

# Publizierbarer Endbericht

Gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

## A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
<b>Kurztitel:</b>	Future Capacity
<b>Langtitel:</b>	Social vulnerability and adaptive capacity to risks from the impacts of future heat waves and air pollution
<b>Zitiervorschlag:</b>	Formayer, H., Hohenwallner-Ries, D., Moshhammer, H., Thaler, T., Kratzer, A., Krimm, H., Ventrubá, E., König, B., Friesenecker, M., Mayer, M., Schmidt, S., Kult J., Wallner, P., Kristen, A., Rieder, H. 2024: Social vulnerability and adaptive capacity to risks from the impacts of future heat waves and air pollution. Final Report on the research endeavor in the course of the ACRP13 Program.
<b>Programm inkl. Jahr:</b>	ACRP 13, 2020
<b>Dauer:</b>	01.10.2021 -31.03.2024
<b>KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:</b>	Universität für Bodenkultur Wien Herbert Formayer
<b>Kontaktperson Name:</b>	Herbert Formayer
<b>Kontaktperson Adresse:</b>	Gregor-Mendel-Straße 33
<b>Kontaktperson Telefon:</b>	01 /47654 81415
<b>Kontaktperson E-Mail:</b>	Herbert.formayer@boku.ac.at
<b>Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):</b>	Medizinische Universität Wien, Wien alpS GmbH, Tirol
<b>Schlagwörter:</b>	Klimawandel, Soziale Vulnerabilität, Gesundheit, Hitze, Ozonbelastung, Luftqualität
<b>Projektgesamtkosten:</b>	315.921 €
<b>Fördersumme:</b>	299.599,00 €

### Allgemeines zum Projekt

<b>Klimafonds-Nr:</b>	KR20AC0K18151
<b>Erstellt am:</b>	27.06.2024

## B) Projektübersicht

### 1 Kurzfassung

Klima und Luftqualität sind untrennbar miteinander verbunden (von Schneidmesser et al. 2015, Ebi und McGregor 2008), und die Risiken, die sich aus der Klimaerwärmung und der Verschlechterung der Luftqualität ergeben, sind in städtischen Gebieten besonders groß (Hoegh-Guldberg et al. 2020; von Schneidmesser et al. 2019). Die besonders großen Risiken entstehen in Städten sowohl aufgrund der klimatischen als auch der sozioökonomischen Bedingungen (Guerreiro et al. 2018; Tapia, et al. 2017). Die hohe Bevölkerungsdichte bedingt zudem, dass eine große Zahl von Menschen von Hitzestress betroffen ist und daher letztlich anfälliger für andere Umweltstressoren wie etwa eine verschlechterte Luftqualität wird. Der prognostizierte Temperaturanstieg und die Veränderungen in der Häufigkeit von Stagnationsphasen werden sich auf die künftige Luftqualität auswirken. Darüber hinaus variiert die Anfälligkeit für Extremereignisse je nach sozialen, wirtschaftlichen und demografischen Merkmalen (O'Lenick et al. 2019; Dong et al. 2020; Ran et al. 2020). Das Wissen darüber, wer den Belastungen durch Hitze und Luftverschmutzung ausgesetzt ist, ist daher eine wichtige Information für politische Entscheidungsträger.

Die spezifischen Ziele von Future Capacity waren:

- Die Definition robuster Indikatoren für Vulnerabilität, Bewältigungsfähigkeit und Anpassungsfähigkeit privater Haushalte im physischen, wirtschaftlichen, sozialen und politischen Bereich;
- Eine Analyse, wie sich Schwere und Häufigkeit von Hitzewellen und die damit verbundenen Luftverschmutzungsextreme für österreichische Gemeinden unter niedrigen und hohen Emissionspfaden verändern werden und wie lokale Minderungsstrategien die Belastungen in einem sich erwärmenden Klima begrenzen können;
- Eine Analyse, wie die kombinierten akuten Auswirkungen von Hitze und Ozonbelastung in einem typischen österreichischen Umfeld nachgewiesen werden können und welche Faktoren auf individueller und Gruppenebene (unter Verwendung von Proxies auf Bezirksebene) diese Auswirkungen beeinflussen;
- Das Aufzeigen möglicher Wege zur Verringerung der Vulnerabilität und zur Erhöhung der Anpassungsfähigkeit von Haushalten in den Fallstudiengemeinden und damit auch zur Förderung ihres Anpassungsverhaltens.

Die wichtigsten Ergebnisse des Projekts lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- eine höhere Prävalenz sozialer Vulnerabilität in alpinen und Grenzregionen im Süden und Westen Österreichs sowie in den nördlichen und westlichen

Grenzregionen Ober- und Niederösterreichs und in großen städtischen Regionen und regionalen Zentren;

- geringere Prävalenz sozialer Vulnerabilität in ländlich geprägten suburbanen Regionen rund um die Landeshauptstädte und andere wichtige regionale Zentren;
- Zunahme der Wärmebelastung mit der Zeit und dem Ausmaß der globalen Treibhausgasemissionen;
- „Klimastrafe“ durch gehäufte kombinierte Hitze- und Ozonbelastung sowie eine saisonale Verschiebung der Ozonbelastung unter RCP8.5;
- ein Rückgang der gemeinsamen Belastung durch Hitze und verschlechterte Luftqualität in Szenarien mit niedrigen Emissionen, der auf eine verbesserte Luftqualität zurückzuführen ist;
- Identifizierung von verbleibenden Umsetzungsdefiziten trotz umfangreicher Anpassungsstrategien und -maßnahmen in Graz und Linz: Während einige "Quick Wins" und „niedrig hängende Früchte“ teilweise genutzt wurden, bleibt jedoch viel Potenzial ungenutzt
- Identifizierung von Problemen im Zusammenhang mit der Eigenverantwortung und der Überwachung/Kontrolle der Anpassungsmaßnahmen, wodurch deren Wirksamkeit verringert und das Tempo der Umsetzung verlangsamt wird.

Die Analyse der Indikatoren für die soziale Vulnerabilität von 2011 bis 2019 zeigt zwar einen allgemeinen Rückgang der Vulnerabilität, aber in ländlichen Grenzregionen sowie in benachteiligten Gebieten von Großstädten sind die Werte weiterhin höher. Unter der Annahme einer zielgerichteten Sozialpolitik und guter wirtschaftlicher Bedingungen dürfte die soziale Gefährdung weiter abnehmen, während die Szenarien wirtschaftlicher Not und geringerer sozialer Unterstützung eine anhaltende oder zunehmende Gefährdung, insbesondere in städtischen Gebieten und Grenzregionen, vorhersagen. Die Auswirkungen der sozioökonomischen Trends auf die Klimarisiken müssen jedoch weiter erforscht werden.

Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass die künftige Belastung durch Hitze- und Ozon-Extreme stark vom realisierten Emissionspfad abhängen wird. Ehrgeizige Maßnahmen zur Emissionsreduzierung können sowohl die Verstärkung von Hitzeextremen als auch die Verschlechterung der Luftqualität eindämmen, so dass sich große Synergien zwischen verbessertem Klimaschutz und verbesserter Ozonluftqualität ergeben. Die Ergebnisse für das Szenario mit starken Auswirkungen (RCP8.5), bei dem die Emissionen von Treibhausgasen nicht und Ozonvorläufern ungenügend reduziert werden, würden dagegen zu "klimatischen und klimachemischen Strafen" führen was zu einer starken Zunahme der Häufigkeit von Hitzeextremen und einer Verstärkung und saisonalen Verschiebung der Nichteinhaltung des Ozonzielwerts führen würde.

## 2 Executive Summary

Climate and air quality are inextricably connected (von Schneidemesser et al. 2015, Ebi and McGregor 2008) and risks emerging from climate warming and degraded ambient air are particularly large in urban environments (Hoegh-Guldberg et al. 2020; von Schneidemesser et al. 2019). The particularly large risks emerge in cities due to both climatic and socioeconomic conditions (Guerreiro et al. 2018; Tapia, et al. 2017), and high population densities imply that a large number of people are affected by heat stress and therefore eventually become more vulnerable to other environmental stressors such as degraded air quality. Projected increases in temperature and changes in the frequency of stagnation episodes will impact future air quality. The vulnerability to extreme events varies depending on social, economic, and demographic characteristics (O’Lenick et al. 2019; Dong et al. 2020; Ran et al. 2020). Earlier vulnerability research shows that there are disproportionately distributed heat-related health risks based not only on social, but also physical parameters and geographic locations. Therefore, the knowledge about who is exposed to heat and air pollution burdens is essential information for policy makers.

The specific objectives of Future Capacity were:

- to define robust indicators for vulnerability, coping ability and adaptive capacity of private households within the physical, economic, social and political domain;
- to investigate how heat wave severity and frequency and related air pollution extremes will change for Austrian municipalities under low and high emission pathways, and how local mitigation strategies can limit burdens in a warming climate;
- to investigate how combined acute effects of heat and ozone burden can be demonstrated in a typical Austrian setting and which individual and group-level factors (using district level proxies) influence these effects;
- to illustrate potential pathways to reduce vulnerability and increase the adaptive capacity of households in the case study communities and thus also promote their adaptive behaviour.

Major results of the project include:

- a higher prevalence of social vulnerability in Alpine and Border regions in the southern and western parts of Austria, as well as the northern and western border regions of Upper and Lower Austria and in large urban regions and regional centers;

- lower prevalence of social vulnerability in rurally characterized sub-urban regions surrounding the capital cities of the federal provinces and other important regional centers;
- increases in the heat burden with time and magnitude of global greenhouse gas emissions;
- a climate penalty and seasonal shift in the ozone burden under RCP8.5;
- a decrease in the joint burden of heat and degraded air quality in low emission scenarios driven by improved ambient air quality;
- identification of remaining lacks in implementation despite the presence of extensive adaptation strategies and measures in Graz<sup>1</sup> and in Linz<sup>2</sup>: While some "quick wins" and low-hanging fruits have been partially utilised, there remains untapped potential, with more in-depth measures requiring intense political commitment to be realized fully.
- identification of issues related to ownership and monitoring/control alignment with adaptation measures, thereby reducing their effectiveness and hindering the pace of implementation.

While the analysis of social vulnerability indicators from 2011 to 2019 shows a general decrease in vulnerability, higher levels remain in rural border regions as well as in deprived areas of large cities. Assuming well-targeted social policies and good economic conditions, social vulnerability is expected to continue to decline, while the scenarios of economic hardship and reduced social support predict persistent or worsening vulnerability, especially in urban areas and border regions. However, more research is needed on the impact of socio-economic trends on climate risks.

The results further show that the future burden of heat and ozone extremes will depend strongly on the realized emission pathway. Ambitious emission reduction measures curb both the amplification of heat extremes and degradation of ambient air quality, thus large synergies emerge between improved climate protection and improved ambient ozone air quality. Results for the high impact scenario (RCP8.5) on the other hand, entailing failure in reducing greenhouse gas and ozone precursor emissions on the other hand would realize "climate and climate-chemistry penalties" leading to a strong increase in the occurrence frequency of heat extremes and amplification and seasonal shifts in the non-attainment of the ozone target value.

---

<sup>1</sup> Stadt Graz (s.a.): Klimawandelanpassung in Graz. Aktionsplan 2022. Verfügbar unter: [https://www.umweltservice.graz.at/infos/andere/Klimawandelanpassung\\_Aktionsplan2022.pdf](https://www.umweltservice.graz.at/infos/andere/Klimawandelanpassung_Aktionsplan2022.pdf)

<sup>2</sup> Planung, Technik und Umwelt (s.a.): Anpassungskonzept „Zukunft Linz“. Verfügbar unter: <https://www.linz.at/umwelt/111674.php>

### 3 Hintergrund und Zielsetzung

Klima und Luftqualität sind untrennbar miteinander verbunden (von Schneidmesser et al. 2015), und die Risiken, die sich aus der Klimaerwärmung und der Verschlechterung der Luftqualität ergeben, sind in städtischen Gebieten besonders groß (Hoegh-Guldberg et al. 2020; von Schneidmesser et al. 2019). Die besonders großen Risiken entstehen in Städten sowohl aufgrund der klimatischen als auch der sozioökonomischen Bedingungen (Guerreiro et al. 2018; Tapia, et al. 2017), und die hohe Bevölkerungsdichte bedeutet, dass eine große Zahl von Menschen von Hitzestress betroffen ist und daher letztlich anfälliger für andere Umweltstressoren wie eine verschlechterte Luftqualität wird. Bis Mitte des 21. Jahrhunderts könnte etwa die Hälfte der europäischen Bevölkerung in Gebieten leben, die im Sommer unter erheblichem Hitzestress leiden (Rohat et al. 2019). Darüber hinaus werden sich der prognostizierte Temperaturanstieg und Veränderungen in der Häufigkeit von Stagnationsphasen auf die künftige Luftqualität auswirken. Das Potenzial der Klimaerwärmung, die Ozonbelastung zu verschärfen (von Schneidmesser et al. 2020; Tarin-Carrasco et al. 2019; Rieder et al. 2015; 2018; Schucht et al. 2015), hat zu einer verbreiteten Verwendung des Begriffs "Klimastrafe" geführt (z. B. Wu et al. 2008). Darüber hinaus variiert die Anfälligkeit für Extremereignisse je nach sozialen, wirtschaftlichen und demografischen Merkmalen (O'Lenick et al. 2019; Dong et al. 2020; Ran et al. 2020). Frühere Untersuchungen zur Vulnerabilität zeigen, dass hitzebedingte Gesundheitsrisiken nicht nur aufgrund sozialer, sondern auch aufgrund physischer Parameter und geografischer Standorte unverhältnismäßig verteilt sind. Daher ist das Wissen darüber, wer den Belastungen durch Hitze und Luftverschmutzung ausgesetzt ist, eine wichtige Information für politische Entscheidungsträger. Bisher wurden in der Debatte über soziale Anfälligkeit und Widerstandsfähigkeit in der Klimapolitik hauptsächlich stereotype Gruppen wie Migranten, weniger wohlhabende oder ältere Menschen ausgewählt. Die vorherrschende stereotype Sichtweise lässt außer Acht, dass einzelne Haushalte unterschiedlichen Risiken ausgesetzt sein können oder auf unterschiedliche Ressourcen aus dem physischen, wirtschaftlichen, sozialen und politischen Bereich zurückgreifen können und dass Vermögenswerte in einem Bereich Defizite in einem anderen Bereich ausgleichen können. Daher hilft das Erkennen der breiteren Gesellschaftsstrukturen und das Aufdecken von Schwachstellen, die Auswirkungen von Extremereignissen zu verstehen.

