rotmaincenters kann dabei zusammengearbeitet werden (bietet u.a. Potential von Imageverbesserung für Unternehmen). Dies bietet im Innenstadtbereich vor allem im Sommer auch attraktivere Aufenthaltsmöglichkeiten für Touristen, mit positiven Auswirkungen für den Einzelhandel.

Eine städtische Förderung entsprechender Maßnahmen könnte die Umsetzung begünstigen. Wegen der zunehmenden Dürren in den entscheidenden Vegetationsperioden muss aber auch ein Konzept (zum Beispiel als gemischte Nutzung aus HRBs, Zisternen, Rigolen oder Bewässerungsinitiativen) für die Bewässerung des Stadtgrüns aufgestellt werden. Ebenso sollten vor allem dem Klimawandel angepasste Bäume gepflanzt werden.

Dem Hochwasser-Risiko durch Starkregenereignisse in den Einzugsgebieten der Gewässer sollte durch Entsiegelung von derzeit versiegelten Flächen entgegengewirkt werden. Durch Schaffung von zusätzlichen Kapazitäten in der Kanalisation zum Abfluss und Rückhaltung kann das Ausmaß möglicher Schäden bei der zu erwartenden Häufung von Starkregenereignissen zusätzlich eingeschränkt werden. Untersuchungen dazu, welche Flächen sich hinsichtlich einer hohen Bodeninfiltrationsrate besonders zur Entsiegelung eignen, sind derzeit in Planung. Diese Analysen sollten dringlich durchgeführt werden. Ausgehend von einer Eignung des Bodens bieten besonders Flächen im verdichteten Innenstadtbereich nahe der Fließgewässer Sendelbach und Roter Main Potentiale für eine Mitigation des Hochwasserrisikos durch (Teil)Entsiegelung mit Rigolen. Diese Flächen können mit denen für Maßnahmen gegen Hitzeballung kombiniert werden, auch im Hinblick auf Wasserspeicherung für die Grünbewässerung.

Darüber hinaus sind Überschwemmungsgebiete bei starkem Hochwasser im Stadtkern bekannt. Dementsprechend müssen Katastrophenpläne für extreme Hochwässer ausgearbeitet und/oder angepasst werden. Die vorhandenen Retentionsflächen sollten natürlich freigehalten werden.

Eine Kopplung der Hochwasserprävention an Hängen und der Erzeugung erneuerbaren Stromes (Flutpräventions-Photovoltaik) bieten etwa Projekte auf landwirtschaftlichen

Hangflächen in der nahen Stadtumgebung. Eine landwirtschaftliche Nutzung bleibt dabei größtenteils möglich.

Aufgrund des hohen Oberflächenabflusses und der räumlichen Hitzeballung könnte eine Zusammenarbeit mit Unternehmen in Gewerbegebieten in Bayreuth (St. Georgen, am Bauhof, Industriegebiet Glocke) angestrebt werden.

Von Starkwindereignissen ist die Stadt Bayreuth vergleichsweise nicht in sehr hohem Maße betroffen. Allerdings können im Zuge des Klimawandels auch Stürme zunehmen, weshalb diese Thematik nicht gänzlich außer Acht gelassen werden sollte. Vor allem Industrie- und Gewerbegebiete in Bayreuth, sowie exponierte Lagen z.B. am Roten Hügel oder Altstadt sollten hinsichtlich ihrer Sturmsensitivität überprüft werden. Durch die Schaffung von Stadtgrün kann hohen Windgeschwindigkeiten im Straßenraum vorgebeugt werden. Gleichzeitig kühlt das Stadtgrün die Umgebung ab.

Die hier vorgestellte Untersuchung soll den grundsätzlichen Handlungsbedarf darstellen und untermauern. Im Rahmen der Arbeiten und Projekte der Universität Bayreuth wird das Thema bereits seit Jahren beobachtet und bearbeitet (vgl. MiSKOR-Projekt). Das Messsystem sollte erweitert werden. Die hier erhobenen Daten sind extrem wertvoll und bieten die Möglichkeit, angepasste und wirksame Maßnahmen zu entwickeln. Aufbauend auf dem Klimaschutzkonzept und dessen Umsetzungsbeschluss sollte die Kooperation mit der Universität Bayreuth weiter vertieft und konkrete Handlungsansätze ausgearbeitet werden.

