



Verbundprojekt „Klimawandel und Gesundheit“

Schlussbericht zum Forschungsvorhaben

Bioklimatisches Informationssystem Bayern: ein Service der UFS

Autoren: Thilo Erbertseder, Lisa Mittelstädt, Lorenza Gilardi, Claudia Traidl-Hoffmann,
Stephan Hachinger und Michael Bittner



finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



und durch
Bayerisches Staatsministerium für
Gesundheit und Pflege



Schlussbericht

Projektname: Bioklimatisches Informationssystem Bayern: ein Service der UFS

Akronym: BioClis

Aktenzeichen: K3-8503-PN 17-13

Projektlaufzeit: 01.11.2017 - 31.12.2019

Projektleitung: Prof. Dr. Michael Bittner
Universität Augsburg

Projektantragsteller Prof. Dr. Michael Bittner
Universität Augsburg

Projektpartner: Thilo Erbertseder, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Prof. Dr. Claudia Traidl-Hoffmann, Technische Universität München,
UNIKA-T
Dr. Stephan Hachinger, Leibniz Rechenzentrum der Bayerischen
Akademie der Wissenschaften

Version 2.0
08. Juni 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	4
2	Zielsetzung und Hintergrund	6
3	Der Aggregierte Risiko Index (ARI)	11
4	Der Universelle Thermale Klimaindex (UTCI).....	16
5	Datenprozessor und Simulationsinfrastruktur (AlpEnDAC).....	22
6	Ergebnisse - Das Bioklimatische Informationssystem.....	26
6.1	Bewertung des aggregierten Gesundheitsrisikos durch Luftschadstoffe.....	26
6.2	Das Online Informationssystem BioClis als Service der UFS	34
6.3	Effekte des Klimawandels in Bayern und Maßnahmen zur Adaption	50
6.4	BioClis Community Workshops	58
7	Darstellung des Nutzens im Rahmen der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie.....	60
8	Glossar.....	66
9	Literaturverzeichnis	69
10	Anlagen	80
10.1	Publikationen.....	80
10.2	Vorträge, Konferenzen	80
10.3	Poster	81
10.4	Mittlere Erhöhung des Gesundheitsrisikos in Bayern von 2010 bis 2016 für verschiedene Gesundheitsendpunkte	81

1 Zusammenfassung

Umweltstressoren wie Luftschadstoffe, Hitze oder Kälte können die Gesundheit des Menschen in vielfältiger Weise beeinträchtigen. Der Klimawandel bewirkt zudem eine Veränderung dieser Parameter, wobei vor allem die Extreme zunehmen werden. Der menschliche Organismus wird vor neue Herausforderungen gestellt.

Um den Einfluss von atmosphärischen Umweltstressoren auf die Gesundheit der Bayerischen Bürgerinnen und Bürger beurteilen zu können, ist es wesentlich, zuerst ihre Wirkung zu quantifizieren und schließlich über Gesundheitsrisiken und Präventionsmaßnahmen zu informieren. Im Rahmen des Verbundprojekts Klimawandel und Gesundheit (VKG) wurde daher ein Prototyp eines [Bioklimatischen Informationssystems \(BioClis\)](https://www.alpendac.eu/bioclis) entwickelt (<https://www.alpendac.eu/bioclis>). Dieses Informationssystem wurde in das Alpine Environmental Data Analysis Center, AlpEnDAC, des Virtuellen Alpenobservatoriums, VAO (<https://www.vao.bayern.de/index.htm>), für den täglichen Betrieb integriert und ist dort öffentlich verfügbar.

Mit BioClis wurde ein Werkzeug geschaffen, das der Bayerischen Staatsregierung und der Bevölkerung die flächenhafte Bewertung des aggregierten Gesundheitsrisikos durch Hitze- und Kältestress, sowie Luftschadstoffe in Bayern ermöglicht. Als webbasiertes Informationssystem liefert BioClis tagesaktuelle, flächendeckende und farbcodierte Analysen und Vorhersagen, die als „Service der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS)“ angeboten werden. Kern ist ein modularer, flexibler und erweiterbarer Umweltdatenprozessor, der auf den informationstechnologischen Entwicklungen der AlpEnDAC Plattform aufbaut und verschiedenste Datenquellen aus epidemiologischen Erhebungen, in-situ Messungen, Satelliten und numerischen Modellen integriert.

Obwohl die Auswirkungen von unterschiedlichen luftchemischen und meteorologischen Umweltstressoren auf die menschliche Gesundheit komplex sind, werden sie in BioClis in nur zwei Indizes übersichtlich zusammengefasst und kommuniziert: dem [Aggregierten Risikoindex ARI](#), sowie dem [Universellen Thermalen Klimaindex UTCI](#). Die bisher oft diffuse Informationslage mit verschiedensten Angaben zu Konzentrationen einer Reihe von Luftschadstoffen und meteorologischen Größen, konnte in ihrer Komplexität sinnvoll reduziert werden, was gerade auch für ältere Menschen oder bestimmte Risikogruppen wichtig erscheint. Alle Informationsprodukte sind im BioClis auf Landkreisebene verfügbar. BioClis ist als interaktive Webseite ausgelegt, was zur Erhöhung der Akzeptanz in Politik und Bevölkerung beiträgt. Darüber hinaus sind die Informationen zum UTCI auch mit höherer räumlicher Auflösung als tägliche Karte verfügbar (<https://www.alpendac.eu/spa#!/air-utci>). Der ARI ist ebenfalls mit höherer räumlicher Auflösung sowie auch für verschiedene Gesundheitsendpunkte für das Gebiet von Bayern als tägliche Karte abrufbar (https://www.alpendac.eu/spa#!/air-ari_by).

Die Analyse von Langzeitdatensätzen von Chemie-Transport-Modellen und in-situ Messungen erlaubt es zudem, eine flächendeckende statistische Analyse der Erhöhung des Gesundheitsrisikos durch Luftschadstoffe für verschiedene Gesundheitsendpunkte in ihrer langzeitlichen Entwicklung abzuschätzen. Je nach Gesundheitsrisiko wurden jeweils allgemeine Maßnahmen und Empfehlungen in den Bereichen Prävention und Verhalten formuliert.