Das Forschungsprojekt Future Capacity analysierte daher Belastungen durch Hitzestress und Luftverschmutzung für Einzelpersonen und Gemeinden in Österreich um so unser Verständnis der entstehenden Klimarisiken und Belastungen für (i) Haushalte und (ii) Gemeinden unter verschiedenen sozio-ökologischen Bedingungen zu verbessern. Future Capacity untersuchte die Dynamik, die den Einsatz von Klimarisikomanagement in Österreich charakterisiert, anhand von drei Hauptgruppen von Analysen. Diese Dynamiken umfassen: a) Governance-Aspekte, die zukünftige

Anpassungsplanungskonstellationen umfassen, die das Klimarisikomanagement und die Entscheidungsfindung leiten, b) soziale Aspekte, die die soziale Vulnerabilität und die individuelle Fähigkeit, mit Hitzestress und Luftverschmutzung umzugehen, bestimmen, und c) Klimamodellierungsaspekte, die die zukünftigen Veränderungen der Hitze- und Oberflächen-Ozonbelastungen für die gesundheitlichen Auswirkungen auf die Gemeinden. Future Capacity ist aus einer multidisziplinären Perspektive heraus konzipiert und nutzt ein breites methodisches Repertoire, das quantitative und qualitative natur- und sozialwissenschaftliche Forschungsmethoden integriert.

Die spezifischen Ziele von Future Capacity waren:

- Die Definition robuster Indikatoren für Vulnerabilität, Bewältigungsfähigkeit und Anpassungsfähigkeit privater Haushalte im physischen, wirtschaftlichen, sozialen und politischen Bereich;
- Eine Analyse, wie sich Schwere und Häufigkeit von Hitzewellen und die damit verbundenen Luftverschmutzungsextreme für österreichische Gemeinden unter niedrigen und hohen Emissionspfaden verändern werden und wie lokale Minderungsstrategien die Belastungen in einem sich erwärmenden Klima begrenzen können;
- Eine Analyse, wie die kombinierten akuten Auswirkungen von Hitze und Ozonbelastung in einem typischen österreichischen Umfeld nachgewiesen werden können und welche Faktoren auf individueller und Gruppenebene (unter Verwendung von Proxies auf Bezirksebene) diese Auswirkungen beeinflussen;
- Das Aufzeigen möglicher Wege zur Verringerung der Vulnerabilität und zur Erhöhung der Anpassungsfähigkeit von Haushalten in den Fallstudiengemeinden und damit auch zur Förderung ihres Anpassungsverhaltens.

## 4 Projektinhalt und Ergebnis(se)

Future Capacity nutzte multidisziplinäre Forschungsströme und umfasste fünf miteinander verbundene Arbeitspakete (WPs). WP1 analysierte die Vulnerabilität, Bewältigungsfähigkeit und Anpassungsfähigkeit in den Bereichen Wohlbefinden, Wirtschaft, Gesellschaft und Politik und WP2 konzentrierte sich auf die Bewertung der zukünftigen Temperatur- und Luftverschmutzungsbelastung in Österreich. WP3 analysierte die gesundheitlichen Auswirkungen von Hitze und verschlechterter Luftqualität in den beiden ausgewählten städtischen Fallstudien (Linz und Graz) mit dem Ziel, unser Verständnis und Wissen über Anfälligkeit, Bewältigungsfähigkeit und Anpassungsfähigkeit zu erweitern. WP4 ermittelte gemeinsam mit lokalen Interessenvertretern in den beiden Fallstudienregionen zukünftige Wege für Luftverschmutzung und Hitzewellen und legte Gegenmaßnahmen fest, um die Auswirkungen zu mildern und die Anfälligkeit auf lokaler Ebene zu reduzieren. WP5 umfasste alle Aufgaben im Zusammenhang mit



dem Projektmanagement, der Einbeziehung von Interessengruppen, der Verbreitung von Projektergebnissen und der Unterrichtung der Politik.

Die Hauptforschungsfrage, die WP1 leitete, bestand darin, "robuste" Indikatoren für die Anfälligkeit, die Bewältigungsfähigkeit und die Anpassungsfähigkeit privater Haushalte im physischen, wirtschaftlichen, sozialen und politischen Bereich zu definieren. Zu Beginn stand daher eine Literaturrecherche, die sich auf konzeptionelle Rahmen und Indikatoren konzentrierte, die bei der Bewertung von Anfälligkeit und Klimarisiken verwendet werden. In konzeptioneller Hinsicht orientierte sich WP1 an klassischen Risiko- und Vulnerabilitätskonzepten, die Umweltgefährdung, Exposition und soziale Vulnerabilität als Kerndimensionen und als theoretische Grundlage für unsere Analyse verwenden (z. B. EEA 2018; Leis & Kienberger 2020, IPCC 2022). Basierend auf diesen Rahmenwerken und der Verfügbarkeit von Daten haben wir einen ersten Satz von Daten und Indikatoren definiert. Die umweltbedingte Gesundheitsgefährdung wird als Temperatur und Oberflächenozon (O<sub>3</sub>) operationalisiert, die durch die Klimamodellierung in WP2 bereitgestellt wurden. Die Expositionsdimension umfasst den Grad der Verstädterung (Bevölkerungsdichte) und ständige Siedlungsgebiete (vgl. Cheng et al. 2021). Die soziale Vulnerabilität berücksichtigt zwei Aspekte: die individuelle Empfindlichkeit gegenüber gesundheitlichen Auswirkungen und die Fähigkeit, mit Umweltgefahren umzugehen (z.B. Cheng et al. 2021). Ersteres wird durch den Anteil von Kindern, älteren Menschen (65+) und Empfängern von Pflegeleistungen operationalisiert. Letzteres wird über den sozioökonomischen Status operationalisiert, wobei der Schwerpunkt auf einkommensschwachen Gruppen, niedrigem Bildungsniveau, Arbeitslosenquote und Sozialhilfeempfängern liegt. Details zur Methode werden in Abschnitt 6 beschrieben.

Die Analyse der Indikatoren für soziale Anfälligkeit in WP1 zeigt, dass die Anfälligkeit zwischen 2011 und 2019 historisch gesehen abgenommen hat. Im Jahr 2019 sind die Gebiete mit hoher sozialer Vulnerabilität über verschiedene Regionen in Österreich verteilt. Erstens, eine höhere Prävalenz in den nördlichen und westlichen Grenzregionen von Ober- und Niederösterreich. Zweitens ist eine höhere Prävalenz sozialer Vulnerabilität in den Alpen- und Grenzregionen in den südlichen und westlichen Teilen Österreichs (Süd- und Oststeiermark, Ost- und Westtirol, Vorarlberg) zu erkennen. Drittens ist eine höhere Prävalenz sozialer Vulnerabilität in bestimmten Gebieten großer städtischer Regionen (z. B. Wien, Linz, Graz) und auch (teilweise) in regionalen Zentren festzustellen. Viertens weisen ländlich geprägte suburbane Regionen um die Landeshauptstädte und andere wichtige regionale Zentren eine geringere Prävalenz auf.

Im Rahmen des SSP2-Szenarios, das von mittleren Herausforderungen bei der Anpassung an den Klimawandel und einer moderaten sozioökonomischen Entwicklung ausgeht, ist ein allgemeiner Trend zur Verringerung der sozialen Anfälligkeit in ganz Österreich zu beobachten. Die Verringerung der sozialen Anfälligkeit wird durch angenommene Verbesserungen in der Sozialpolitik und bessere wirtschaftliche Bedingungen angetrieben. Es wird davon ausgegangen,

dass städtische Gebiete in erheblichem Maße von erhöhten Investitionen in soziale Dienstleistungen und Bildung profitieren. Das SSP3-Szenario, das durch große Herausforderungen bei der Anpassung an den Klimawandel, wirtschaftliche Schwierigkeiten und geringere Investitionen in die Sozialpolitik gekennzeichnet ist, prognostiziert eine anhaltende oder sich verschlechternde soziale Anfälligkeit. In diesem Szenario verschärfen wirtschaftliche Schwierigkeiten und eine geringere Unterstützung für soziale Dienste die Anfälligkeit, insbesondere in städtischen Gebieten im Osten und in ländlichen Gebieten im Süden und Norden. Die Expositionswerte in Österreich, sowohl im Jahr 2019 als auch in der Projektion für 2050, spiegeln die Verteilung nach der Bevölkerungsdichte wider (siehe Abbildung 5). Die Kluft zwischen Stadt und Land ist deutlich sichtbar. Bis 2050 werden sowohl im SSP2- als auch im SSP3-Szenario keine signifikanten Änderungen der Expositionswerte erwartet. Die Verteilung wird wahrscheinlich konstant bleiben und die derzeitigen Muster der Bevölkerungsdichte und des Stadt-Land-Gefälles werden beibehalten. Diese Stabilität deutet darauf hin, dass sich zwar die soziale Anfälligkeit und spezifische Gefahren wie Hitze und Ozon ändern können, die Gesamtexposition aufgrund von Expositionsfaktoren jedoch relativ unverändert bleiben wird.

Die Ergebnisse von WP2 zeigen, dass die Gefährdung durch Hitze sowohl in Szenarien mit niedrigen als auch mit hohen Emissionen erheblich zunehmen wird, wobei in den östlichen und südlichen Regionen sowie in städtischen Gebieten mit einem deutlichen Anstieg zu rechnen ist. Ein weiteres entscheidendes Ergebnis der Analysen war, dass beim Szenario mit niedrigen Emissionen die Überschreitung der Ozongrenzwerte erheblich zurückgehen wird, insbesondere in städtischen Gebieten. Beim Szenario mit hohen Emissionen wird jedoch mit einer erheblichen Verstärkung der Auswirkungen von Hitze und Ozon gerechnet.

Kombiniert man diese Gefahrentrends mit Anfälligkeit und Exposition zu einem zusammengesetzten Hitze- und Gefahrenrisikoindex, zeigt Abbildung 6, dass das zusammengesetzte Risiko 2019 in der östlichen Region Österreichs am höchsten ist. Insbesondere Wien und die Region um den Neusiedler See sind mit dem höchsten zusammengesetzten Risiko konfrontiert. Im Allgemeinen sind die Gebiete in niedrigeren Höhenlagen etwas stärker gefährdet. Betrachtet man die Szenarien für das Jahr 2050, so ist festzustellen, dass die kombinierten Auswirkungen von Hitze- und Ozongefahren zwischen den Szenarien SSP2-4.5 und SSP3-8.5 erheblich voneinander abweichen. Im Szenario SSP2-4.5 tragen Klimaschutzmaßnahmen und eine moderate sozioökonomische Entwicklung dazu bei, diese Risiken zu mindern. Die Regionen mit hohem Risiko beschränken sich auf städtische Regionen mit hoher Bevölkerungsdichte. Das SSP3-8.5-Szenario hingegen, das durch hohe Emissionen und erhebliche Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel gekennzeichnet ist, weist auf einen kritischen Zusatzeffekt hin, bei dem erhöhte Wärme die Auswirkungen hoher Ozonwerte noch verschlimmert. Vor allem in großen städtischen Gebieten, den östlichen Regionen und Teilen des Donautals.

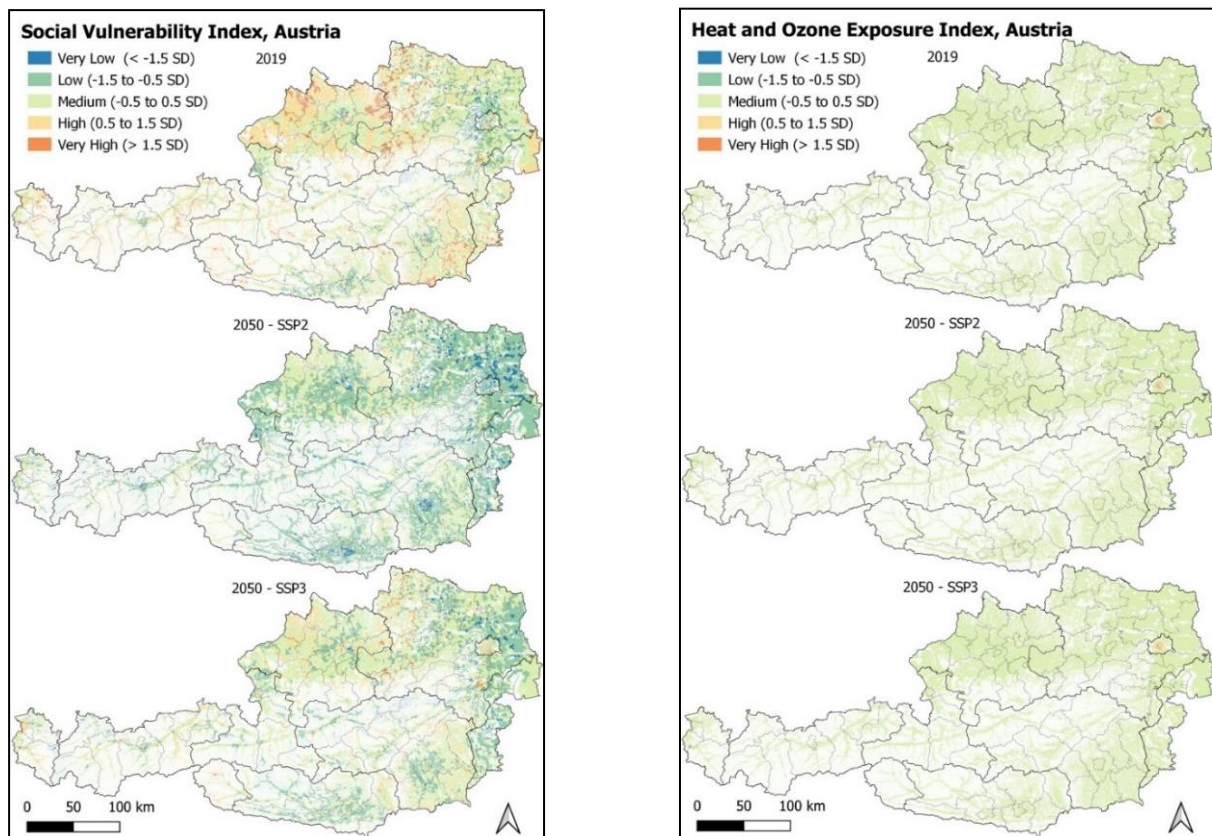


Abbildung 1: links: räumlich-zeitliche Betrachtung der sozialen Vulnerabilität in Österreich, 2019 und 2050<sup>3</sup>  
rechts: räumlich-zeitliche Betrachtung des Hitze- und Ozonbelastungsindex für Österreich, 2019 und 2050<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Two scenarios are given for 2050: SSP2 = Middle of the Road and SSP3 – Regional Rivalry: A rocky road (see Riahi et al., 2017 for details); Own calculations based on Statistik Austria, National SSP change rates are obtained from [IIASA, SSP database](#) and weighted by regionalised projections from [ÖROK \(2021\)](#) and [Eurostat](#).