## Verwendete Abkürzungen

### Abkürzungen allgemein:

HRB	Hochwasserrückhaltebecken
THG	Treibhausgas

### Abkürzungen für Namen:

BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
EVF	EVF – Energievision Franken GmbH
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LfU	Landesamt für Umwelt
MiSKOR	Minderung Städtischer Klima- und Ozon Risiken
StMUV	Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
UBA	Umweltbundesamt
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
WEF	World Economic Forum

### Physikalische und mathematische Einheiten:

CH <sub>4</sub>	Methan
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
°C	Grad Celsius
K	Kelvin
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
m	Meter
m/s	Meter pro Sekunde
m ü. NN	Meter über Normal Null
Mio.	Millionen
N <sub>2</sub> O	Distickstoffmonoxid; Lachgas
%	Prozent

## Literatur- und Quellenverzeichnis

**ABEGG, B.; AGRAWALA, D.; CRICK, F. & DE MONTFALCON, A. (2007):** Climate change impacts and adaptation in winter tourism. In: Agrawala, S. (Hrsg.): Climate Change in the European Alps. Adapting Winter Tourism and Natural Hazards Management. Paris, 25-60.

**ABDULLAH, K.; KENDON, E.J.; CHAN, S.C. & FOWLER, H.J. (2021):** Quasi-stationary intense rainstorm spread across Europe under Climate Change. In: Geophysical Research Letters, 48(13), 11.

**AKBARI, H.; CARTALIS, C.; KOLOKOTSA, D.; MUSCIO, A.; PISELLO, A.L.; ROSSI, F.; SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; WONG, N.H. & ZINZI, M. (2016):** Local climate change and urban heat island mitigation techniques – the state of the art. In: Journal of Civil Engineering and Management, 22(1), 1-16.

**BABEL, W. (2021):** Hitze, Dürre & Starkregen – Messbare Auswirkungen des Klimawandels in Oberfranken. Präsentation. Bindlach, 14.07.2021, Mikrometeorologie, Universität Bayreuth.

**BAYREUTHER TAGEBLATT REDAKTION (2021):** Sturmwarnung in Bayreuth: Bomben-Zyklon trifft Deutschland. 2.12.2021, 08:22 Uhr, [online] verfügbar unter: [Sturmwarnung in Bayreuth: Bomben-Zyklon trifft Deutschland - Bayreuther Tagblatt \(bayreuther-tagblatt.de\)](https://www.bayreuther-tagblatt.de/sturmwarnung-in-bayreuth-bomben-zyklon-trifft-deutschland) (zuletzt aufgerufen am 19.01.2022)

**BELOIU, M.; STAHLMANN, R. & BEIERKUHNEIN, C. (2020):** High Recovery of Saplings after Severe Drought in Temperate Deciduous Forests. In: Forests, 11:546, 17.

**BEIERKUHNEIN, C. (2021):** Nature-based solutions must be realized – not just proclaimed – in face of climatic extremes. In: Erdkunde, 75(3), 20.

**BLISS, A.; HOCK, R. & RADIĆ, V. (2014):** Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change. In: Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 119, 717-730.

**BMEL (2018):** Ernte 2018. Mengen und Preise. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin. 28.

**BMEL (2019):** Ernte 2019. Mengen und Preise. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin. 29.

**BMU (2020):** Förderrichtlinie Klimaanpassung in sozialen Einrichtungen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Stand: 27. Oktober 2020. Berlin. 20.