BioClis liefert so einen informationstechnologischen und methodischen Baustein zur Förderung von proaktivem Verhalten und Handeln bei der Anpassung an den Klimawandel im Bereich der Gesundheit. Das Projekt adressiert die Forderung nach innovativen Informationssystemen und die Unterstützung insbesondere von Vorsorge-, Diagnostik- und Therapiemaßnahmen. BioClis trägt dazu bei, negative gesundheitliche Auswirkungen von Umweltstressoren und des Klimawandels durch geeignete Präventionsmaßnahmen zu reduzieren oder zu verhindern somit die Lebensqualität zu erhöhen. BioClis leistet damit einen konkreten Beitrag zur Umsetzung der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie (BayKLAS) im Handlungsfeld menschliche Gesundheit.

2 Zielsetzung und Hintergrund

Der Mensch ist täglich einer Reihe von Umweltstressoren ausgesetzt, die seine Gesundheit in vielfältiger Weise beeinträchtigen können. Um den Einfluss von atmosphärischen Umweltstressoren wie Luftschadstoffe, Lufttemperatur, Wind und Luftfeuchte auf die Gesundheit der Bayerischen Bürgerinnen und Bürger beurteilen und entsprechende Anpassungsmaßnahmen planen zu können, ist es wesentlich ihre Wirkung bzw. das damit verbundene Gesundheitsrisiko zu quantifizieren und darüber zu informieren. Ziel dieses Vorhabens war daher im Rahmen des Verbundprojekts Klimawandel und Gesundheit (VKG) ein Bioklimatisches Informationssystem für Bayern (BioClis) prototypisch zu entwickeln (Abbildung 1):

BioClis: Ziele



Webbasiertes Informationssystem BioClis (Prototyp)



Flächendeckendes, tagesaktuelles Gesundheitsrisiko durch atmosphärische Umwelt sowie mehrtägige Vorhersagen



Aggregierter Risiko Index durch Luftschadstoffe (ARI) und thermischer Stress (UTCI) nach Stand der Forschung für Bayern



Umweltmedizinische Empfehlungen zu Verhalten und Prävention



Bessere Lebensqualität für Risikogruppen

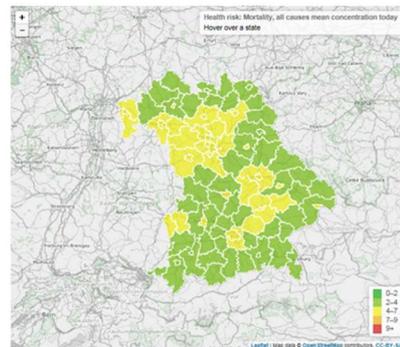


Abbildung 1: Die Zielsetzung des Vorhabens BioClis im Rahmen des Verbundprojekts Klimawandel und Gesundheit (VKG)

- BioClis zielte darauf ab, ein Werkzeug zu schaffen, das der Bayerischen Staatsregierung die flächenhafte Bewertung des aggregierten Gesundheitsrisikos durch Luftschadstoffe sowie Hitze- und Kältestress in Bayern ermöglicht. Der gewählte Ansatz sollte eine integrierte Betrachtungsweise der Veränderung des Gesundheitsrisikos durch Umwelteinflüsse erlauben.
- BioClis sollte als webbasiertes Informationssystem als „Service der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS)“ realisiert werden, wobei das Informationsangebot tagesaktuelle, flächendeckende und farbcodierte Karten sowie Vorhersagen des aggregierten Gesundheitsrisikos durch atmosphärische Umweltstressoren für Bayern umfassen sollte.
- Die Information sollte umweltmedizinisch beurteilt und je nach Risiko allgemeine Empfehlungen zum Verhalten erarbeitet und mit einfachen Indizes kommuniziert werden. Ziel war dabei die präventive Medizin und die bessere Anpassung an den Klimawandel durch aktive Partizipation, Verhaltensänderung und planerische Maßnahmen zu fördern.

- BioClis sollte unter Nutzung der IT-Infrastruktur der UFS bzw. des Virtuellen Alpenobservatoriums (VAO) entwickelt werden. Im Speziellen sollte die Implementierung in das Alpine Environmental Data Center (AlpEnDAC) erfolgen, mittels Integration modularer flexibler Schnittstellen und Umweltdatenprozessoren.
- Durch eine modulare und skalierbare Architektur sollte der Datenaustausch mit verschiedensten Datenquellen, die spätere Erweiterung von BioClis um zusätzliche Parameter und Informationsprodukte, sowie die Nutzung auch von anderen Forschungsprojekten des VKG ermöglicht werden. Diese Schnittstellen sollten zukünftig auch das verzögerungsfreie Anstoßen weiterer Datenverarbeitungsschritte erlauben bis hin zu z.B. Informationsdiensten an die Bevölkerung bei Gesundheitsgefahren.

Umweltstressoren und Gesundheitsrisiko

Jeder Mensch ist charakterisiert durch sein Genom - seine genetische Disposition, sein Alter und möglicherweise eine Reihe von Vorerkrankungen. Tagtäglich sind wir zudem einer Vielfalt von Umweltfaktoren ausgesetzt – dem Exposom. Darunter wird die Gesamtheit aller nicht-genetischen Umwelteinflüsse verstanden, denen ein Individuum ein Leben lang gegenüber exponiert ist (Wild, 2005). Dazu gehören Luftschadstoffe, Lärm, Pollen, Strahlung, aber auch die Ernährung, der Lebensstil und sogar der soziale Status (DeBord et al., 2016). Die Berücksichtigung des Exposoms überwindet das einseitig genetische Ursachenverständnis von Erkrankungen (Paolini-Giacobino, 2011; Wild, 2012). Die atmosphärischen Umweltstressoren und ihre Wirkung auf den Menschen sind in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Der Fokus liegt in BioClis auf den (farblich hervorgehobenen) Umweltstressoren Luftschadstoffe, Hitze und Kälte sowie ihren Reizantworten bzw. Gesundheitsendpunkten im Spektrum von Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen.