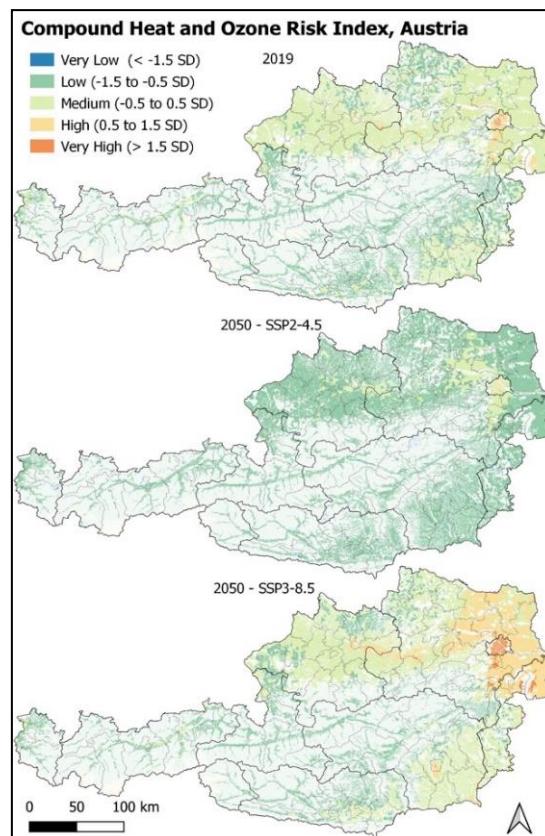


Abbildung 2: räumlich-zeitliche Darstellung des kombinierten Hitze- und Ozonindex für Österreich 2019 und 2050<sup>4</sup>

WP1 führte auch eine detailliertere räumlich-zeitliche Bewertung der Anfälligkeit und des Hitze- und Ozonrisikos für die beiden Fallstudienstädte Linz und Graz durch (die in WP4 untersucht wurden). Kurz zusammengefasst zeigt die soziale Vulnerabilitäts- und Risikoanalyse für die Fallstudien eine signifikante Zunahme der Gebiete mit hohem und sehr hohem Hitzeeisiko sowohl für Graz als auch für Linz. Dies ist vor allem auf die signifikante Zunahme von heißen Tagen und tropischen Nächten zurückzuführen, aber auch auf den erwarteten Bevölkerungszuwachs. Es ist daher von einem hohen Anpassungsbedarf an den Klimawandel - vor allem in dicht bebauten, städtischen Gebieten - auszugehen. Sowohl für das Szenario "Mittlerer Weg" als auch für das Szenario "Anspruchsvoller Weg" ist ein deutlich erhöhtes Hitzeeisiko zu erwarten. Für die Kombination von Ozon und Hitze, d.h. ein gemeinsames Auftreten von heißen Tagen oder Nächten und Ozon-Grenzwertüberschreitungen, zeigt das Szenario "Mittlerer Weg" eine deutliche Abnahme der Gebiete mit erhöhtem Risiko (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4). Die Ozonbelastung wird hauptsächlich durch die Verringerung der Emissionen in der Atmosphäre gesenkt. Gesetzliche Klimaschutzmaßnahmen verringern daher die kombinierten Auswirkungen erheblich und mindern das zusätzliche Gesundheitsrisiko durch Ozonverschmutzung. Dies reduziert die Komplexität des Umgangs mit dieser

<sup>4</sup> Two scenarios are given for 2050: SSP2 = Middle of the Road and SSP3 – Regional Rivalry: A rocky road (see Riahi et al., 2017 for details); Own calculations based on Statistik Austria, National SSP change rates are obtained from [IIASA, SSP database](#) and weighted by regionalised projections from [ÖROK \(2021\)](#) and [Eurostat](#)

Naturgefahr. Allerdings bleibt ein erheblicher Anpassungsbedarf durch Hitzestress bestehen.

Umgekehrt zeigt unsere Modellierung für den "anspruchsvollen Pfad" eine beträchtliche Ausweitung von Gebieten mit hohem und sehr hohem Risiko einer kombinierten Wärme- und Ozonbelastung. Dies ist vor allem auf die hohen Emissionen in der Atmosphäre zurückzuführen und verdeutlicht einen besonders dringenden und breiteren Anpassungsbedarf aufgrund unzureichender Minderungsmaßnahmen.

### Case Study: Linz and surroundings

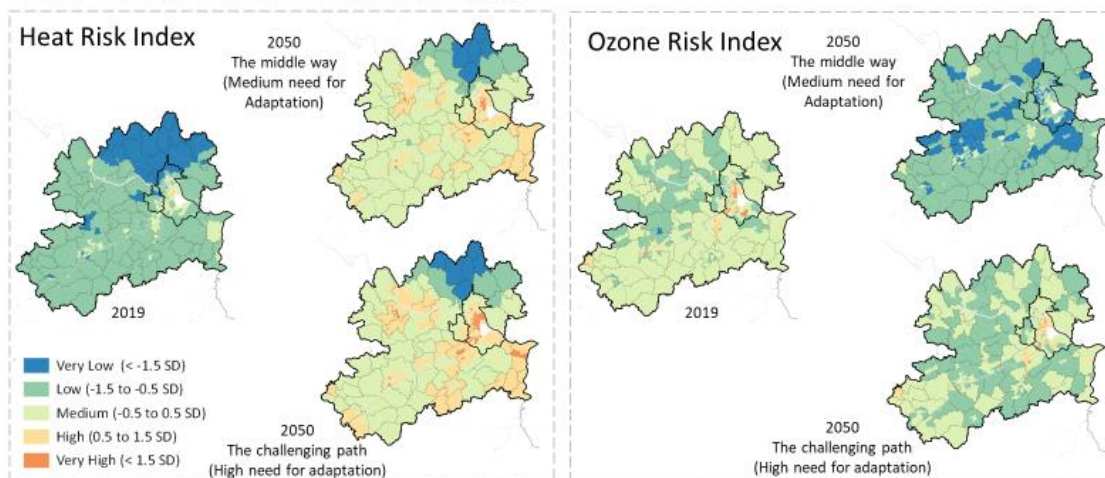


Abbildung 3: Unterschied von Hitze- und Ozonrisiko, Fallbeispiel Linz

### Case Study: Graz and surroundings

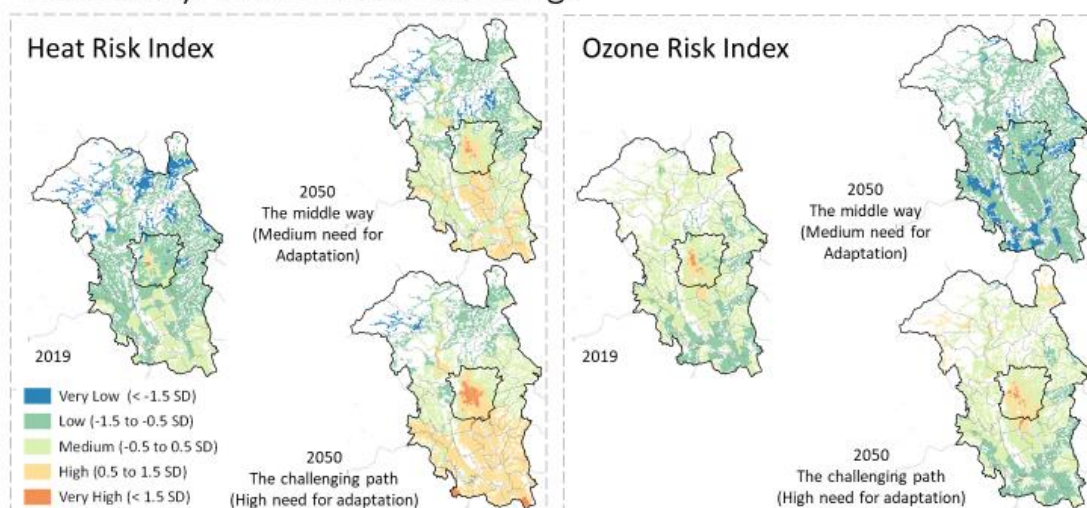


Abbildung 4: Unterschied von Hitze- und Ozonrisiko, Fallbeispiel Graz

WP2 konzentrierte sich auf die Abschätzung der zukünftigen Temperatur- und Luftverschmutzungsbelastung in Österreich. Dabei wurden diese Gefahren zunächst einzeln und dann kombiniert betrachtet. WP2 untersuchte den Nutzen einer Reihe neuartiger hochauflösender regionaler Klima- (RCM) und Chemie-Transport-Modell (CTM) Simulationen, um die gemeinsame Belastung durch Temperatur- und Luftqualitätsextreme im Vergleich zu Modellsimulationen auf größeren Rastern (1 km vs. 9 km) zu ermitteln.

Die Analysen für sich ändernde Wärmebelastungen stimmen im Allgemeinen gut mit früheren Arbeiten überein, die eine zunehmende Wärmebelastung mit der Zeit in Abhängigkeit von der Region und dem Emissionsszenario zeigen. Die Ergebnisse für die sich ändernde Oberflächen-Ozonbelastung zeigen verschiedene interessante Merkmale, die stark vom Emissionsszenario, der Jahreszeit und dem Ort abhängen. Bei niedrigen bis mittleren Emissionsszenarien, die durch ehrgeizige Stickoxidkontrollen angetrieben werden, wird die Ozonbelastung voraussichtlich abnehmen. In diesem Fall werden insbesondere die Ozonspitzenwerte in den nächsten Jahrzehnten sinken, aber auch die Häufigkeit der Tage, an denen der Ozonzielwert von 120 µg/m<sup>3</sup> nicht erreicht wird, wird deutlich abnehmen. Im Gegensatz dazu ergibt sich unter RCP8.5 ein klimatischer Nachteil, der in erster Linie auf erhöhte Ozonhintergründe zurückzuführen ist, die durch zunehmende Methanemissionen verursacht werden. Hier finden wir einen Anstieg der Gesamt-Ozonbelastung, eine Zunahme der Häufigkeit von Tagen, an denen der Ozonzielwert von 120 µg/m<sup>3</sup> nicht erreicht wird, sowie eine saisonale Verschiebung und Ausweitung der Haupt-Ozonsaison in Richtung Frühling. Die Klimastraft in Simulationen unter RCP8.5 tritt nahezu flächendeckend auf, allerdings mit Unterschieden in der Größenordnung in Abhängigkeit vom Ozonproduktionsregime (siehe Abbildung 10).

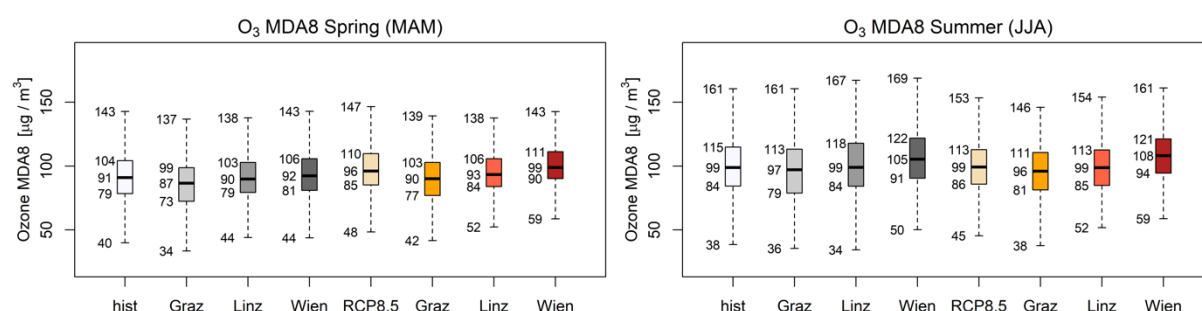


Figure 1: Maximale 8-Stunden Mittelwert der Ozonbelastung auf nationaler und regionaler Skala für die nahe Vergangenheit sowie Mitte des 21. Jahrhundert und RCP9.5 Emissionsszenario.

Betrachtet man das gemeinsame Auftreten von Temperatur- und Ozonextremen, so ergeben sich interessante Muster. Zum einen bleiben, wie in der jüngeren Vergangenheit, die Anzahl der heißen Tage sowie die mittleren Ozonhäufigkeiten auch in den kommenden Jahrzehnten in den urbanen Kernen höher als in ihrem unmittelbaren Umland, wie für die Fallstudien Graz und Linz unten dargestellt. Betrachtet man die mittlere Ozonhäufigkeit an heißen Tagen (Abbildung 5), so

wird deutlich, dass die Ozonhäufigkeit sowohl in Szenarien mit geringer als auch mit hoher Belastung im Vergleich zu historischen Werten abnimmt, während gleichzeitig die Anzahl der heißen Tage zunimmt. Dies lässt sich durch ehrgeizige NO<sub>x</sub>-Emissionsenkungen erklären, die sich im Sommer am stärksten auf das Ozon auswirken, und zeigt, dass der Klimastraß, der sich aus der Erwärmung der Sommertemperaturen auf die Ozonproduktion ergibt, die Wirkung der Kontrollen der Vorläuferstoffe nicht ausgleichen kann. Unsere Ergebnisse deuten also auf eine geringere Belastung durch Ozon hin, die einer zunehmenden Belastung durch Hitze entgegensteht. Betrachtet man die umgekehrte Analyse, d. h. die Tageshöchsttemperatur an Tagen, an denen die Ozonwerte den Zielwert überschreiten (Abbildung 12), so zeigt sich ein weiteres interessantes Merkmal. Hier zeigt sich, dass die mittlere Tageshöchsttemperatur an Tagen, an denen der Ozonzielwert überschritten wird, für zukünftige Szenarien (deutlich) unter 26 Grad liegt. Die Tage, an denen die Grenzwerte nicht eingehalten werden, verschieben sich also in der Jahreszeit und treten in den Projektionen überwiegend im Frühjahr auf. Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass die Hauptbelastung durch Ozon und Temperaturextreme in der Zukunft nicht zusammen, sondern zu unterschiedlichen Jahreszeiten auftreten wird.

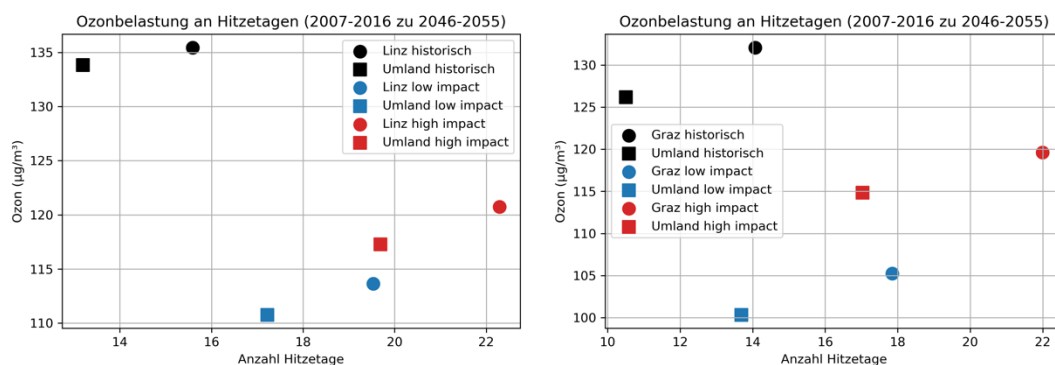


Abbildung 5: Durchschnittliche jährliche Anzahl an Hitzetagen und mittlere Ozonbelastung 2007-2016 (historisch) und 2046-2055 unter RCP 4.5 (niedriges Szenario) und RCP 8.5 (hohes Szenario) für Linz und Umgegend (links) und Graz und Umgegend (rechts)

Dennoch bleibt auch für die Zukunft eine beträchtliche Anzahl an Tagen mit gemeinsamer Temperatur- und Ozon-Extreme bestehen, die bei einem Pfad mit hohen Auswirkungen (RCP8.5) sogar über die historischen Werte hinaus ansteigen. Wenn man sich auf die Entwicklung der gemeinsamen Extreme konzentriert, wie es in den Fallstudien in Abbildung 6, zeigt auch den starken Kontrast zwischen den zukünftigen Emissionspfaden. Während bei einem Pfad mit geringen Auswirkungen (RCP4.5) die Anzahl der gemeinsamen Extreme sowohl in den städtischen Zentren als auch in deren Umgebung erheblich abnimmt, steigt die Anzahl der gemeinsamen Extreme bis Mitte des 21. Jahrhunderts wieder an oder übersteigt sogar das derzeitige Niveau bei einem Pfad mit hohen Auswirkungen (Abbildung 6).