**BROOKS (2013):** Severe thunderstorms and climate change. In: Atmospheric Research, 123, 129-138.

**BT (2021A):** Unwetter im Landkreis Bayreuth: Gemeinde nach Starkregen an vielen Stellen überschwemmt. Bayreuther Tagblatt (BT) [Hrsg.]. Online verfügbar: <https://www.bayreuther-tagblatt.de/nachrichten-meldungen-news/nachrichten-aus-dem-landkreis/unwetter-im-landkreis-bayreuth-gemeinde-nach-starkregen-an-vielen-stellen-ueberschwemmt/> (zuletzt abgerufen am 24.01.2022).

**BT (2021B):** Grundwasser: Besorgniserregende Lage – Niedrigstwert erreicht. Bayreuther Tagblatt (BT) [Hrsg.]. Online verfügbar: <https://www.bayreuther-tagblatt.de/nachrichten-meldungen-news/grundwasser-besorgniserregende-lage-niedrigstwert-erreicht/> (zuletzt abgerufen am 24.01.2022).

**BURAS, A.; RAMMIG, A. & ZANG, C.S. (2013):** Quantifying impacts of the 2018 drought on European ecosystems in comparison to 2003. In: Biogeosciences, 17, 1655-1672.

**CIESIELSKI, R.; KREIL, M.; LEHNER, M. & SCHNUCK, O. (2021):** Klimawandel: Urbane Hitzeinseln. Bayerischer Rundfunk, BR Data, BR Recherche, BR AI + Automation Lab und Unkraut, 20.09.2021, Interaktive Karte, [online] verfügbar unter: [Klimawandel: In der Hitze der Stadt \(br.de\)](#) (zuletzt aufgerufen am 18.01.2022).

**DOCHERTY, B. & GIANINI, T. (2009):** Confronting a rising tide: a proposal for a convention on climate change refugees. In: Harvard Environmental Law Review, 33, 349-403.

**DWD (2004):** Windkarten zur mittleren Windgeschwindigkeit, Interaktive Karte, Bayern-Nord, 80m über Grund, Deutscher Wetterdienst, [online] verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/windkarten/deutschland-und-bundeslaender.html> (zuletzt aufgerufen am 19.01.2022).

**ERLWEIN, S.; SKIBA, A.; ROSENBERGER, L.; PAULEIT, S. & ZÖLCH, T. (2022):** Klimaresiliente Quartiersentwicklung durch grüne Infrastruktur. In: DStGB & Difu (2022): Hitze, Trockenheit und Starkregen. Klimaresilienz in der Stadt der Zukunft. Berlin. 12-14.

**IMBERY, F.; KASPAR, F.; FRIEDRICH, K. & PLÜCKHAHN, B. (2021):** Klimatologischer Rückblick auf 2020: Eines der wärmsten Jahre in Deutschland und Ende des bisher wärmsten Jahrzehnts. Bericht des Deutschen Wetterdienstes, Deutscher Wetterdienst, 7.01.2021, 14.

**FAO; IFAD; UNICED; WFP & WHO (2020):** The State of Food and Nutrition in the World 2020. Transforming food systems for affordable healthy diets. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 287.

**FLUSSGEBIETSGEMEINSCHAFT RHEIN (2021):** Hochwasserrisikomanagementplan der Flussgebietsgemeinschaft Rhein für den Zeitraum 2021 bis 2027. HWRM-Plan für den deutschen Teil der Flussgebietsgemeinschaft Rhein. Worms. 265.

**FOKEN, T. (2015):** Das Klima von Bayreuth. Status quo und Aufgaben für die Stadtplanung. In: Angewandte Geographie, 31, 150-152.

**FOKEN, T. & LÜERS, J. (2015):** Regionale Ausprägung des Klimawandels in Oberfranken. In: Obermaier, G. & Samimi, C. (Hrsg.) (2015): Folgen des Klimawandels. Bayreuther Kontaktstudium Geographie, 8, 33-42.

**GERSTENGARBE, F.-W.; WERNER, P.C.; ÖSTERLE, H. & BURGHOF, O. (2013):** Winter storm- and summer thunderstorm-related loss events with regard to climate change in Germany. In: Theoretical and Applied Climatology, 114, 715-724.