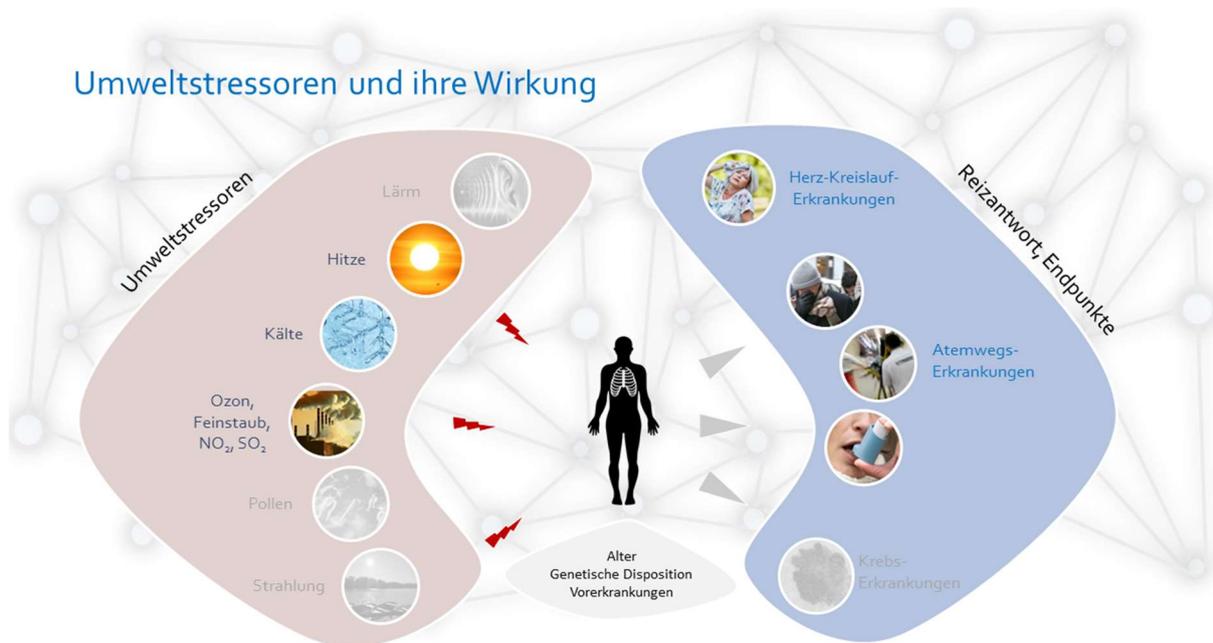


Abbildung 2: Atmosphärische Umweltstressoren und ihre Wirkung auf den Menschen

Aufgrund der Wirkung von Umweltstressoren auf die menschliche Gesundheit, fordern die Weltgesundheitsorganisation (WHO), die Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) und das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) die politisch führenden Kräfte in Europa dazu auf, verstärkt gegen umweltbedingte Erkrankungen in der Bevölkerung vorzugehen (WHO 2017). Laut Weltgesundheitsorganisation (WHO) gilt dabei Luftverschmutzung heute als größtes einzelnes Umweltgesundheitsrisiko (vgl. Landrigan et al., 2018, EUA, 2019). Auch in Deutschland lebt noch ein Großteil der Bevölkerung über dem empfohlenen WHO-Grenzwert für Feinstaub. In 2018 wurde dieser Grenzwert an 78% aller 374 PM₁₀-Messstellen überschritten. Auch beim NO₂ lagen in 2018 insgesamt 57 deutsche Städte über dem jährlichen Grenzwert (UBA, 2019a). Häufig wird in diesem Zusammenhang auf eine Publikation verwiesen, in Deutschland seien für das Jahr 2014 etwa 13.000 vorzeitige Todesfälle alleine auf die NO₂-Belastung zurückzuführen (UBA, 2018a).

Mittlerweile ist in mehreren Arbeiten nachgewiesen worden, dass die Methodik zur Berechnung der „Anzahl der vorzeitigen Todesfälle“ methodische Schwächen zeigt und zu erheblichen Über- oder Unterschätzungen führen kann (Robins and Greenland, 1989; Robins and Greenland, 1991; Morfeld und Erren, 2019). Nichtsdestotrotz belegen diese Studien einen grundsätzlichen Zusammenhang zwischen Luftqualität und gesundheitlichen Risiken. Bei absoluten Zahlen sollte daher die etablierte Größe der „Anzahl der verlorenen Lebensjahre“ verwendet werden. Für einen 30-Jährigen, der statistisch noch 51 Jahre lebt, verkürzt sich die Lebenszeit in Deutschland durch Ozon, Stickstoffdioxid und Feinstaub demnach im Durchschnitt um knapp sechseinhalb Monate, wenn sich die Luftqualität nicht verbessert (Morfeld und Erren, 2019). Die neueste Studie (Lelieveld et al., 2020) zeigt, dass weltweit durchschnittlich 2,9 Jahre Lebenserwartung aufgrund von (Außen-) Luftverschmutzung verloren gehen - eine höhere Zahl als durch Tabakrauchen (2,2 Jahre), HIV / Aids (0,7 Jahre), oder Krankheiten, die durch Parasiten und andere Vektoren übertragen werden (0,6 Jahre) (vgl. GBD, 2015).

Luftschadstoffe

In einer Expertise, im Namen der Internationalen Gesellschaft für Umweltepidemiologie (ISEE) und der Europäischen Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin (ERS), fassen Peters et al. (2019) bisherige Erkenntnisse zu Gesundheitsrisiken durch Luftschadstoffe zusammen. Als gesichert gilt, dass dadurch Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen ausgelöst werden und sich die Lebenserwartung verkürzt (WHO, 2013; Hoek et al., 2013; Boldo et al., 2006; Sweileh et al., 2018). Ebenso die krebserzeugende Wirkung von Feinstaub gilt inzwischen als gesichert (IARC, 2016). Auch wird inzwischen vermutet, dass es Auswirkungen auf die Entwicklung des Kindes im Mutterleib (Thurston et al., 2017; Kumar, 2016; Stieb et al., 2012; Sun et al., 2016), die Lungen- und Gehirnentwicklung bei Kindern (Schultz et al., 2017; Clifford et al., 2016), Diabetes (Eze et al., 2015; He et al., 2017), Demenz (Power et al., 2016) und Autismus (Volk et al., 2014) gibt. Neuere Studien dokumentieren außerdem Auswirkungen bereits auch unterhalb der gegenwärtig geltenden Grenzwerte (Beelen et al., 2014; Di et al., 2017; Corrigan et al., 2018). So könnten sich auch niedrige und mittlere Luftschadstoffkonzentrationen, wie sie in Bayern angetroffen werden, dauerhaft negativ auf die Gesundheit auswirken.