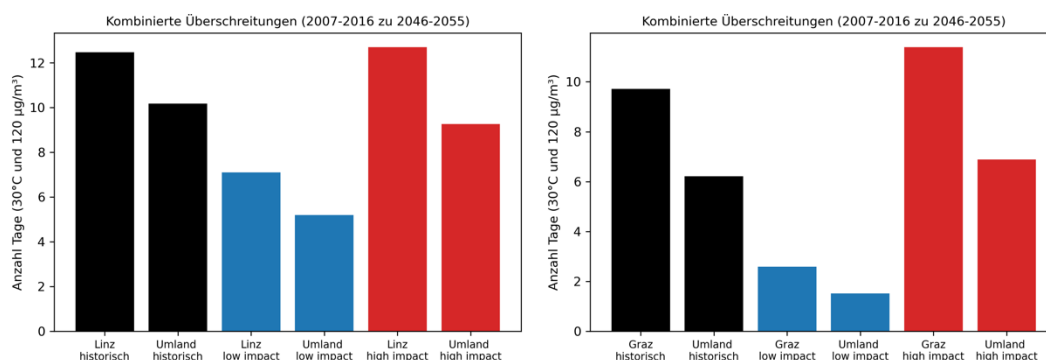


Abbildung 6: Durchschnittliche Anzahl an kombinierten Hitze- und Ozonwertüberschreitungstagen 2007-2016 (historisch) und 2046-2055 unter RCP 4.5 (niedriges Szenario) und RCP 8.5 (hohes Szenario) für Linz und Umgebung (links) und Graz und Umgebung (rechts)

In Bezug auf die Gesundheitsauswirkungen unter unterschiedlichen zukünftigen Klimabedingungen deutet unsere Literaturlauswertung auf eine Wechselwirkung oder eine überadditive Wirkung von Ozon und Wärme hin. Die Ergebnisse waren jedoch teilweise widersprüchlich, und die in den verschiedenen Studien verwendeten Modelle waren nicht vollständig vergleichbar. In unserer eigenen epidemiologischen Analyse haben wir zwar Hinweise auf eine Wechselwirkung gefunden, aber diese Wechselwirkung erreichte nur selten statistische Signifikanz. Daher kann die Temperaturentwicklung für eine Folgenabschätzung künftiger Ozonkonzentrationen vernachlässigt werden.

Troposphärisches Ozon ist ein Luftschadstoff, der in Europa ein Problem für die öffentliche Gesundheit darstellt. Der Klimawandel könnte die Bildung von Ozon verstärken. Anhand von vergangenen und prognostizierten jährlichen Sterblichkeitsdaten und modellierten täglichen Ozonkonzentrationen haben wir eine landesweite Gesundheitsfolgenabschätzung durchgeführt, um die jährlichen ozonbedingten vorzeitigen Todesfälle in Österreich abzuschätzen. Die Schätzungen basierten auf maximalen 1-Stunden-Mittelwerten von Ozon. Bis zum Zeitraum 2045 bis 2055 werden in Österreich aufgrund der demographischen Entwicklung mehr Menschen sterben. Daher werden auch mehr Todesfälle auf Ozon zurückzuführen sein. Höhere Treibhausgasemissions-szenarien (z.B. Repräsentativer Konzentrationspfad RCP8.5 im Vergleich zu RCP2.6) werden zu mehr ozonbedingten Todesfällen führen, hauptsächlich aufgrund der nationalen Emission von Ozonvorläufern (eine Differenz von 250 - 340 Fällen pro Jahr, je nach Modell), aber in geringerem Ausmaß aufgrund des globalen Klimawandels.

Die epidemiologische Forschung über die langfristigen gesundheitlichen Auswirkungen von Ozon (insbesondere europäische Kohortenstudien) wird gefördert. Die Zunahme der zurechenbaren Todesfälle wird vor allem durch nationale, nicht durch globale Minderungsmaßnahmen beeinflusst werden. Eine nationale Emissionsreduzierung wird sicherlich eine starke und positive Wirkung auf die lokale Atmosphärenchemie, die Luftqualität und die öffentliche Gesundheit haben.



Wir haben außerdem die Auswirkungen der Temperatur auf die täglichen Todesfälle in allen österreichischen Bezirken für die Jahre 1970 bis 2020 untersucht. Wir haben die bevölkerungsgewichtete Tagesmitteltemperatur betrachtet. Nach Kontrolle für den langfristigen und saisonalen Trend (natürlicher Spline mit etwa 6 Knoten pro Jahr) und für den Wochentag in einem allgemeinen additiven Modell, das eine negative Binomialverteilung annimmt, hatten sowohl die Temperatur am selben Tag als auch der 14-Tage-Durchschnitt der letzten Tage in den meisten Bezirken einen signifikanten Einfluss auf die täglichen Todesfälle. In Bezirken mit weniger Einwohnern wurden weniger genaue Effektschätzungen gefunden, aber die Effekte in den größeren Städten (Wien, Graz, Linz) waren ziemlich stark und ähnlich: 14-Tage-Durchschnitte waren linear und negativ mit der täglichen Sterblichkeit aus allen Ursachen verbunden: je kälter, desto mehr Todesfälle, ohne Anzeichen eines Schwellenwertes. Bei der Tagestemperatur hingegen zeigte sich ein klarer Schwellenwert, oberhalb dessen die Zahl der Todesfälle anstieg, ebenfalls auf ziemlich lineare Weise. In Abbildung 7 sind die Temperatur-Wirkungs-Funktionen als Beispiel für die Stadt Linz dargestellt.

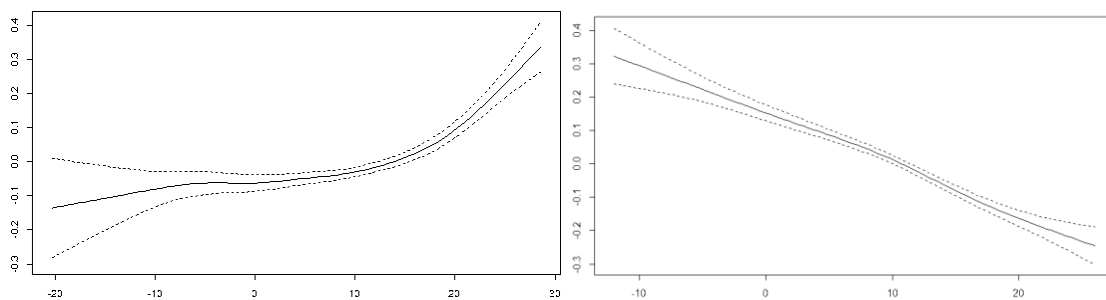


Abbildung 7: links: nicht-linearer Zusammenhang zwischen Tagestemperatur am gleichen Tag und Todesfällen in Linz (nach Kontrolle von langzeit- und saisonalen Trends sowie Wochentag) (logarithmische link-Funktion) rechts: nicht-linearer Zusammenhang zwischen der Durchschnittstemperatur der letzten 14 Tage und Todesfällen in Linz nach Kontrolle von langzeit- und saisonalen Trends sowie Wochentag) (logarithmische link-Funktion)

In einer Meta-Regression über alle Bezirke hinweg wurden die Faktoren auf Bezirksebene analysiert, die die Anfälligkeit gegenüber kalten und heißen Temperaturen beeinflussen. Die Unterschiede zwischen den Bezirken waren gering, so dass eine kausale Interpretation nicht möglich ist. Wir fanden jedoch Zusammenhänge mit der Höhenlage (geringe Höhenlage erhöht die Anfälligkeit für Kälte) und Indikatoren für den Wohlstand des Bezirks (Anteil der Einwohner ohne österreichische Staatsbürgerschaft, Pro-Kopf-Einkommen aus dem Tourismus, ebenfalls in Verbindung mit der Anfälligkeit für Kälte). Eine höhere Anfälligkeit für Hitze wurde in dichter besiedelten Bezirken mit einem höheren Anteil an Obdachlosen sowie in den Wiener Bezirken festgestellt. Die durchschnittliche Ozonkonzentration pro Bezirk wies ebenfalls einen gewissen, wenn auch nur geringen Einfluss auf. Dieser Effekt war jedoch bei unterschiedlichen Mittelungszeiten (1 Stunde / 8 Stunden Maximum) des Ozons nicht konsistent.

Das vierte Arbeitspaket widmete sich der Identifizierung relevanter Stakeholder an der Schnittstelle zwischen Hitze, Luftverschmutzung und Gesundheit in beiden Fallstudienregionen sowie der gemeinsamen Entwicklung antizipativer Zukunftspfade zur Steigerung der Anpassungsfähigkeit auf kommunaler sowie Haushaltsebene. Mit Hilfe von Leitfaden-gestützten Interviews wurden soziale Netzwerke analysiert und deren Akteure kartiert. Die Interviewten wurden ausgehend von zentralen Akteuren in den jeweiligen Fallstudien mittels Schneeballprinzip identifiziert und so die Netzwerke im Zusammenhang mit Gesundheit und den Auswirkungen von Hitze und Luftverschmutzung offengelegt. Nach einer theoretischen Einführung zum Thema sowie dem Forschungsvorhaben, folgten die ca. 30-minütigen Befragungen. Diese widmeten sich der Erhebung interner, d. h. aus der öffentlichen Verwaltung stammende, und externer, d. h. aus dem privaten Sektor stammende, Akteure innerhalb des oben genannten Nexus und ihrer Fachgebiete (*Wärme, Luftverschmutzung oder Anderes*). Mit den Fragen wurden außerdem Informationen über die Richtung (*mono- oder bidirektional*) und die Intensität des Kontakts und des Austauschs (*gering, regelmäßig*) zwischen der befragten Person/ihrer Organisation und dem betreffenden Stakeholder erfasst. Darüber hinaus wurde die Relevanz der Akteure für die Projektziele, d. h. die Stärkung der Anpassungsfähigkeit auf Haushaltsebene und die Verringerung der kommunalen Vulnerabilität, erfasst (mögliche Antworten waren *unwichtig, weniger wichtig, wichtig, sehr wichtig*) sowie die jeweilige Ebene (*Stadt, Region, nationale oder internationale Ebene*) und der Sektor (*öffentlich, zivilgesellschaftlich, privat, undefiniert*). Die dadurch aufgezeigten Netzwerke sind in den nachfolgenden Darstellungen abgebildet. Abbildung 8 zeigt das soziale Netzwerk für die Region Linz-Leonding. Schlüsselakteure sind u. a. die Abteilung Stadtklimatologie, die städtischen Klimakoordinatoren, die Abteilung Infrastruktur und Facility Management, die Standortagentur und die Seniorenzentren der Stadt. Abbildung 9 stellt weiters das soziale Netzwerk der Region Graz und Graz-Umgebung dar. Zu den wichtigsten Akteuren in Graz zählen einerseits das Stadtplanungsamt und das Umweltamt, andererseits das Gesundheits- und Sozialamt (Amt für Gesundheit und Pflege des Landes Steiermark). Auf Landesebene sind die entsprechenden Ämter, wie die Abteilung für Gesundheit und Pflege, zentral.

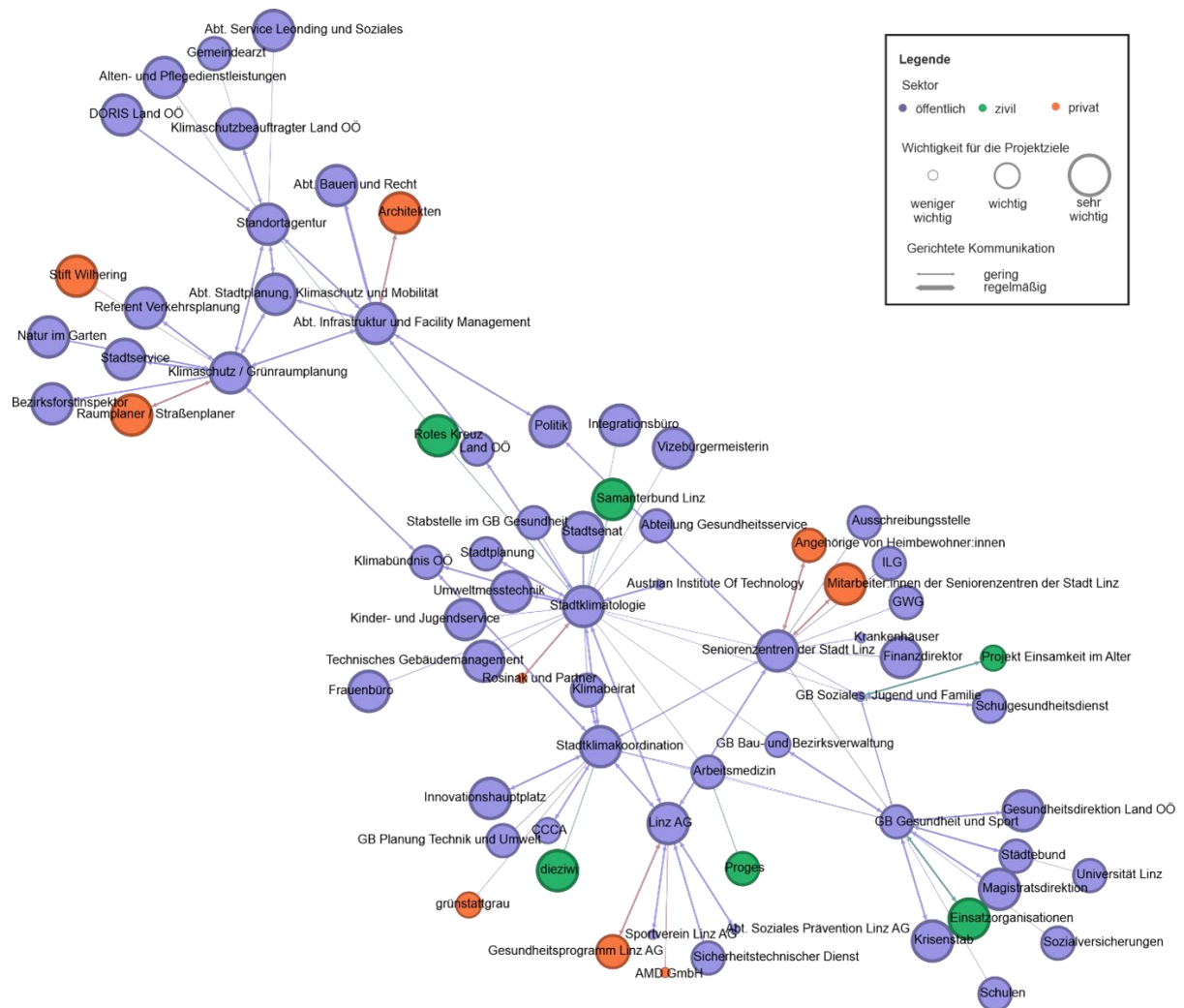


Abbildung 8: Ergebnis der sozialen Netzwerkanalyse (SNA) für die Fallstudienregion Linz