**GÜNTHER, H. (2016):** Vertikalbegrünungen als Element grüner Infrastrukturen in Städten. In: fbr-wasserspiegel, 1/16, 18-21.

**HEIN, F.; LITZ, P. & GRAICHEN, P. (2021):** Abschätzung der Klimabilanz Deutschlands für das Jahr 2021. Analyse. Agora Energiewende, Version 2.0, 10.a

**HEINZE GMBH (2022):** eCarport [online], verfügbar unter: <https://www.heinze.de/produktserie/einhausungen-fuer-fahrraeder-und-muelltonnen-pavillons-und-pergolen/16260387/1/> (zuletzt aufgerufen am 28.02.2022)

**HOLZON GMBH (2022):** eCarport. [online], verfügbar unter: <https://www.esonne.com/solarcarports.php> (zuletzt aufgerufen am 28.02.2022)

**IPCC (2007):** H Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K.B.; Tignor, M. & Miller, H.L. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

**IPCC (2021A):** Climate change widespread, rapid, and intensifying – IPCC. IPCC Press Release. Geneva, 6, [online] verfügbar unter: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC\\_WGI-AR6-Press-Release\\_en.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release_en.pdf) (zuletzt aufgerufen am 12.01.2022).

**IPCC (2021B):** Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A.; Connors, S.L.; Péan, C.; Berger, S.; Caud, N.; Chen, Y.; Goldfarb, L.; Gomis, M.I.; Huang, M.; Leitzell, K.; Lonnoy, E.; Matthews, J.B.R.; Maycock, T.K.; Waterfield, O.; Yelekçi, O.; Yu, R. & Zhou, B. (eds), Cambridge University Press, Switzerland, 31.

**IRRIGATIONNETS (2021):** Flutprävention. [online] verfügbar unter: [Flutprävention – Irrigation Nets](#) (zuletzt aufgerufen am 18.01.2022).

**KASPAR, F.; IMBERY, F.; FRIEDRICH, K.; BÖTTCHER, F.; HERBST, M.; DEUTSCHLÄNDER, T.; FRIEDRICH, A. & TINZ, B (2021):** Deutscher Wetterdienst / Extremwetterkongress 2021: Was wir heute über das Extremwetter in Deutschland wissen. Offenbach am Main, 19.

**KIND, M. (2021):** Unwetter in Bayreuth: Orkanwarnung in Bayreuth, aktuell alle Schäden beseitigt. 21.10.2021, 14:46 Uhr, [online] [Unwetter in Bayreuth: Orkanwarnung in Bayreuth aufgehoben, aktuell alle Schäden beseitigt - Bayreuther Tagblatt \(bayreuther-tagblatt.de\)](https://www.bayreuther-tagblatt.de) (zuletzt aufgerufen am 19.01.2022)

**KOPPE, C. & JENDRITZKY, G (2014):** Die Auswirkungen von thermischen Belastungen auf die Mortalität. In: Lozán, J.L.; Grassl, H.; Karbe, L. & Jendritzky, G. (Hrsg.): Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. Elektronische Veröffentlichung, Kapitel 3.1.9, 7.

**KOTLARSKI, S.; GOBIET, A.; FREI, P.; MORIN, S.; RAJCAK, J.; SCHERRER, S. & VERFAILLIE, D. (2018):** Das Alpenklima im Wandel. In: FdSnow: Fachzeitschrift für den Skisport. Expertenforum Klima.Schnee.Sport, 36, Freunde des Skisports e.V. im Deutschen Skiverband, Planegg, 38-54.

**LENTON, T.M.; HELD, H.; KRIEGLER, E.; HALL, J.W.; LUCHT, W.; RAHMSTORF, S. & SCHELLHUBER, H.J. (2008):** Tipping elements in the Earth's climate system. In: PNAS, 105(6), 1786-1793.