Hitze- und Kältestress

Neben Luftschadstoffen stellen auch Hitze- und Kältestress ein akutes Gesundheitsrisiko dar (Son et al., 2019; Seltenrich, 2015,). In zahlreichen Studien wurde die Erhöhung der Mortalität in Folge von Herzkreislauf-Problemen und Atemwegserkrankungen mit Hitzestress (Gosling et al., 2009; Bobb et al., 2014; Gasparrini et al., 2015) und Kältestress (Ryti et al., 2016; Berko et al. 2014) in Verbindung gebracht. Am gefährdetsten sind ältere Menschen oder chronisch Kranke (Åströma et al., 2011). Auch für Bayern konnte für den Zeitraum von 1990 bis 2006 ein Zusammenhang zwischen den rund 188.000 Todesfällen durch Herz-Kreislaufferkrankungen bzw. Herzinfarkten und Lufttemperaturänderungen gefunden werden (Breitner et al., 2014a, b; Schneider et al., 2009). Während der Hitzewelle des Sommers 2003 in Europa wurden zum Beispiel mehr als 70.000 zusätzliche Todesfälle registriert (Robine et al., 2008). Gerade für Herz-Kreislaufpatienten sind oft auch die Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht entscheidend: so verschaffen Tropennächte, in denen die Lufttemperatur nicht unter 20°C sinkt, keine Abkühlung für erholsamen Schlaf (Kovats und Hajat, 2008, Scherer und Endlicher, 2013).

Gesundheitsrelevant ist dabei aber nicht nur die Lufttemperatur: Eine Metastudie zeigt, dass die Lufttemperatur alleine oft nicht ausreicht, um Effekte auf die Gesundheit zu erklären (Seltenrich, 2015). Ausschlaggebend ist ihre Verbindung mit anderen Größen wie Luftfeuchtigkeit, Wind und Strahlung, welche die Thermoregulierung des Organismus und damit die Komfortbedingungen beeinflussen (Fiala et al., 2012).

Effekte des Klimawandels auf Umweltstressoren und Gesundheit

Der Klimawandel bewirkt eine Veränderung von Umweltstressoren. Der allgemeine Einfluss des Klimawandels auf die Gesundheit des Menschen ist dabei gut dokumentiert (WHO, 2019, 2018b, 2014; IPCC, 2014). Obwohl die globale Erwärmung einige regionale Vorteile bringen kann, dürften die gesundheitlichen Auswirkungen eines sich ändernden Klimas überwältigend negativ sein (WHO, 2018b, 2016). Dabei kann sich der Klimawandel direkt und indirekt auf die menschliche Gesundheit auswirken.

Zu den direkten gesundheitlichen Auswirkungen zählen physiologische Effekte der Exposition gegenüber höheren Temperaturen, die zunehmende Häufigkeit von nichtübertragbaren Krankheiten wie Atemwegserkrankungen und Herz-Kreislauf-Erkrankungen sowie Verletzungen und Todesfälle aufgrund extremer Wetterereignisse wie Dürren, Überschwemmungen, Hitzewellen, Stürme und Waldbrände (WHO, 2019). Wissenschaftler sind davon überzeugt, dass vor allem extreme Bedingungen durch den Klimawandel zunehmen werden (CCSP, 2008). So ist davon auszugehen, dass Hitzewellen bzw. extreme Hitzeereignisse durch den Klimawandel in Europa als Klimawirkungen erster Ordnung immer häufiger und intensiver werden (EUA, 2017).

Der Klimawandel hat indirekte Auswirkungen auf die Gesundheit aufgrund Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation, Wetterlagenhäufigkeit und –andauer, der UV-Strahlungsintensität speziell über Europa infolge sich verändernder Strömungsmuster sowie der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre. Neben ökologischen Veränderungen wie der Unsicherheit von Nahrungsmitteln, Wasser und der Ausbreitung von Infektionskrankheiten sind vor allem gesellschaftliche Reaktionen auf den Klimawandel wie ein

verändertes Freizeitverhalten mit z.B. mit längerer Exposition im Freien gesundheitsrelevant. Eine Zusammenfassung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Luftqualität geben Jacob und Winner (2009), sowie WHO (2018b). Austauscharme Wetterlagen mit hohen Temperaturen und Stagnation fördern Ozonbildung und Feinstaubbelastung, die während Hitzeepisoden zusätzlichen Stress für den Organismus bewirken. Die derzeit beobachtete Zunahme der Grenzschichthöhe wirkt jedoch einer vermehrten Feinstaubbelastung entgegen, ebenso wie zunehmender Niederschlag und höhere Windgeschwindigkeiten (Rohde, 2017; Zhang et al., 2013).

Der menschliche Organismus wird durch den Klimawandel vor neue Herausforderungen gestellt. Insbesondere gekoppelte direkte und indirekte Klimaeffekte wie Temperaturanstieg/Hitzewellen und eine daraus resultierende Zunahme der Ozon- und Feinstaubbelastung für den Menschen hat signifikante Auswirkungen auf das Gesundheitswesen durch erhöhte Morbidität und kann zur Überlastung von Rettungsdiensten, Krankenhäusern und Ärzten führen.