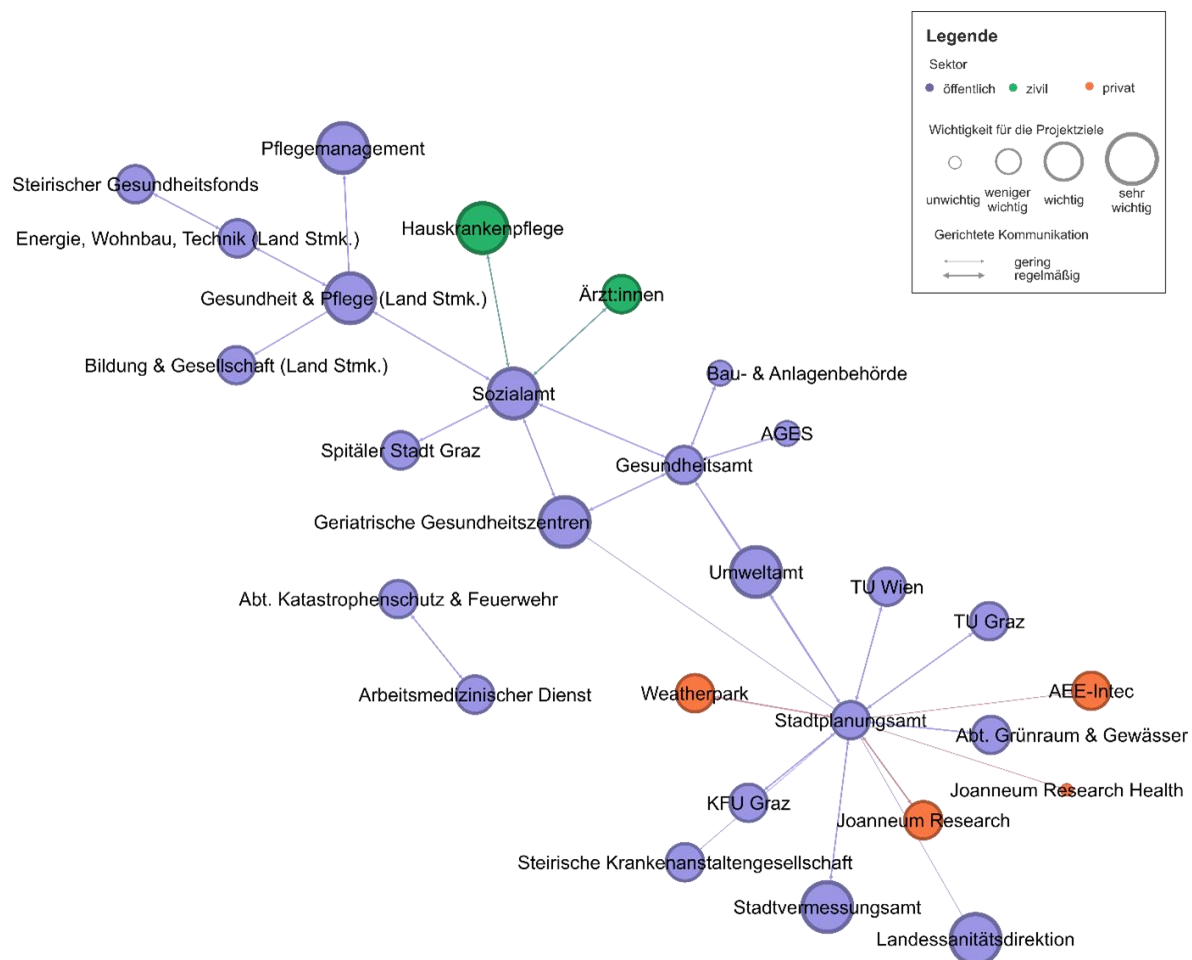


Abbildung 9: Ergebnis der sozialen Netzwerkanalyse (SNA) für die Fallstudienregion Graz

Die beiden Workshops wurden schließlich im Februar und März 2024 durchgeführt und basierten auf dem oben beschriebenen gemeinsamen Workshop-Design. Geringfügige Anpassungen der endgültigen Workshop-Methodik ermöglichten eine maßgeschneiderte und ortsbezogene Bewertung der zukünftigen Anpassungspfade:

In Graz wurde die Karte des Stakeholder-Netzwerks (Abbildung 9) um neue Stakeholder ergänzt, die für die Verknüpfung von Klimawandel, gefährdeten Gruppen und Auswirkungen von Hitze und Luftverschmutzung relevant sind. Dazu gehören unter anderem

- öffentliche Ämter auf Stadt- und Bezirksebene,
- Schulen und Universitäten,
- gemeinnützige Wohnungsbaugenossenschaften und öffentliche Wohnungsbaugesellschaften,
- nicht-staatliche Initiativen und
- regionale Vereine.

Laut den Workshop-Teilnehmern gibt es in der Stadt Graz und ihrem Umland bereits umfangreiche Strategiepapiere und Maßnahmen, darunter auch Konzepte zur Anpassung an den Klimawandel. Als Beispiele nannten die Teilnehmer:innen den verpflichtenden Grünflächenfaktor und begrünte Dächer. Um die konkrete Umsetzung weiter zu forcieren und zu beschleunigen, ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Politik, Verwaltung und Öffentlichkeit notwendig.

Im Gegensatz dazu und im Hinblick auf die umfangreiche Stakeholder-Netzwerkkarte in Linz (Abbildung 8) lag der Fokus des Workshops auf der Wirksamkeit der Maßnahmen in der Region sowie auf weiteren, ergänzenden Potenzialen im Rahmen der Klimaanpassung an zunehmende Hitze und Luftverschmutzung. Zu den Maßnahmen, die in Linz und Leonding bereits umgesetzt werden, zählen:

- die Schaffung von guten und verlässlichen Datengrundlagen und Klimaprojektionen,
- die verstärkte Planung von Straßenbegleitgrün bei der Planung neuer Straßen,
- die Einrichtung von öffentlichen Trinkbrunnen und konsumfreien öffentlichen Aufenthaltsräumen,
- Fernkälteversorgung durch den örtlichen Versorger,
- Aktivtreffen in allen Stadtteilen als Mittel der Kommunikation
- und die Entwicklung der Donau und anderer Grünflächen als Naherholungsgebiete.

Die Teilnehmer:innen stellten außerdem fest, dass insbesondere bei der Begrünung öffentlicher Räume ein hohes politisches Engagement und eine hohe gesellschaftliche Akzeptanz in Linz vorherrschen und die Politiker im Allgemeinen sehr motiviert sind, Anpassungsmaßnahmen umzusetzen. Neben dem politischen Engagement basiert die effektive Umsetzung auch auf der intensiven Zusammenarbeit zwischen Stadt und Land.

Verbesserungspotenziale orteten die Teilnehmer:innen in den Partizipationsmöglichkeiten von Bürger:innen, wie bei der Gestaltung des öffentlichen Raums, einschließlich der Verfügbarkeit von Trinkbrunnen, Toiletten und Mülleimern. Ein weiteres Potenzial läge in der koordinierten Planung von großräumigen Konzepten für den öffentlichen Verkehr zwischen Linz und dem Umland. Diese Planung sollte Lock-in-Effekte, wie z.B. unangepasste bauliche Maßnahmen, vermeiden. Die im föderalen System unterschiedlichen Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten von Bund, Ländern und Gemeinden werden teilweise als einschränkend empfunden und erschweren die Umsetzung von Projekten.

Das Projekt hat mehrere wichtige Erkenntnisse an der Schnittstelle zwischen sozialer Anfälligkeit, Hitze- und Luftverschmutzungsbelastung und Klimawandel sowie der Anpassungsfähigkeit identifiziert. Während in beiden Fallstudien aufgrund der zahlreichen bereits umgesetzten Maßnahmen sowie der bestehenden Strategiepapiere von einem proaktiven Umgang mit Klimawandelanpassung ausgegangen werden kann, konnten nichtsdestotrotz weitere Potenziale aufgedeckt werden. Beispielsweise ist die Wirksamkeit einiger der umgesetzten Maßnahmen ist aufgrund fehlender Überwachungs- und Kontrollmechanismen oder fehlendem "Ownership" vermindert. In beiden Regionen wurden bereits verfügbare „Quick Wins“ genutzt, aber besonders bei weiterreichenden Maßnahmen bestünde noch Potenzial, z. B. in Zusammenhang mit dem Ausbau urbaner Grünflächen und die Verbesserung der Zugänglichkeit zu kühlen Räumen innerhalb der städtischen Zentren.

Darüber hinaus waren sich die Teilnehmer:innen beider Workshops einig, dass mutiges politisches Handeln erforderlich ist, um zusätzliche, umfassendere und langfristige Strukturmaßnahmen umzusetzen. Die Erkenntnisse unterstreichen weiters die Notwendigkeit, holistische Maßnahmen nicht nur umzusetzen, sondern auch transdisziplinär zu kommunizieren, um besonders vulnerable Gruppen zu erreichen und langfristig zu schützen.

## 5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

WP1 lieferte eine umfassende Bewertung der zukünftigen Risiken des Klimawandels für Österreich, wobei der Schwerpunkt auf den räumlich-zeitlichen Trends von Ozon, Hitze und sozialer Vulnerabilität lag. Die wichtigsten Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung der Integration von Gefahren-, Expositions- und sozialen Vulnerabilitätsbewertungen für ein umfassendes Verständnis zukünftiger Klimawandelrisiken. Zwischen 2011 und 2019 ist die soziale Anfälligkeit im Allgemeinen zurückgegangen, wobei in bestimmten Regionen und städtischen Gebieten hohe Werte beobachtet wurden. Das SSP2-Szenario prognostiziert eine weitere Verringerung der Anfälligkeit aufgrund verbesserter sozialpolitischer und wirtschaftlicher Bedingungen, während das SSP3-Szenario eine anhaltende oder sich verschlechternde Anfälligkeit aufgrund wirtschaftlicher Härten und geringerer sozialer Unterstützung vorhersagt, insbesondere in städtischen östlichen und ländlichen südlichen und nördlichen Gebieten. Insgesamt unterstreicht die Bewertung der Anfälligkeit die Bedeutung der Sozialpolitik für Klimaanpassungsstrategien. Wenn das Niveau der sozialen Anfälligkeit weiter sinkt, könnte eine Konzentration auf die Anpassung unserer Regionen und Städte an die Auswirkungen des Klimawandels.

Zukünftige Projektionen deuten auf eine erhebliche Zunahme der Hitzegefahren sowohl bei Szenarien mit niedrigen als auch mit hohen Emissionen hin, insbesondere im Osten, Süden und in städtischen Gebieten. Wirksame Klimaschutzmaßnahmen, wie sie im SSP2-4.5-Szenario zu sehen sind, verringern

die Ozonbelastung und die kombinierten Risiken erheblich, wodurch zusätzliche Gesundheitsrisiken minimiert und Anpassungsbemühungen vereinfacht werden. Das SSP3-8.5-Szenario sagt jedoch schwerwiegende kombinierte Risiken durch Hitze und Ozon voraus, was den dringenden Bedarf an robusten Anpassungsstrategien verdeutlicht, wenn die Abschwächungsbemühungen unzureichend bleiben. Insgesamt werden durch Klimaschutzmaßnahmen zwar einige Risiken gemildert, doch besteht aufgrund der zunehmenden Hitze weiterhin ein erheblicher Anpassungsbedarf. Diese Erkenntnisse bilden eine wertvolle Grundlage für die Entwicklung gezielter politischer Maßnahmen zur Verbesserung der Widerstandsfähigkeit und Anpassungsfähigkeit angesichts des Klimawandels.

Während WP1 eine erste umfassende Bewertung der zukünftigen Risiken des Klimawandels für Hitze und Ozon in Österreich lieferte, sollten mehrere Einschränkungen anerkannt werden, insbesondere hinsichtlich der begrenzten Anzahl der verwendeten Indikatoren. Die Auswahl eines begrenzten Satzes robuster Indikatoren für Anfälligkeit, Exposition und Anpassungsfähigkeit war notwendig, um die Verfügbarkeit historischer Daten und zukünftiger Projektionen sicherzustellen. Dies schränkte jedoch den Umfang der Analyse in mehrfacher Hinsicht ein. Die verwendeten Indikatoren konzentrierten sich hauptsächlich auf sozioökonomische Faktoren wie Alter, Einkommen, Bildung und Arbeitslosigkeit. Während dies entscheidende Komponenten der sozialen Vulnerabilität sind, wurden andere wichtige Dimensionen wie Gesundheitszustand, soziale Netzwerke und kulturelle Faktoren aufgrund von Datenbeschränkungen nicht berücksichtigt. Obwohl die nationalen Veränderungsdaten aus der SSP-Datenbank durch regionalisierte Projektionen gewichtet wurden, kann es sein, dass dieser Ansatz die lokale Variabilität der soziodemografischen Trends nicht vollständig erfasst. Regionale Nuancen, wie z. B. lokale wirtschaftliche Bedingungen und spezifische Stadtplanungsstrategien, könnten die Anfälligkeit und Anpassungsfähigkeit beeinflussen, wurden aber in den Projektionen nicht direkt berücksichtigt. Künftige Forschungsarbeiten sollten daher darauf abzielen, den Indikatorensatz zu erweitern, zusätzliche Umweltgefahren einzubeziehen und regionale Projektionen zu verfeinern, um eine umfassendere Bewertung der Klimarisiken zu ermöglichen. Darüber hinaus könnte die Einbeziehung dynamischer sozioökonomischer Faktoren und möglicher Verhaltensanpassungen die Robustheit und Relevanz künftiger Anfälligkeits- und Risikobewertungen verbessern.