**LFU [BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT] (2019):** Hochwassergefahrenfläche für den Roten Main. LfU, Augsburg, 22.12.2019, [online], verfügbar unter: [https://www.lfu.bayern.de/gdi/download/karte/HWGK\\_ETW\\_2412\\_RMAIN1\\_K3.pdf](https://www.lfu.bayern.de/gdi/download/karte/HWGK_ETW_2412_RMAIN1_K3.pdf) (zuletzt aufgerufen am 19.01.2022)

**LFU (2021A):** Bayerns Klima im Wandel. Heute und in der Zukunft. Bayerisches Landesamt für Umwelt [LfU], Augsburg, 18.

**LFU (2021B):** Bayerns Klima im Wandel. Klimaregion Mainregion. Bayerisches Landesamt für Umwelt [LfU], Augsburg, 18.

**LFU (2021C):** WMS-Layer Überschwemmungsgebiete und Hochwassergefahren. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 14.12.2021, [online], verfügbar unter: <https://geoportal.bayern.de/geoportalbayern/anwendungen/details?13&ret=dienste&anc=4cab2c12-fa7e-49c3-97ba-f4f33af3a598&resId=4cab2c12-fa7e-49c3-97ba-f4f33af3a598c> (zuletzt aufgerufen am 24.01.2022)

**MAGISTRAT LINZ (2020):** Fassaden- und Dachbegrünung. Die Stadt mit Pflanzen kühlen. Magistrat Linz – Planung, Technik und Umwelt, Linz, Infofolder Fassaden- und Dachbegrünung, 5.

**NAT. [NATIONALE] EXPERTENKOMMISSION FÜR STECHMÜCKEN AM FLI (2020):** Karte: Aktuelles und früheres Vorkommen von Populationen der Asiatischen Tigermücke (*Aedes albopictus*) in Deutschland auf der Basis von Landkreisen. Stand 31.12.2021, [online], verfügbar unter:

<https://www.fli.de/de/kommissionen/nationale-expertenkommission-stechmuecken-als-uebertraeger-von-krankheitserregern/> (zuletzt aufgerufen am 28.02.2022)

**PETOUKHOV, V.; RAHMSTORF, S.; PETRI, S. & SCHELLNHUBER, H.J. (2013):** Quasiresonant amplification of planetary waves and recent Northern Hemisphere weather extremes. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 110, 5336-5341.

**REGIERUNG VON OBERFRANKEN (2014):** Landesplanerische Begleitung für den Hochwasserschutz der Stadt Bayreuth. 31.07.2014, Bayreuth, 25.

**RIEHEL, R. & WIEMER, K. (2022):** Hitze, Trockenheit und Starkregen. Auswirkungen des Klimawandels auf die Städte. In: DStGB & Difu (2022): Hitze, Trockenheit und Starkregen. Klimaresilienz in der Stadt der Zukunft. Berlin. 6-8.

**ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, A.; CHAPIN, F.S.; III; LAMBIN, E.F.; LENTON, T.M.; SCHEFFER, M.; FOLKE, C.; SCHELLNHUBER, H.J.; NYKVIST, B.; DE WIT, C.A.; HUGHES, T.; VAN DER LEEUW, S.; RODHE, H.; SÖRLIN, S.; SNYDER, P.K.; COSTANZA, R.; SVEDIN, U.; FALKENMARK, M.; KARLBERG, L.; CORELL, R.W.; FABRY, V.J.; HANSEN, J.; WALKER, B.; LIVERMAN, D.; RICHARDSON, K.; CRUTZEN, P. & FOLEY, J.A. (2009):** A safe operating space for humanity. In: Nature, 461, 472-475.

**SCREEN, J.A. & SIMMONDS, I. (2014):** Amplified mid-latitude planetary waves favour particular regional weather extremes. In: Nature Climate Change, 4, 704-709.

**SPIES, I. (2019):** Urban climate – just warm streets and cool parks? Investigating the variabilities of heat at street-canyon and city-wide scale in Bayreuth. Masterarbeit, Lehrstuhl für Mikrometeorologie, Universität Bayreuth, 79.