Hohe Kosten, viele Unklarheiten, mangelnde Information

Umweltbedingte Erkrankungen verursachen zunehmend hohe Kosten für das Gesundheitswesen und werden derzeit von der Europäischen Kommission auf 330 bis 940 Mrd. € pro Jahr geschätzt (KOM, 2013, 2018a, b). Auch der Wirtschaft entsteht hoher Schaden durch Produktivitätsverlust auf Grund schlechten Gesundheitsmanagements (Jackson 2011). Um die Kosten für das Gesundheitswesen zu senken und die Lebensqualität für Betroffene zu steigern, müssen zuerst die Risiken verstanden und dann Maßnahmen insbesondere der präventiven Medizin gestärkt werden. Die Erhöhung des Gesundheitsrisikos durch Umweltstressoren ist aber bisher räumlich und zeitlich nur unzureichend erfasst. Es werden überwiegend pauschale Aussagen zum Gesundheitsrisiko durch Umwelteinflüsse gemacht („Luftqualität heute schlecht“); einzelne Umweltparameter werden oft isoliert betrachtet („die Tiefsttemperatur beträgt -5°C “ oder „heute hohe Ozonwerte“). Wie zuvor schon erwähnt, reicht die Lufttemperatur alleine oft nicht aus, um Effekte auf die Gesundheit zu erklären. Bezüglich der Luftqualität wird gemäß der Informationspflicht der EU-Richtlinie lediglich kommuniziert: „Die Ozonkonzentration beträgt $180\mu\text{g}/\text{m}^3$ “. Konzentrationen oder Grenzwertüberschreitungen einzelner Luftschadstoffe haben für verschiedene Risikogruppen aber unterschiedliche Auswirkungen. Die Konzentrationen anderer wichtiger Schadstoffe wie NO_2 und Feinstaub werden nicht berücksichtigt. Es wird täglich auf unterschiedlichen Webseiten und Medien eine Vielzahl von Einzelgrößen oder Indizes publiziert, aber ohne aggregierte und spezifizierte Risikobewertung. Somit ergibt sich eine diffuse Informationslage, gerade für ältere Personen und Risikogruppen. Um den Einfluss von atmosphärischen Klima- und Umweltparametern und ihrer Extrema beurteilen und gezielt Maßnahmen planen zu können, gilt es ferner, die Wirkung auf die Gesundheit des Menschen möglichst diversifiziert nach Risikogruppen, bestehenden Vorerkrankungen und Altersklassen zu bestimmen.

Und der Bedarf an solcher Information wird durch den Klimawandel auch in Bayern wachsen. Informationen zum aktuellen integrierten und aggregierten Gesundheitsrisiko durch atmosphärische Klima- und Umweltparameter und seiner Entwicklung in den folgenden Tagen liegen nach unserem Wissen für Bayern nicht vor. Diese Lücke soll BioClis schließen.

3 Der Aggregierte Risiko Index (ARI)

Im Rahmen des EU-Forschungsprojekts PASODOBLE (Erbertseder et al., 2013a, 2013b) wurde festgestellt, dass es zwar Indizes zur Bewertung der Luftschadstoffsituation gibt, diese aber oft nur Grenzwertüberschreitungen einzelner Luftschadstoffe betrachten und weder die aggregierten Effekte von Luftschadstoffen berücksichtigen, noch bestimmte Risikogruppen oder Gesundheitsendpunkte adressieren, noch mit adäquaten Verhaltensempfehlungen verbunden sind und diese auch oft nur unklar kommuniziert werden. Der daraufhin entwickelte Aggregierte Risiko Index (ARI) erlaubt die Beurteilung der Zunahme des Gesundheitsrisikos durch die additive Wirkung verschiedener Luftschadstoffe bei kurzzeitiger Exposition für bestimmte Risikogruppen und Altersklassen. Dieses Bewertungsverfahren wurde gemeinsam mit Medizinerinnen und Pharmazeuten im o.g. PASODOBLE Projekt entwickelt (Sicard et al., 2011; 2012).

Relative Risiken als methodische Basis

Der ARI basiert auf einer Kombination von Exposition-Wirkungsfunktionen, die in epidemiologischen Studien erhoben worden sind. Der ARI nutzt dabei das relative Risiko (RR), als relative Zunahme des Risikos einer Erkrankung durch die Exposition gegenüber Luftschadstoffen im Vergleich zu unbelasteter Atemluft (Gleichung 3.1):

$$RR = \frac{\text{Wahrscheinlichkeit von Erkrankung bei Exposition}}{\text{Wahrscheinlichkeit von Erkrankung ohne Exposition}} \quad (3.1)$$

Oder anders ausgedrückt, wobei P die Wahrscheinlichkeit und i einen Risikofaktor, wie z.B. einen Luftschadstoff, bezeichnen:

$$RR_i = \frac{P_i(\text{Erkrankung} \mid \text{mit Risikofaktor } i)}{P(\text{Erkrankung} \mid \text{ohne Risikofaktor } i)} \quad (3.2)$$

Daraus wird ersichtlich, dass $RR > 1$ negative Auswirkungen auf die Gesundheit hat und $RR < 1$ positive Effekte. Während durch die Exposition gegenüber Luftschadstoffen negative Effekte auf die Gesundheit resultieren, senken zum Beispiel Impfungen das relative Risiko für bestimmte Erkrankungen und gelten als positives Beispiel ($RR < 1$) (Gleichung 3.1).

Zur weiteren Verdeutlichung soll ein Beispiel näher ausgeführt werden (siehe Tabelle 1): Das relative Risiko (RR) für eine Krankenhauseinlieferung durch eine Herz-Kreislauf-Erkrankung für einen Erwachsenen älter als 65 Jahre beträgt, bei einer Exposition von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{2.5} über 24 Stunden hinweg, 1,018; das Risiko steigt bei dieser Luftschadstoffkonzentration also um 1,8%. Höhere Konzentrationen führen zu entsprechend höheren Gesundheitsrisiken. Liegt die Exposition bei $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, so erhöht sich das Risiko um 18%, wenn ein linearer Ansatz der Risikoerhöhung angenommen wird (der sicherlich nur eine erste Näherung darstellt).