Die im Rahmen von WP2 erzielten Ergebnisse zeigen, dass die künftige Belastung durch Hitze- und Ozon-Extreme in starkem Maße vom realisierten Emissionspfad abhängen wird. Ehrgeizige Emissionsminderungsmaßnahmen dämpfen sowohl die Verstärkung von Hitzeextremen als auch die Verschlechterung der Luftqualität ein, so dass sich große Synergien zwischen verbessertem Klimaschutz und verbesserter Ozonluftqualität ergeben. Die Ergebnisse für das Szenario mit starken Auswirkungen (RCP8.5), bei dem es nicht gelingt, die Emissionen von Treibhausgasen und Ozonvorläufern zu verringern, würden

dagegen zu "Klima- und klimachemischen Strafen" führen, die eine starke Zunahme der Häufigkeit von Hitzeextremen sowie eine Verstärkung und saisonale Verschiebungen bei der Nichterreicherung des Ozonzielwerts zur Folge hätten. Die Ergebnisse sind besonders interessant für gemeinsame Temperatur- und Ozon-Extreme. Bei einem Pfad mit geringen Auswirkungen (RCP4.5) nimmt die Zahl der gemeinsamen Extreme sowohl in den städtischen Kernen als auch in deren Umland erheblich ab, während die Zahl der gemeinsamen Extreme bis Mitte des 21. Jahrhunderts wieder ansteigt oder bei einem Pfad mit hohen Auswirkungen sogar die derzeitigen Werte übersteigt. Die Dichotomie zwischen niedrigen und hohen Emissionspfaden und die damit verbundenen Ergebnisse für Wärme und Luftqualität unterstreichen, dass Klima und Luftqualität auf globaler, kontinentaler, regionaler und lokaler Ebene untrennbar miteinander verbunden sind.

Sowohl die Luftverschmutzung als auch die extremen Temperaturen stellen eine ernsthafte Bedrohung für die Gesundheit der Bürger dar, wobei besonders gefährdete Gruppen, d. h. ältere Menschen und chronisch Kranke, aber auch sozioökonomisch Benachteiligte, am meisten darunter leiden. Die Auswirkungen auf die Gesundheit werden durch Studien zur Sterblichkeit verdeutlicht, sind aber nicht auf dieses Ergebnis beschränkt. Am stärksten betroffen sind dicht besiedelte städtische Gebiete, da dort die Zahl der gefährdeten Personen hoch ist und die Exposition oft noch höher ist. Es gibt zwar einige Hinweise darauf, dass Temperaturen und Luftschadstoffe in einer Weise zusammenwirken, dass beide Stressoren zusammen eine mehr als additive Wirkung auf die Gesundheit haben, aber diese Wechselwirkung ist nicht sehr stark, so dass der Einfachheit halber extreme Temperaturen und Luftschadstoffe getrennt behandelt werden können. Mit der Erwärmung des Klimas werden extreme Hitzeperioden voraussichtlich an Häufigkeit und Intensität zunehmen. Lokale Maßnahmen zur Abschwächung haben nur geringe Auswirkungen und müssen daher durch Anpassungsmaßnahmen ergänzt werden. Die Luftverschmutzung wird zwar auch von den meteorologischen Bedingungen in größerem Maßstab bestimmt, wird aber stark von lokalen Emissionen beeinflusst. Dies gilt auch für Ozonspitzenwerte, die sich nachweislich viel stärker auf die Gesundheit auswirken als die längerfristigen Durchschnittskonzentrationen desselben Gases.

Insgesamt sind die im Rahmen von Future Capacity erzielten Ergebnisse von unmittelbarer Bedeutung für Luftqualitätsmanager, kommunale Beamte, die sich mit Klimaschutz und Klimaanpassung befassen, Planer, politische Entscheidungsträger und die Öffentlichkeit insgesamt. Die Ergebnisse von WP2 werden in Kombination mit den Ergebnissen der anderen Projekt-WPs noch relevanter für Entscheidungsträger und zeigen die wichtigsten Problembereiche und potenziellen Verbesserungsmöglichkeiten zur Verbesserung der Anpassungsfähigkeit auf kommunaler Ebene auf.

Das Projekt hat mehrere wichtige Erkenntnisse an der Schnittstelle zwischen sozialer Anfälligkeit, Hitze- und Luftverschmutzungsbelastung und Klimawandel



sowie der Anpassungsfähigkeit zutage gefördert. Erstens sind beide Fallstudien bereits vorbereitet und es wurden zahlreiche Maßnahmen zur Verbesserung der Anpassung an den Klimawandel auf Gemeindeebene ergriffen. Trotz dieser Vorbereitungen mangelt es jedoch noch an der Umsetzung, und die Überwachungs- und Kontrollmechanismen sind möglicherweise nicht auf die Anpassungsziele abgestimmt, was ihre Wirksamkeit beeinträchtigt. Selbst wenn mehrere Maßnahmen vorhanden sind, unterscheidet sich der Grad der Vorbereitung in den Fallstudien erheblich. In beiden Regionen wurden bereits verfügbare "Quick Wins" genutzt, aber es gibt noch mehr Potenzial, z. B. Grünflächen und die Verbesserung der Zugänglichkeit zu kühlen Gebieten innerhalb der städtischen Zentren. In beiden Fallstudien waren sich die Workshop-Teilnehmer einig, dass ein mutiges politisches Handeln notwendig ist, um zusätzliche, umfassendere und langfristige Strukturmaßnahmen umzusetzen. Darüber hinaus scheint die Anpassungsfähigkeit auf Haushaltsebene am Rande der kommunalen Verantwortung zu liegen, was die Notwendigkeit einer transdisziplinären Zusammenarbeit unterstreicht, um die Auswirkungen von Hitze und Luftverschmutzung auf gefährdete Gruppen anzugehen. Schließlich stellt die Kommunikation mit gefährdeten Gruppen eine potenzielle Herausforderung dar, und es könnte vorgeschlagen werden, Kanäle wie Gemeindezentren, soziale oder umweltbezogene NRO und Bildungseinrichtungen zu nutzen, um Personen mit unterschiedlichem sozioökonomischem Hintergrund zu erreichen. Die Ergebnisse zeigen, dass das Bewusstsein für das Problem des Klimawandels in beiden Fallstudien bereits vorhanden ist. Weitreichende Strategien zur Anpassung an den Klimawandel sind vorhanden, auch wenn die Wirksamkeit teilweise durch fehlendes Monitoring und Controlling behindert wird. Zielgruppen wie regionale Behörden und lokale sowie regionale öffentliche Verwaltungen können die Ergebnisse aus den Workshops nutzen, um Anpassungsmaßnahmen in und um Städte weiter zu entwickeln. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse dienen als Unterstützung für politische Entscheidungen, da sie die Notwendigkeit unterstreichen, Maßnahmen umzusetzen und zu kommunizieren sowie transdisziplinär zu kommunizieren, um gefährdete Gruppen zu erreichen, die nicht nur von langfristigen, strukturellen Maßnahmen profitieren würden, sondern auch von kleinen Schritten, die die Lebensqualität der Städte auch in Zeiten extremer Hitze erhöhen.

Künftige Forschungsarbeiten sollten daher darauf abzielen, den Indikatorensatz zu erweitern, zusätzliche Umweltgefahren einzubeziehen und regionale Projektionen zu verfeinern, um eine umfassendere Bewertung der Klimarisiken zu ermöglichen. Darüber hinaus könnte die Einbeziehung dynamischer sozioökonomischer Faktoren und möglicher Verhaltensanpassungen die Robustheit und Relevanz künftiger Anfälligkeits- und Risikobewertungen verbessern. Eine solche Projektion würde Konsistenz und Vergleichbarkeit über verschiedene Regionen hinweg gewährleisten und eine präzisere Ausrichtung der Anpassungsbemühungen ermöglichen. Durch die Konzentration auf granulare, lokalisierte Daten können politische Entscheidungsträger bestimmte gefährdete

Bevölkerungsgruppen und Gebiete identifizieren und Maßnahmen auf die besonderen sozioökonomischen und ökologischen Herausforderungen zuschneiden. Dieser Ansatz erhöht die Wirksamkeit von Anpassungsstrategien und stellt sicher, dass die Ressourcen effizient und gerecht zugewiesen werden, um die Widerstandsfähigkeit auf kommunaler Ebene zu stärken.

Ein etwas überraschendes Ergebnis des Future Capacity-Projekts war der geringe Unterschied in der Ozonbelastung zwischen Simulationen mit 9 und 1 km Gitterauflösung. Dieser geringfügige Unterschied kann auf das ursprüngliche Gitter der zugrundeliegenden Vorläuferemissionen und deren Umverteilung auf ein feineres Gitter zurückgeführt werden. Um weitere Verbesserungen in der nationalen Chemie-Klimamodellierung zu ermöglichen, wird sich das BOKU-Team über Future Capacity hinaus auf die Erstellung von hochauflösenden Emissionsdatensätzen in Zusammenarbeit mit den nationalen Forschungs- und Agenturteams konzentrieren, die an der Emissionsüberwachung, Berichterstattung und Erstellung von Emissionsinventaren beteiligt sind. In Anlehnung an die in Future Capacity gewonnenen Erkenntnisse über die enge Verbindung zwischen Temperatur- und Ozon-Extremen in der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft und die Rolle der allgemeinen Emissionspfade bei der Gestaltung der weiteren Entwicklung dieser Belastungen wird sich das Konsortium bemühen, die Analyse der Chemie-Klima-Verbindungen und der damit verbundenen Auswirkungen auf andere Kriteriensubstanzen wie z.B. PM in zukünftigen Arbeiten auszuweiten.

Hinsichtlich der gesundheitlichen Auswirkungen wird die Panelstudie fortgesetzt. Für eine aussagekräftige Analyse von Veränderungen der Stimmung, des Wohlbefindens und des allgemeinen Gesundheitszustands sowie für eine statistische Analyse der Zusammenhänge zwischen dem Gesundheitszustand und den meteorologischen Bedingungen sind mehr Daten und ein längerer Beobachtungszeitraum (mindestens zwei Jahre) erforderlich, um saisonale und andere Störfaktoren kontrollieren zu können.

Folgeuntersuchungen könnten zudem die Klimaanpassungspraktiken auf Haushaltsebene weiter untersuchen, um ein besseres Verständnis der Denkweisen, Fähigkeiten und Werkzeuge zu erlangen, die den Alltagspraktiken in Zeiten erhöhter Hitze und/oder Luftverschmutzung zugrunde liegen, z. B. unter Verwendung von Schatzkis Ontologie der Standorte (Schatzki 2002) oder anderer Paradigmen mit geografischem Schwerpunkt (z. B. Shove et al. 2012). Dieses Verständnis könnte darüber hinaus als Grundlage für die Anpassungsplanung dienen, da Maßnahmen effektiver auf individuelle Anpassungspraktiken zugeschnitten werden könnten, wodurch die Anpassungsfähigkeit langfristig verbessert würde. Darüber hinaus können vertiefte Evaluationen bestehender Maßnahmen und deren Entstehung und Wirksamkeit, z.B. durch problemzentrierte Interviews und ethnografische Forschungsmaßnahmen wie z.B. Wanderinterviews (Kusenbach 2003; Carpiano 2009; Bürgin 2020), Einblicke in die ortsbezogenen Bedingungen der Klimaanpassungspraxis aus einer Planungsperspektive bieten.

## C) Projektdetails

### 6 Methodik

Zur Identifizierung robuster Indikatoren für Anfälligkeit, Bewältigungs- und Anpassungsfähigkeit privater Haushalte im physischen, wirtschaftlichen, sozialen und politischen Bereich, begannen wir mit einer Literaturrecherche, die sich auf konzeptionelle Rahmen und Indikatoren konzentrierte, die bei der Bewertung von Anfälligkeit und Klimarisiken verwendet werden. In konzeptioneller Hinsicht orientierte sich WP1 an klassischen Risiko- und Vulnerabilitätskonzepten, die Umweltgefährdung, Exposition und soziale Vulnerabilität als Kerndimensionen und als theoretische Grundlage für unsere Analyse verwenden (z. B. EEA 2018; Leis & Kienberger 2020, IPCC 2022). Basierend auf diesen Rahmenwerken und der Verfügbarkeit von Daten haben wir einen ersten Satz von Daten und Indikatoren definiert (siehe Tabelle 1). Die umweltbedingte Gesundheitsgefährdung wird als Temperatur und Oberflächenozon (O3) operationalisiert, die durch die Klimamodellierung in WP2 bereitgestellt wurden. Die Expositionsdimension umfasst den Grad der Verstädterung (Bevölkerungsdichte) und ständige Siedlungsgebiete (vgl. Cheng et al. 2021). Die soziale Vulnerabilität berücksichtigt zwei Aspekte: die individuelle Empfindlichkeit gegenüber gesundheitlichen Auswirkungen und die Fähigkeit, mit Umweltgefahren umzugehen (z.B. Cheng et al. 2021). Ersteres wird durch den Anteil von Kindern, älteren Menschen (65+) und Empfängern von Pflegeleistungen operationalisiert. Letzteres wird über den sozioökonomischen Status operationalisiert, wobei der Schwerpunkt auf einkommensschwachen Gruppen, niedrigem Bildungsniveau, Arbeitslosenquote und Sozialhilfeempfängern liegt.

Tabelle 1: Set robuster Indikatoren und Variablen für die räumlich-zeitliche Risiko

Dimension	Indicator	Variables
Sensitivity	Age	Share of < 5 years old
		<b>Share of &lt; 19 years old*</b>
		<b>Share of &gt; 65 years old*</b>
		Share of > 85 years old
	Social Isolation of elderly persons	Share of > 65 years old living alone
Pre-Medical Condition	Care Payment Receivers	
Adaptative Capacity	Poverty	<b>Share of people with low income (&lt; 20,000€ net income per year)*</b>
		Share of Social Benefit Receivers (Notstandshilfe)
		Share of Unemployment Payment Receivers
	Education	<b>Share of people with Compulsory Education*</b>
	Gender	Share of Single Moms
	Overcrowding	Share of Large Households (> 5 Persons)
		Share of Multifamily Households
Exposure	Population	<b>Population Density per Permanent Settlement Area*</b>

**\*Limited set of indicators used for future assessment using SSPs**

In einem zweiten Schritt haben wir das Indikatoreset jedoch auf "robuste" Indikatoren beschränkt, die historische Entwicklungen und künftige Projektionen von Anfälligkeitsindikatoren ermöglichen (Tabelle 1). Die Bewertung der räumlich-zeitlichen Aspekte von Risiken im Zusammenhang mit dem Klimawandel hat sich in der Katastrophenrisikoforschung durchgesetzt. Integrierte Bewertungen der räumlich-zeitlichen Aspekte, die Gefährdung, Exposition und soziale Anfälligkeit miteinander verbinden, sind jedoch noch

wenig erforscht, insbesondere in den Bereichen extreme Hitzeereignisse und erhöhte Ozonkonzentrationen. Studien konzentrieren sich häufig entweder nur auf die Gefahrendimension, wie z. B. Hitzewellen und Ozonüberschreitungen, und vernachlässigen deren Wechselwirkungen (z. B. Feron et al. 2023), oder auf isolierte raum-zeitliche Bewertungen der sozialen Anfälligkeit und Exposition (z. B. Santos et al. 2022). Um diesen Mangel zu beheben, zielte unsere analytische Strategie darauf ab, zwei ausgewählte Kombinationen von gemeinsamen sozioökonomischen Pfaden und repräsentativen Konzentrationspfaden (SSP-RCP-Kombinationen) zu vergleichen. Die Kombinationen wurden so gewählt, dass sie zwei gegensätzliche Herausforderungen für die Anpassung an den Klimawandel widerspiegeln (siehe Riahi et al. 2017 für Details):

- SSP2-4.5: mittlere Herausforderungen für die Anpassung an den Klimawandel aufgrund einer geringeren Hitze- und Ozonentwicklung durch angenommene Klimaschutzmaßnahmen, einschließlich der Annahme, dass die Anfälligkeiten dem aktuellen Trend folgen.
- SSP3-8.5: große Herausforderungen für die Anpassung an den Klimawandel durch Zunahme des Hitze- und Ozonrisikos und Verschärfung der Anfälligkeiten - mehr armutsgefährdete Menschen und Menschen mit niedrigem Bildungsniveau

In einem ersten Schritt haben wir einen harmonisierten Datensatz erstellt, der eine integrierte Bewertung historischer und künftiger räumlich-zeitlicher Trends entlang der Dimensionen Anfälligkeit, Exposition und Gefährdung auf der Ebene der Volkszählungsbezirke ermöglicht. Die Volkszählungsgebiete wurden aufgrund ihrer Granularität ausgewählt, die ausreicht, um die Unterschiede zwischen den Stadtvierteln innerhalb der Städte abzubilden.