**STERL, A.; SEVERIJNS, C.; DIJKSTRA, H.; HAZELEGER, W.; VAN OLDENBORGH, G.J.; VAN DEN BROEKE, M.; BURGERS, G.; VAN DEN HURK, B.; VAN LEEUWEN, P.J. & VAN VELTHOVEN, P. (2008):** Why can we expect extremely high surface temperatures? In: Geophysical Research Letters, 35(14), 5.

**STMUV [STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ] (2021):** Klima-Report Bayern 2021. Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten. München. 195.

**THOMAS, C. (2022):** Statistik der Klimaperioden, Temperatur, Lufttemperatur Botanischer Garten, Grafik der Monatsmittel und absoluten Abweichungen vom Klimamittel 1991-2020, [online], verfügbar unter: [http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/meteo/de/klima/gru/html.php?id\\_obj=140009](http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/meteo/de/klima/gru/html.php?id_obj=140009). (zuletzt aufgerufen am 14.02.2022)

**THOMAS, C.; LÜERS, J. & BABEL, W. (2019):** Stadtklimawandel in Bayreuth. Vortrag auf der Stadtratssitzung, Stadt Bayreuth, am 26.06.2019, Mikrometeorologie, Universität Bayreuth.



**THOMAS, S.M.; OBERMAYR, U.; FISCHER, D.; KREYLING, J. & BEIERKUHNEIN, C. (2012):** Low-temperature threshold for egg survival of a post-diapause and non-diapause European aedine strain, *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae). In: Parasites & Vectors, 5:100, 7.

**UBA (2021):** Treibhausgas-Emissionen in Deutschland, [online] verfügbar unter: [Treibhausgas-Emissionen in Deutschland | Umweltbundesamt](#) (zuletzt aufgerufen am 12.01.2022).

**UNFCCC (2015):** Adoption of the Paris Agreement FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1, United Nations Framework Convention on Climate Change, Paris, 30. November bis 11. Dezember 2015, 32.

**VALENTIN, A. (2022):** Grün statt Grau. Gewerbegebiete im Wandel. In: DStGB & Difu (2022): Hitze, Trockenheit und Starkregen. Klimaresilienz in der Stadt der Zukunft. Berlin. 17-18.

**WEF [WORLD ECONOMIC FORUM] (2021):** The Global Risks Report 2021. 16th Edition. Coligny/Geneva, 96.

**WALKER, B.H.; HOLLING, C.S.; CARPENTER, S.R. & KINZIG, A. (2004):** Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. In: Ecology and Society, 9(2), 5.

**WASSERWIRTSCHAFTSAMT HOF (2021):** Informationen und Bilder zu Hochwasserrückhaltebecken in Bayreuth, per E-Mail-Kontakt, jeweils am 18.11.2021 und 23.11.2021.

**ZEBISCH, M.; GROTHMANN, R.; SCHRÖTER, D.; HASSE, C.; FRITSCH, U. & CRAMER, W. (2005):** Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Ergebnisbericht einer Studie des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK), im Auftrag des Umweltbundesamtes. Forschungsbericht 201 41 253, Dessau, Climate Change 08/2005, 205.

## Wichtige Hinweise zu Nutzungs- und Urheberrechten sowie verwendeter Lizenzen Dritter

Folgende Lizenzen und Nutzungsbedingungen Dritter müssen bei einer Vervielfältigung, Veröffentlichung und/oder anderweitigen Nutzung des Energiekonzepts und/oder von Auszügen daraus unbedingt beachtet werden:

1. In einigen der Kartendarstellungen wurden im Rahmen einer von dem Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie (StMWMET) bereitgestellten Creative Commons Namensnennung 3.0 Lizenz bestimmte Geodaten verwendet (z.B. Web Map Service Windatlas, etc.). Die Stellen wurden entsprechend gekennzeichnet. Die Nutzungsbedingungen und Lizenzbestimmungen sind auf der Homepage des StMWMET (<http://www.stmwi.bayern.de>) einsehbar und müssen bei einer Veröffentlichung und/oder Vervielfältigung unbedingt beachtet werden.
2. Darüber hinaus wurden vom Auftraggeber unter Beachtung der vereinbarten Nutzungsbedingungen bestimmte Geodaten verwendet, die einer Lizenz von der Bayerischen Vermessungsverwaltung unterliegen. Hierbei handelt es sich insbesondere um folgende Geodaten:
  - Digitales Orthophoto 20cm (DOP20)
  - Digitale Flurkarte (DFK)