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen Exposition gegenüber Feinstaub, relativem Risiko und Risikoerhöhung für Personen älter oder gleich 65 Jahre in Bezug auf eine Krankenhauseinlieferung durch eine Herz-Kreislauf-Erkrankung (InVS (Institut de Veille Sanitaire (2002, 2006, 2008), Sicard et al., 2012)

Gesundheitsendpunkt Krankenhauseinlieferung Herz Kreislauf Erkrankung, Alter 65≤		
Exposition PM _{2.5} (24 Stunden)	Relatives Risiko	Risikoerhöhung
10µg/m ³	1.018	1.8%
100µg/m ³	1.18	18.0%



Die relativen Risiken definieren das durchschnittliche relative Risiko für eine Erkrankung pro Zunahme des Luftschadstoffs von 10µg/m³ für einen Zeitversatz von 0-48 Stunden. Sie geben an, mit welcher Gewichtung die Konzentrationen der einzelnen Luftschadstoffe in den ARI eingehen. Für das Gesamtrisiko müssen die Risiken aller im ARI berücksichtigten Luftschadstoffe, die durch ihre aktuellen Konzentrationen definiert sind, addiert werden.

Definition und Methodik

Gleichung (3.3) beschreibt nun die Berechnung des ARI. Diese erfolgt über die Summe der einzelnen Produkte der jeweiligen Luftschadstoffkonzentrationen C_i mit den zugehörigen Risikogewichten a_i , die sich über Gleichung (3.4) berechnen lassen, wobei i für die Anzahl der berücksichtigten Luftschadstoffe steht. Über die a_i -Werte wird die Skalierung der aggregierten relativen Risiken auf einen Wertebereich von 0 bis 10 gesteuert. Die „4“ im Zähler und die „1,160“ im Nenner geben an, dass der Indexwert von 4 der Risikoerhöhung von 16% zugeordnet wird (Sicard et al., 2011; Sicard et al., 2012).

$$ARI = \sum_i (RR_i - 1), \quad RR_i \sim a_i * C_i \quad (3.3)$$

$$a_i = \frac{4 * (RR_i - 1)}{10 * (1,160 - 1)} \quad (3.4)$$

Abbildung 3 verdeutlicht die Berechnung des ARI in einer schematischen Übersicht. Im oberen Teil, wird das Einzelrisiko gegenüber PM_{2.5} (wie im vorangegangenen Beispiel erklärt, siehe Tabelle 1) aus der aktuellen Konzentration und dem relativen Risiko definiert und pro 10µg/m³ quantifiziert. Für das aggregierte Risiko werden dann Luftschadstoffkonzentrationen von NO₂, O₃, PM_{2.5}, PM₁₀ und SO₂ mit ihren spezifischen relativen Risiken berücksichtigt, um dann in einer Linearkombination zum Gesamtrisiko zusammengefasst zu werden (Cairncross et al., 2007). Durch eine weitere Formulierung können die relativen Risiken jeweils so skaliert werden, dass der ARI einen Index mit Wertebereich 0-10 ergibt. Dies ist entscheidend für die vereinfachte Kommunikation der Gesundheitsrisiken an die Öffentlichkeit, analog zum UV-Index.

Aggregierter Risiko Index (ARI)

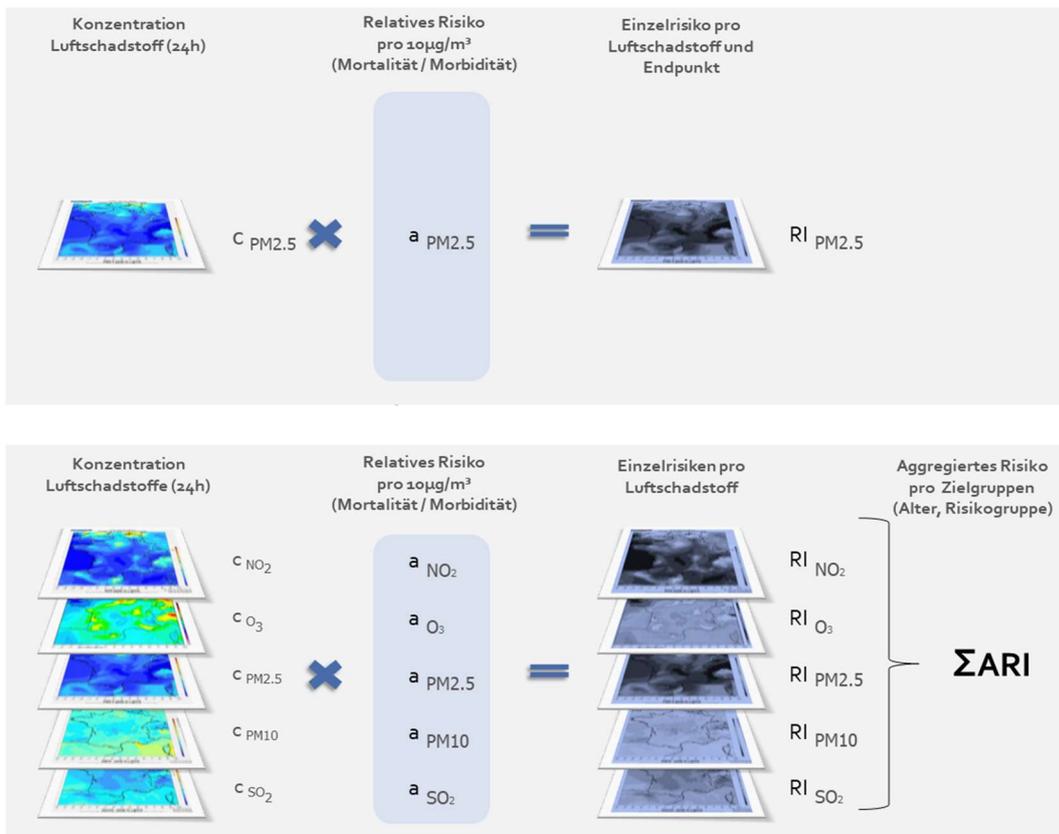


Abbildung 3: Schematische Übersicht zur Berechnung des ARI. Im oberen Teil, wird das Einzelrisiko gegenüber PM_{2.5} (wie in den vorangegangenen Beispielen erklärt), aus der aktuellen Konzentration und dem relativen Risiko bestimmt. Für das aggregierte Risiko werden dann fünf Luftschadstoffkonzentrationen mit ihren spezifischen relativen Risiken berücksichtigt, um dann in einer Linearkombination zum Gesamtrisiko zusammengefasst zu werden. Durch eine weitere Formulierung werden die relativen Risiken jeweils so skaliert, dass der ARI einen Index mit Wertebereich 0-10 ergibt.