1. Hitze-Indikatoren und Ozon-Überschreitungen: Hitzeindikatoren wie der Jahresdurchschnitt der Hitzetage und Tropennächte sowie die durchschnittlichen jährlichen Tage der Ozonüberschreitung wurden im Rahmen des Arbeitspakets 2 (WP2) auf Volkszählungsgebiete interpoliert.
2. Projektion von Indikatoren für soziale Anfälligkeit und Exposition: Ein reduzierter und robuster Satz von Indikatoren für soziale Anfälligkeit und Exposition wurde bis 2050 projiziert. Für die Projektion wurde die SSP-Datenbank des IIASA verwendet, die nationale Veränderungsraten bei Urbanisierung, Bevölkerung, Bildungsniveau und Armut für SSP2 und SSP3 bis 2050 enthält (Dellink et al., 2017; Rao et al., 2018; Riahi et al., 2017; Samir & Lutz, 2014). Auf der Grundlage der in der SSP-Datenbank verfügbaren Variablen wurde der Satz von Variablen auf die in Tabelle 1 fett gedruckten robusten Variablen beschränkt. So wurden beispielsweise die Altersgruppen weit gefasst, z. B. die unter 19-Jährigen, um mit den Bevölkerungsprognosen des Kurses übereinzustimmen. Die folgenden Schritte wurden unternommen, um Näherungswerte für künftige Gefährdungsszenarien zu erstellen:

a) Historische Datenerhebung: Historische Daten für Zählgebiete wurden von der Statistik Austria für die Jahre 2011 und 2019 eingeholt. Die Anteile der Variablen wurden berechnet.

b) Annäherung der soziodemografischen Szenarien: Szenarien auf der Ebene der Volkszählungstrakte bis 2050 wurden approximiert, indem Variablen für 2019 mit nationalen Änderungsraten für SSP2 und SSP3 aus der IIASA-Datenbank projiziert wurden. Da SSP nur auf nationaler Ebene verfügbar waren, wurden regionale Variationen der soziodemografischen Trends approximiert. Regionale Variationen für Bevölkerungs- und Altersgruppen wurden berechnet, indem z-Scores der durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten aus regionalisierten Bevölkerungs- und Altersprognosen bis 2050 (ÖROK, 2021) ermittelt wurden. Diese z-Scores wurden zur Gewichtung der nationalen Veränderungsrate aus der IIASA-Datenbank verwendet. Die gewichteten Wachstumsraten der Szenarien wurden dann in einem geografischen Informationssystem (GIS) räumlich mit Zählgebieten verbunden und mit den Werten für 2019 multipliziert.

c) Angleichung der sozioökonomischen Szenarien: In Ermangelung regionalisierter Projektionen für Einkommen und Bildung wurden historische Daten für die "Armutsgefährdungsquote" (2015-2022) und das Bildungsniveau (2013-2022), differenziert nach dem Grad der Verstädterung, aus der Eurostat-Datenbank gesammelt. Die durchschnittlichen jährlichen Veränderungsrate wurden berechnet und zur Gewichtung der nationalen Veränderungsrate verwendet, wobei unterschiedliche sozioökonomische Trends zwischen städtischen, mittleren und ländlichen Gebieten berücksichtigt wurden. Die gewichteten Wachstumsraten der Szenarien wurden dann räumlich mit den Zählbezirken verbunden und mit den Werten für 2019 multipliziert.

Auf der Grundlage dieses harmonisierten Datensatzes basiert die räumlich-zeitliche Bewertung der Wärme- und Ozonrisikoanalyse auf folgenden Schritten:

1. Wir haben die Normalisierungsmethode des angepassten Mazziotta-Pareto-Index (AMPI) auf jede Variable über alle Szenarien und Zeitpunkte angewendet. Diese Methode hat den Vorteil, dass alle Werte über alle Zeiträume hinweg bei der Normalisierung berücksichtigt werden (Mazziotta & Pareto 2021). Die Anwendung dieser Methode ermöglicht es, die Einschränkungen beim Vergleich von z-bewerteten Werten im Zeitverlauf zu überwinden, wie Santos et al. (2022) berichten. Diese z-bewerteten Werte sind häufig das Ergebnis einer Hauptkomponentenanalyse (PCA), die üblicherweise für die Erstellung zusammengesetzter Anfälligkeits- und Risikoindikatoren verwendet wird.

2. Zur Bewertung spezifischer Komponenten wurden Teilindizes berechnet: Klimagefahr (differenziert nach Hitze und Ozon sowie deren Kombination), soziale Anfälligkeit und Exposition. Diese Teilindizes werden nach einem additiven Ansatz berechnet, d. h. die einzelnen Variablen

werden zu einem zusammengesetzten Maß addiert. Derselbe Ansatz wurde für die Berechnung eines zusammengesetzten Risikoindex verwendet. Die Verwendung von Teilindizes ermöglicht eine einfache und detaillierte Bewertung des Beitrags der einzelnen Faktoren zum Gesamtrisikoprofil.

3. Schließlich haben wir eine vergleichbare Abbildung im Zeitverlauf erstellt: Wir verwendeten die Standardabweichung, um die Teilindizes und den zusammengesetzten Risikoindex über verschiedene Szenarien und Zeitpunkte hinweg abzubilden und zu vergleichen. Auf der Grundlage der Standardabweichung definierten wir 5 Klassen, die für die Abbildung und die Berechnung der Häufigkeiten der Risikoklassen verwendet wurden.

WP2 konzentrierte sich auf die Abschätzung der zukünftigen Temperatur- und Luftverschmutzungsbelastung in Österreich. Dabei betrachten wir diese Gefahren zunächst einzeln und dann kombiniert. WP2 untersuchte den Nutzen einer Reihe neuartiger hochauflösender regionaler Klima- (RCM) und Chemie-Transport-Modell (CTM) Simulationen, um die gemeinsame Belastung durch Temperatur- und Luftqualitätsextreme im Vergleich zu Modellsimulationen auf größeren Rastern (1 km vs. 9 km) zu ermitteln. Auf diese Weise hat Future Capacity Neuland betreten und die vorhandenen Ressourcen genutzt, die über ÖKS15 und ACRP-Forschung im Rahmen von ATtain-O3 zur Verfügung stehen.

Die ersten Arbeiten in WP2 konzentrierten sich auf die Auswertung der CTM-Ergebnisse. Die Auswertung der Temperaturfelder für den historischen Zeitraum 2007-2016 ergab einige Verzerrungen (Abbildung 10). Diese wurden durch Quantil-Mapping korrigiert und ermöglichten die Verwendung der CTM-Temperaturdaten zusammen mit verzerrungskorrigierten Temperaturfeldern aus ÖKS15 und verzerrungskorrigierten Ozonfeldern aus ATtain-O3. Die Auswertung der CTM-Simulationen mit einer Auflösung von 1 km ergab keinen wesentlichen Unterschied in den Ozonhäufigkeiten an heißen Tagen im Vergleich zu den Simulationen mit einer Auflösung von 9 km für die städtischen Fallstudienregionen (Abbildung 2). Daher konzentrierte sich die Analyse auf die individuellen und gemeinsamen Belastungen durch Temperatur- und Ozonextreme sowie auf Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen städtischen Kernen und der Umgebung.

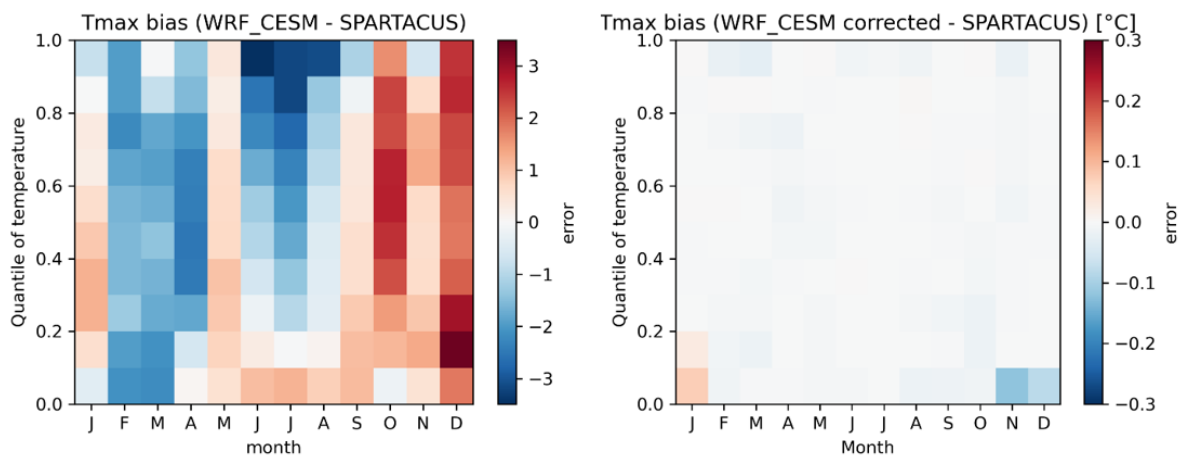


Abbildung 10: Abweichungen in Tmax bei CESM-getriebenen WRF-Chem Simulationen im Vergleich zu SPARTACUS über Quatnile und Monatsmittel auf Bezirksebene für die historische Basisperiode 2007-2016 vor (links) und nach (rechts) der statistischen Fehlerkorrektur

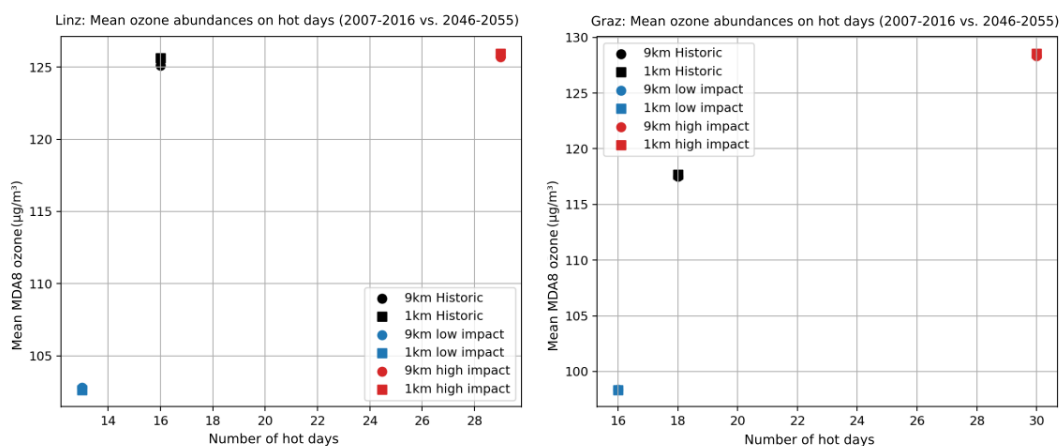


Abbildung 11: Vergleich der mittleren Ozonüberschreitung an heißen Tagen für CTM Simulationen auf 1km und 9km Auflösung für die Fallbeispielregionen Linz (links) und Graz (rechts) für 2007-2016 (historisch und 2046-2055) unter RCP 4.5 und RCP 8.5

WP3 beschäftigte sich mit der Frage, inwieweit kombinierte akute Effekte von Hitze- und Ozonbelastung in einer typischen österreichischen Umgebung nachgewiesen werden können und welche Faktoren auf individueller und Gruppenebene (unter Verwendung von Proxies auf Bezirksebene) diese Effekte beeinflussen.

Es ist gängige Praxis, bei der Analyse der gesundheitlichen Auswirkungen von Luftschadstoffen eine Temperaturbereinigung vorzunehmen. Die Anpassung für Luftschadstoffe bei der Untersuchung von Temperatur-/Hitzeeffekten ist weniger üblich (Analitis, 2014). In den letzten Jahren haben die Forscher mehr Gewicht auf die Veränderung der Auswirkungen gelegt (in beide Richtungen, d. h. Veränderung der gesundheitlichen Auswirkungen von Temperatur/Wärme durch Luftverschmutzung und Veränderung der Auswirkungen der Luftverschmutzung durch Temperatur/Wärme).



Aus experimentellen Studien ist bekannt, dass Hitzestress die Toxizität von Luftschadstoffen erhöhen kann (Gordon 2014, Liang 2020). In unserer systematischen Literaturrecherche haben wir uns auf Hitze und Ozon konzentriert. Folgende Datenbanken wurden verwendet: Pubmed, Scopus und Web of Science. Wir kombinierten die Suchbegriffe "Ozon AND (Wärme OR Temperatur)" mit den Begriffen "((joint) OR (additive) OR (synerg\*) OR (enhanc\*) OR (interact\*) OR (combin\*) OR (modif\*))". Darüber hinaus haben wir in Pubmed nach Übersichtsarbeiten und Meta-Analysen zum Thema "Ozon UND Hitze" gesucht. Es wurden nur epidemiologische Studien in englischer Sprache berücksichtigt.

Insgesamt wurden 2103 Datensätze identifiziert. Nach einem ersten Screening der Abstracts und Titel wurden 147 Datensätze einer gründlichen Bewertung unterzogen. Studien, die sich auf die Jahreszeit konzentrierten, wurden ausgeschlossen. Weitere Gründe für den Ausschluss waren fehlende Daten (n=2) und eine unverständliche Darstellung der Ergebnisse (n=1).

43 Studien wurden als relevant bewertet, 2 weitere stammten aus den Referenzlisten der Arbeiten. Die Informationen aus diesen 45 Studien wurden extrahiert und in eine Tabelle eingetragen. Die Synopse zeigt, dass viele verschiedene Methoden und Modelle, Messgrößen, Stratifizierungsstrategien usw. verwendet wurden.