Diese Daten wurden in einigen Kartendarstellungen unverändert und/oder durch die Darstellung von darauf aufbauenden Analysen verwendet. Die betreffenden Stellen wurden entsprechend gekennzeichnet. Sie dürfen nur im Rahmen des vorliegenden Klimaschutzkonzepts und unter Beachtung der damit in Verbindung stehenden Nutzungsbedingungen verwendet werden. Lizenznehmer ist der im Impressum genannte Auftraggeber. Ohne die ausdrückliche Zustimmung des im Impressum genannten Auftraggebers und der Bayerischen Vermessungsverwaltung dürfen diese Daten nicht veröffentlicht, vervielfältigt und/oder anderweitig verwendet werden.

Weitere Informationen zur Lizenz und den Nutzungsbedingungen können bei dem im Impressum genannten Auftraggeber und bei der Bayerischen Vermessungsverwaltung (<http://www.vermessung.bayern.de>) eingeholt werden.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Änderungen der globalen Oberflächentemperatur in Relation zu 1850-1900. Rekonstruierte (Jahr 1-2000) und beobachtete (Jahr 1850-2020) Änderung der Oberflächentemperatur (Jahrzentschnitt).....	7
Abbildung 2: Globale Risiken im Vergleich.....	8
Abbildung 3: Lang anhaltende Trockenheit in der Region Bayreuth im Juli 2019.....	9
Abbildung 4: Hochwasser nach Starkregen in Bindlach im Juni 2021.....	10
Abbildung 5: Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Bayern von 1881 bis heute. Jeder Streifen im Band steht für ein Jahr. Die Spanne reicht von 6,0°C (dunkelblau) bis 9,9°C (orange) .....	12
Abbildung 6: Die Klimaregion Main mit einer Höhenverteilung zwischen 102 und 603 m ü. NN .....	14
Abbildung 7: Jahresmitteltemperatur im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971-2000 in der Mainregion .....	15
Abbildung 8: Durchschnittliche Monatstemperatur für die Klimaperioden 1961-1990, 1971-2000, 1981-1210 und 1991-2020, gemessen im Ökologisch-Botanischen Garten in Bayreuth. ....	19
Abbildung 9: Abweichung der Jahresmitteltemperatur (1851 bis 2018) vom langjährigen Mittel 1961 bis 1990 in Bayreuth in Kelvin (K).....	20
Abbildung 10: Satellitenaufnahme der Oberflächentemperatur im Raum der Stadt Bayreuth. Dargestellt ist die durchschnittliche Oberflächentemperatur aufgezeichnet an Sommertagen zur Mittagszeit (ca. 12 Uhr) bei geringer Wolkenbedeckung .....	22
Abbildung 11: Beispiele für Vertikalbegrünung in Städten.....	24
Abbildung 12: Beispiele für begrünte Fahrradstellplätze (oben)und Solar-Carports (unten) .....	26
Abbildung 13: Starkniederschlagsereignis am 05. Juni 2021 – räumliche Niederschlagsverteilung .....	30
Abbildung 14: Standorte des existierenden und der geplanten Hochwasserrückhaltebecken im Raum Bayreuths .....	31
Abbildung 15: Hochwasserrückhaltebecken Einschöpfung Bayreuth auf dem Landesgartenschau Gelände .....	32
Abbildung 16: Bekannte Hochwasserrisikoflächen in Bayreuth.....	34
Abbildung 17: Konzept der Flutpräventions-Photovoltaik.....	36
Abbildung 18: Jahresmittel der Windgeschwindigkeit 10m über Grund in Bayreuth.....	37

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Änderung des Klimas in der Mainregion und Modellierung für ein Szenario „ohne ambitionierten Klimaschutz“ .....	16
--	----