Bestimmung des ARI für verschiedene Gesundheitsendpunkte

Bei der Berechnung des ARI muss betont werden, dass zwischen verschiedenen Gesundheitsendpunkten unterschieden wird. Dies ist eine weitere Stärke des Ansatzes. Es gibt also nicht einen ARI für alle Endpunkte. Die Daten der relativen Risiken sind vom „Institut de veille sanitaire (InVS)“ über epidemiologische Studien bestimmt worden (InVS 2002; 2006; 2008), können aber durch andere regionalisierte Ansätze ersetzt werden. Die relativen Risiken sind für verschiedene Gesundheitsendpunkte, Altersklassen (0-14 Jahre, 15-64 Jahre und 65≤ Jahre) und spezifische Vorerkrankungen verfügbar.

Tabelle 2 zeigt die RR- und a-Werte beispielhaft für PM_{2.5}. Die Werte beziehen sich auf eine Konzentration von $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ bei einer Exposition über 24 Stunden (siehe auch Erläuterung in Tabelle 1).

Tabelle 2: Relative Risiken RR_{PM_{2.5}} verursacht durch PM_{2.5} für verschiedene Gesundheitsendpunkte bezogen auf eine Konzentration von 10µg/m³. Die Risikoerhöhungen sind unterteilt in Mortalitätsrisiko (mortality) und tägliche Krankenhauseinlieferungen (daily hospital admissions). Die Werteangaben in Klammern geben die Toleranzbereiche der RR-Werte an, die sich aus den Studien des InVS ergeben haben.

HEALTH ENDPOINTS	PM _{2.5} (24 h average)		
	RR		$\alpha_{PM_{2.5}}$
<i>Mortality</i>			
All causes	1.015	[1.007, 1.022]	0.037
Cardiovascular	1.028	[1.009, 1.047]	0.070
Respiratory	1.009	[1.003, 1.020]	0.022
<i>Daily hospital admissions</i>			
Respiratory 0–14 years	1.006	[0.991, 1.022]	0.015
Respiratory 15–64 years	1.011	[0.996, 1.026]	0.027
Respiratory > 65 years	1.006	[0.983, 1.029]	0.015
Cardiovascular	1.007	[0.999, 1.015]	0.017
Cardiovascular > 65 years	1.018	[1.008, 1.028]	0.045
Ischemic heart	1.023	[0.999, 1.047]	0.057
Ischemic heart > 65 years	1.044	[1.022, 1.067]	0.110
Cardiac diseases	1.014	[1.004, 1.024]	0.035
Cardiac diseases > 65 years	1.023	[1.010, 1.037]	0.057
Cerebrovascular diseases	1.005	[0.987, 1.023]	0.012
Cerebrovascular diseases > 65 years	1.008	[0.988, 1.029]	0.020

Zur Quantifizierung der kurzzeitigen Exposition (0-48 Stunden) werden folgende regulierte Luftschadstoffe im ARI erfasst: PM_{2.5} (24-Stunden-Mittel), PM₁₀ (24-Stunden-Mittel), O₃ (8-Stunden-Maximum, NO₂ (24-Stunden-Mittel) und SO₂ (24-Stunden-Mittel). Dies kann durch aktuelle Forschungsergebnisse begründet werden. Laut Peters et al., (2019), führt Stickstoffdioxid zur Verschlechterung der Gesundheit bei Asthmatikern und wird als kausal eingestuft (Brown, 2015; U.S. EPA, 2016). Als „wahrscheinlich kausal“ wurde das Auftreten von Atemwegserkrankungen eingestuft (U.S. EPA, 2016). Neuere Studien weisen auf einen Zusammenhang für Herz-Kreislaufkrankungen hin (Turner et al., 2016; Cesaroni et al., 2013; Brunekreef et al., 2009). Ozon führt kurzfristig aufgrund von Atemwegserkrankungen zu mehr Notfallkonsultationen und Krankenhauseintritten, was als kausal bewertet wurde (U.S. EPA, 2013). Gesichert gilt, dass durch Feinstaub Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen ausgelöst werden und sich die Lebenserwartung verkürzt (WHO, 2013; Hoek et al., 2013; Boldo et al., 2006). Die Auswirkungen umfassen kurzfristige Gesundheitseinschränkungen und Krankenhauseinweisungen. Diese können akut bei hohen Feinstaubbelastungen oder als Konsequenz von Langzeitbelastungen auftreten (WHO, 2013). Die Evidenz für Herz-Kreislaufkrankungen ist inzwischen als kausal, die von Atemwegserkrankungen als „wahrscheinlich kausal“ anerkannt (U.S. EPA, 2009). Kurzfristige Exposition gegenüber SO₂ kann die menschlichen Atemwege schädigen und das Atmen erschweren. Menschen mit Asthma, insbesondere Kinder, reagieren empfindlich auf diese Auswirkungen von SO₂. (U.S. EPA, 2019).

Eine Erweiterung des ARI, mit zusätzlichen Luftschadstoffen ist prinzipiell möglich, sobald aussagekräftige relative Risiken dafür durch epidemiologische Studien gewonnen worden sind.