Des Weiteren wurden die Auswirkungen der Temperatur auf die täglichen Todesfälle in allen österreichischen Bezirken für die Jahre 1970 bis 2020 untersucht. Wir haben die bevölkerungsgewichtete Tagesmitteltemperatur betrachtet. Nach Kontrolle für den langfristigen und saisonalen Trend (natürlicher Spline mit etwa 6 Knoten pro Jahr) und für den Wochentag in einem allgemeinen additiven Modell, das eine negative Binomialverteilung annimmt, hatten sowohl die Temperatur am selben Tag als auch der 14-Tage-Durchschnitt der letzten Tage in den meisten Bezirken einen signifikanten Einfluss auf die täglichen Todesfälle (siehe Kapitel 4).

Der Beginn der geplanten Panel-Studie verzögerte sich aufgrund von Rekrutierungsproblemen. Schließlich konnten wir etwa 35 Personen rekrutieren, von denen die meisten an einer chronischen Atemwegserkrankung leiden. Seit mehr als einem Jahr führen die ersten Teilnehmer ein monatliches Tagebuch, aber das gesamte Panel ist erst seit weniger als einem Jahr aktiv. Erst vor einem halben Jahr konnten wir auch Schüler von zwei weiterführenden Schulen einladen, regelmäßig in einem monatlichen Bericht über ihren Gesundheitszustand zu berichten.

Für eine aussagekräftige Analyse von Veränderungen der Stimmung, des Wohlbefindens und des allgemeinen Gesundheitszustands sowie für eine statistische Analyse der Zusammenhänge zwischen Gesundheitszustand und meteorologischen Bedingungen sind mehr Daten und ein längerer Beobachtungszeitraum erforderlich, um saisonale und andere Störfaktoren kontrollieren zu können. Die Panel-Studie wird über die Projektlaufzeit hinweg fortgesetzt.

Arbeitspaket 4 zielte darauf ab, gemeinsam mit lokalen Akteur:innen in den beiden ausgewählten Fallstudien Wege zu ermitteln, um den gesundheitlichen Risiken, insbesondere vulnerabler Gruppen, durch Luftverschmutzung und Hitzewellen entgegenzuwirken und deren Auswirkungen abzuschwächen. Weiters sollten Gegenmaßnahmen, die auf die Bedürfnisse der gefährdeten Gemeinschaft zugeschnitten sind, zur Minderung der Auswirkungen und zur Verringerung der Anfälligkeit auf lokaler Ebene festgelegt werden.

Das Arbeitspaket gliederte sich in zwei Abschnitte, der (1) Identifizierung von Stakeholder:innen sowie dem (2) Stakeholder:innen-Dialog.

Zur **Identifizierung relevanter Akteur:innen** in den jeweilige Fallstudien, Graz und Graz-Umgebung sowie Linz und Leonding, diente eine Stakeholder-Netzwerk-Analyse (SNA; Newman 2010). Die SNA ist ein bewährtes

Methodenset, um Akteure zu ermitteln und die Netzwerke und Strukturen ihrer Verbindungen zu untersuchen (Rockenbauch & Sakdapolrak 2017; Krupa et al. 2017; Luthe et al. 2012; Bodin & Crona 2009). Ausgehend von zentralen lokalen Partnern konnten mittels Schneeball-Prinzip weitere Akteur:innen in dem Nexus Hitze-Luftverschmutzung-Gesundheit identifiziert und interviewt werden. Die Interviews wurden als Videokonferenzen mit Hilfe des Programms "Network Canvas Interviewer" durchgeführt und orientierten sich an einem vorgegebenen Leitfaden, der sich auf die Erhebung der internen und externen Akteur:innen sowie die bestehenden Kommunikationsstränge und -intensitäten fokussierte.

Des Weiteren wurden bisher noch nicht im Zuge der Fragestellung involvierte Organisationen abgefragt und so die Sammlung der Akteur:innen ergänzt.

Für den **Stakeholder:innen-Dialog** zur Entwicklung antizipativer Zukunftspfade und die Initiierung eines transdisziplinären Lernprozesses zwischen lokalen Akteuren wurden im Februar und März 2024 partizipative Workshops durchgeführt. Aufgrund den bereits vielfach umgesetzten Maßnahmen und Strategien zur Anpassung an den Klimawandel in den beiden Fallstudienregionen wurden sowohl bestehende als auch potenzielle neue Maßnahmen und Strategien gesammelt und nach ihrer Wirkung und ihrem Aufwand bewertet.

Die Sammlung bestehender Maßnahmen und Schritte diente als Grundlage für das ko-kreative Brainstorming zusätzlicher Maßnahmen zur Verbesserung der Anpassungsfähigkeit der Haushalte. Diese wurden anhand einer 2x2-Matrix hinsichtlich ihrer Auswirkungen und des erforderlichen Aufwands bewertet. Diese Methodik entstammt dem Ansatz des Design Thinking und ermöglicht die Kategorisierung und Priorisierung von Ideen und zeigt auf, welche Handlungspotentiale verfolgt werden können und sollen. Durch die Erhebung weiterer Parameter, wie den Zuständigkeiten, der gesellschaftlichen Akzeptanz sowie den notwendigen Voraussetzungen, konnte der Erhebung zusätzliche Tiefe generiert werden, der die Notwendigkeit des politischen Willens sowie einer transdisziplinären Problembearbeitung hervorhob. Dieser direkte methodische Ansatz ermöglichte weiters, die Kluft zwischen wissenschaftlicher Forschung und kommunaler Praxis zu überbrücken und damit die Dritte Mission der österreichischen Hochschulen zu unterstützen.

## Literatur

- Bodin, O., Crona, B.I. (2009): The role of social networks in natural resource governance: What relational patterns make a difference? *Global Environmental Change*, 19, 366-374.
- and transparency of participatory scenario planning. *Society & Natural Resources*, 31,136-141.
- Cheng, W., Li, D., Liu, Z., & Brown, R. D. (2021). Approaches for identifying heat-vulnerable populations and locations: A systematic review. *Science of The Total Environment*, 799, 149417. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149417>
- Dellink, R., Chateau, J., Lanzi, E., & Magné, B. (2017). Long-term economic growth projections in the Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change*, 42, 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.06.004>
- Dong, J., Peng, J., He, X., Corcoran, J., Qui, S., Wang, X. (2020): Heatwave-induced human health risk assessment in megacities based on heat stress-social vulnerability-human exposure framework. *Landscape and Urban Planning* 203, 103907.
- Ebi K and McGregor G (2008): Climate change, tropospheric ozone and particulate matter, and health impacts. *Environ Health Perspect.* 2008 Nov;116(11):1449-55. doi: 10.1289/ehp.11463. Epub 2008 Jul 10. PMID: 19057695; PMCID: PMC2592262
- Guerreiro, S. B., Dawson, R. J., Kilsby, C., Lewis, E., Ford, A. (2018). Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities. *Environmental Research Letters*, 13(3).
- EEA (2018). Unequal exposure and unequal impacts: social vulnerability to air pollution, noise and extreme temperatures in Europe, European Environmental Agency Report No. 22/2018. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Feron, S., Cordero, R. R., Damiani, A., Oyola, P., Ansari, T., Pedemonte, J. C., ... & Gallo, V. (2023). Compound climate-pollution extremes in Santiago de Chile. *Scientific Reports*, 13(1), 6726.
- Hoegh-Guldberg, O., D. Jacob, M. Taylor, M. Bindi, S. Brown, I. Camilloni, A. Diedhiou, R. Djalante, K.L. Ebi, F. Engelbrecht, J. Guiot, Y. Hijjoka, S. Mehrotra, A. Payne, S.I. Seneviratne, A. Thomas, R. Warren, and G. Zhou, 2018: Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.
- IPCC (2022). Sixth Assessment Report. Impacts, Adaptation and Vulnerability
- Krupa, M., Cenek, M., Powell, J., Trammell, E.J. (2017): Mapping the stakeholders. Using social network analysis to increase the legitimacy
- Leis, J. L., & Kienberger, S. (2020). Climate risk and vulnerability assessment of floods in Austria: Mapping homogenous regions, hotspots and typologies. *Sustainability*, 12(16), 6458.
- Luthe, T., Wyss, R., Schuckert, M. (2012): Network governance and regional resilience to climate change. Empirical evidence from mountain tourism communities in the Swiss Gotthard region. *Regional Environmental Change*, 12, 839-854.
- Mazziotta, M., & Pareto, A. (2021). Data Normalization for Aggregating Time Series: The Constrained Min-Max Method. *Rivista Italiana Di Economia Demografia e Statistica*, 4.
- Newman, M.E.J. (2010): *Networks. An introduction.* Oxford, New York: Oxford University Press.
- ÖROK. (2021). ÖROK-Bevölkerungsprognose 2021 [dataset]. <https://www.oerok.gv.at/raum/daten-und-grundlagen/oerok-prognosen/oerok-prognose-2021-1>
- O'Lenick, C., Wilhelmi, O.V., Michael, R., Hayden, M.H., Baniassadi, A., Wiedinmyer, C., Monaghan, A.J., Crank, P.J., Sailor, D.J. (2019): Urban heat and air pollution: A f

- framework for integrating population vulnerability and indoor exposure in health risk analyses. *Science of the Total Environment*, 660, 715-723.
- Ran, J., MacGillivray, B.H., Gong, Y., Hales, T.C. (2020): The application of frameworks for measuring social vulnerability and resilience to geophysical hazards within developing countries: A systematic review and narrative synthesis. *Science of the Total Environment*, 711, 134486.
- Rao, N. D., Sauer, P., Gidden, M., & Riahi, K. (2019). Income inequality projections for the Shared Socioeconomic Pathways (SSPs). *Futures*, 105, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2018.07.001>
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Rieder, H.E., Fiore, A.M., Clifton, O.E., Correa, G., Horowitz, L.W., Naik, V. (2018): Combining model projections with site-level observations to estimate changes in distributions and seasonality of ozone in surface air over the U.S.A.. *Atmospheric Environment*, 193, 302-315.
- Rieder, H.E., Fiore, A.M., Horowitz, L.W., Naik, V. (2015): Projecting policy-relevant metrics for high summertime ozone pollution events over the eastern United States due to climate and emission changes during the 21st century. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 120, 784-800.
- Rockenbach, T., Sakdapolrak, P. (2017): Social networks and the resilience of rural communities in the Global South. A critical review and conceptual reflections. *Ecology & Society*, 22, 10.
- Rohat, G., Flacke, J., Dosio, A., Dao, H., van Maarseveen, M. (2019): Projections of human exposure to dangerous heat in African cities under multiple socioeconomic and climate scenarios. *Earth's Future*, 7, 528-546.
- Samir, K., & Lutz, W. (2017). The human core of the shared socioeconomic pathways: Population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100. *Global Environmental Change*, 42, 181–192. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.004>
- Santos, P. P., Zêzere, J. L., Pereira, S., Rocha, J., & Tavares, A. O. (2022). A Novel Approach to Measuring Spatiotemporal Changes in Social Vulnerability at the Local Level in Portugal. *International Journal of Disaster Risk Science*, 13(6), 842–861. <https://doi.org/10.1007/s13753-022-00455-w>
- Schucht, S., Colette, A., Rao, S., Holland, M., Schöpp, W., Kolp, P., Klimont, Z., Bessagnet, B., Szopa, S., Vautard, R., Brignon, J.-M., Rouil, L. (2015): Moving towards ambitious climate policies: Monetised health benefits from improved air quality could offset mitigation costs in Europe. *Environmental Science & Policy*, 50, 252-269.
- Tapia, C., Abajo, B., Feliu, E., Mendizabal, M., Martinez, J. A., Fernandez, J. G., et al. (2017). Profiling urban vulnerabilities to climate change: An indicator-based vulnerability assessment for European cities. *Ecological Indicators*, 78, 142-155.
- Tarin-Carrasco, P., Morales-Suraez-Varela, M., Im, U., Brandt, J., Palacios-Pena, L., Jimenez-Guerrero, P. (2019): Isolating the climate change impacts on air-pollution-related-pathologies over central and southern Europe – a
- von Schneidmesser, E., Monks, P.S., Allan, J.D., Bruhwiler, L., Forester, P., Fowler, D., Lauer, A., Morgan, W.T., Paasonen, P., Righi, M., Sindelarova, K., Sutton, M.A. (2015): Chemistry and the linkages between air quality and climate change. *Chemical Reviews*, 115. 10, 3856-3897.
- von Schneidmesser, E., Steinmar, K., Weatherhead, E. C., Bonn, B., Gerwig, H., & Quedenau, J. (2019). Air pollution at human scales in an urban environment: Impact of local environment and vehicles on particle number concentrations. *Science of The Total Environment*, 688, 691-700.

von Schneidmesser, E., Driscoll, C., Rieder, H.E., Schiferl, L.D. (2020): How will air quality effects on human health, crops and ecosystems change in the future? Philosophical Transactions

Wu, S.L., Mickley, L.J., Leibensperger, E.M., Jacob, D.J., Rind, D., Streets, D.G. (2008): Effects of 2000-2050 global change on ozone air quality in the United States. Journal of Geophysical Research- Atmospheres, 113, D6.

## 7 Arbeits- und Zeitplan

	Projectstart 10/2021	January 2022	January 2023	January 2024	Projectend 03/2024																									
Workpackage	Projectmonth																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1. Social Vulnerability Assessment																														
2. Assessment of the future heat and air pollution burden																														
3. Health impact assessment																														
4. Designing future capacity-building strategies																														
5. Project management and dissemination																														

Abbildung 12: Gantt Chart Projekt Future Capacity

## 8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Tabelle 2: Tabellarische Angabe von wissenschaftlichen Publikationen, die aus dem Projekt entstanden sind, sowie sonstige Disseminierungsaktivitäten

Publikationstyp	Autoren	Titel
Konferentbeitrag	Friesenecker et al.:	An integrated assessment of future risks of climate change for Austria: spatio-temporal trends of ozone, heat, and social vulnerability. EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-20205, <a href="https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-20205">https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-20205</a> , 2024.
Seminarbeitrag	Rieder et al.	Ambient air pollution: drivers, changes and future projections, Meteorological Colloquium, University of Vienna, 27 June 2023

Symposiumsbeitrag	Rieder et al.	Klimawandel und Luftgüte, Zusammenhänge, Entwicklungen und Herausforderungen, Symposium Luft.Klima.Menschen: Ein Alpenland im Wandel, 28 June 2023
Projektworkshop	Formayer et al.	Future Capacity – Stakeholder Workshop Graz. Maßnahmen zur Förderung der Anpassungskapazität im Bereich Hitze und Luftverschmutzung. Graz. 26.02.2024
Projektworkshop	Formayer et al.	Future Capacity – Stakeholder Workshop Graz. Maßnahmen zur Förderung der Anpassungskapazität im Bereich Hitze und Luftverschmutzung. Linz, 01.03.2024
Geplante Publikation	Friesenecker et al.	An integrated assessment of future risks of climate change for Austria: spatio-temporal trends of ozone, heat, and social vulnerability,
Geplante Publikation	Thaler et al.	Urban heat and air pollution: vulnerability, exposure and adaptation strategies in Austrian cities

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin/der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwertungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechteinhaberschaft am Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin/der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.