Kommunikation der aggregierten Risikoerhöhung als Index

Wie oben bereits angeführt, wird der ARI üblicherweise auf einer Skala von 0 bis 10 angegeben (wobei prinzipiell die Indexwerte beliebig skaliert werden könnten) (Sicard et al., 2012):

- Indexwerte von 0-3: geringe Zunahme des Gesundheitsrisikos von 0 - 15.9% (RR=1.000-1.159)
- Indexwerte von 4-6: moderate Zunahme des Gesundheitsrisikos von 16 - 27.9% (RR=1.160-1.279)
- Indexwerte von 7-9: starke Zunahme des Gesundheitsrisikos von 28 - 39.9% (RR=1.128-1.399)
- Indexwerte von 10: sehr starke Zunahme des Gesundheitsrisikos mehr als 40% (RR>1.400)

Während zur öffentlichen Kommunikation der ARI als Index angegeben wird, sollen für die fachliche Diskussion der Ergebnisse auch die aggregierte Zunahme des Gesundheitsrisikos (Risikoerhöhung) verwendet werden. Es soll auch explizit darauf hingewiesen werden, dass die Risiken zur Mortalität, als wissenschaftliche Basis des Ansatzes, nur fachlich intern oder an Experten aus dem Gesundheitswesen kommuniziert werden, nicht an die allgemeine Bevölkerung.

Tabelle 3: Risikobewertung und Einteilung des ARI berechnet nach Sicard et al. (2012)

Index	Risikobewertung	Risikoerhöhung
0 - 3	niedrig	0 - 15,9%
4 - 6	mittel	16 - 27,9%
7 - 9	hoch	28 - 39,9%
10	sehr hoch	> 40%

Anders als bisher, beruht die Beurteilung des Gesundheitsrisikos nicht mehr nur auf der Betrachtung einzelner Luftschadstoffe und ihrer Grenzwerte. Stattdessen erhalten wir einen Risikowert, der die Einzelrisiken mehrerer Luftschadstoffe berücksichtigt und zwischen spezifischen Vorerkrankungen und Altersklassen differenziert. Dies erleichtert die umweltmedizinische Interpretierbarkeit für die allgemeine Bevölkerung und adressierte Risikogruppen.

4 Der Universelle Thermale Klimaindex (UTCI)

Ein rascher Anstieg des Wärmegewinns aufgrund überdurchschnittlich heißer Bedingungen beeinträchtigt die Fähigkeit des Körpers, die Temperatur zu regulieren, und kann zu einer Kaskade von Effekten führen, einschließlich Hitzekrämpfen, Hitzeerschöpfung, Hitzschlag und Hyperthermie (Knockel, 2015; Garcia-Trabanino et al., 2015; Bouchama et al., 2002). Todesfälle und Krankenhausaufenthalte aufgrund von Hitze können extrem schnell (am selben Tag) oder verzögert (einige Tage später) auftreten und zu beschleunigter Mortalität oder einer Krankheit bei bereits Geschwächten führen, insbesondere in den ersten Tagen der Hitzewellen (Harvesting-Effekt). Selbst kleine Unterschiede zu den saisonalen Durchschnittstemperaturen sind mit einer erhöhten Morbidität und Mortalität verbunden. Temperaturextreme können auch chronische Erkrankungen wie Herz-Kreislauf-, Atemwegs- und zerebrovaskuläre Erkrankungen, sowie diabetesbedingte Erkrankungen verschlimmern (Exazerbation) (Hayes et al., 2012; Uejio et al., 2015; Schneider et al., 2008). Wärme hat auch wichtige indirekte gesundheitliche Auswirkungen. Wärmebedingungen können das menschliche Verhalten, die Übertragung von Krankheiten, die Erbringung von Gesundheitsdiensten und kritische Infrastrukturen wie Energie und Transport, verändern.

Bei kaltem Wetter kann der Körper Wärme schneller verlieren als sie produziert wird, was gespeicherte Energie verbraucht und zu Unterkühlung führen kann. Definiert ist dies als Kerntemperatur unter 35°C. Niedrige Temperaturen führen dazu, dass sich Venen und Arterien verengen und das Blut viskoser wird, was die Herzarbeitsbelastung erhöht und zu vielen der gleichen kardiovaskulären Belastungen wie Hitze führt (Zhang et al., 2014). Zusätzlich zur Belastung des Herzens und anderer Organe können eine beeinträchtigte Durchblutung und eine verminderte Stoffwechselaktivität aufgrund niedriger Temperaturen das Gehirn beeinträchtigen und die betroffene Person unfähig machen, klar zu denken oder sich gut zu bewegen (CDC, 2019). Hypothermie tritt bei extrem niedrigen Temperaturen auf, ist aber auch weit über dem Gefrierpunkt möglich, wenn eine Person gekühlt wird durch Regen oder Schweiß (Backer et al., 2019).

Eine Analyse der temperaturbedingten Todesfälle in den USA zwischen 2006 und 2010 ergab, dass 63% auf Kälteexposition zurückzuführen waren, während es nur 31% bei Hitzeeinwirkung waren (Berko et al., 2014). Eine globale Untersuchung von 74 Millionen Todesfällen ergab, dass niedrige Temperaturen mit 7,3% aller Todesfälle verbunden sind, gegenüber nur 0,4% bei hohen Temperaturen (Gasparrini et al., 2015).

Die Lufttemperatur in einem bioklimatischen Informationssystem isoliert zu betrachten, würde jedoch nicht ausreichen. Der Effekt der Luftfeuchte auf den thermischen Komfort ist am besten mit einem Aufguss in der Sauna vergleichbar: bei gleichbleibender Temperatur führt die erhöhte Luftfeuchtigkeit zu einer starken Aktivierung des Herz- Kreislaufsystems bis hin zum Diskomfort. Auch kalte Temperaturen fühlen sich unter Wind unangenehmer an (Windchill-Effekt) und führen rascher zur Auskühlung.

Definition und Methodik

Der Universelle Thermale Klimaindex (UTCI) dient der quantitativen Beschreibung von meteorologischen Einflüssen auf den menschlichen Körper (Jendritzky et al., 2007, 2008, 2012). Er ermöglicht eine Bewertung der thermischen Bedingungen im Freien, die auf der mit

einem Modell der Thermoregulation des Menschen berechneten dynamischen physiologischen Reaktion des Organismus basiert. Der Bewertungsindex wurde mithilfe einer Kommission der Internationalen Gesellschaft für Biometeorologie (ISB), basierend auf über 100 vorangegangenen Ansätzen, entwickelt. Es wird versucht, alle für den menschlichen Körper relevanten Größen wie Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit mit einem physiologischen Modell zu kombinieren, um den Bereich von extremem Kältestress bis zu extremem Hitzestress zu erfassen.

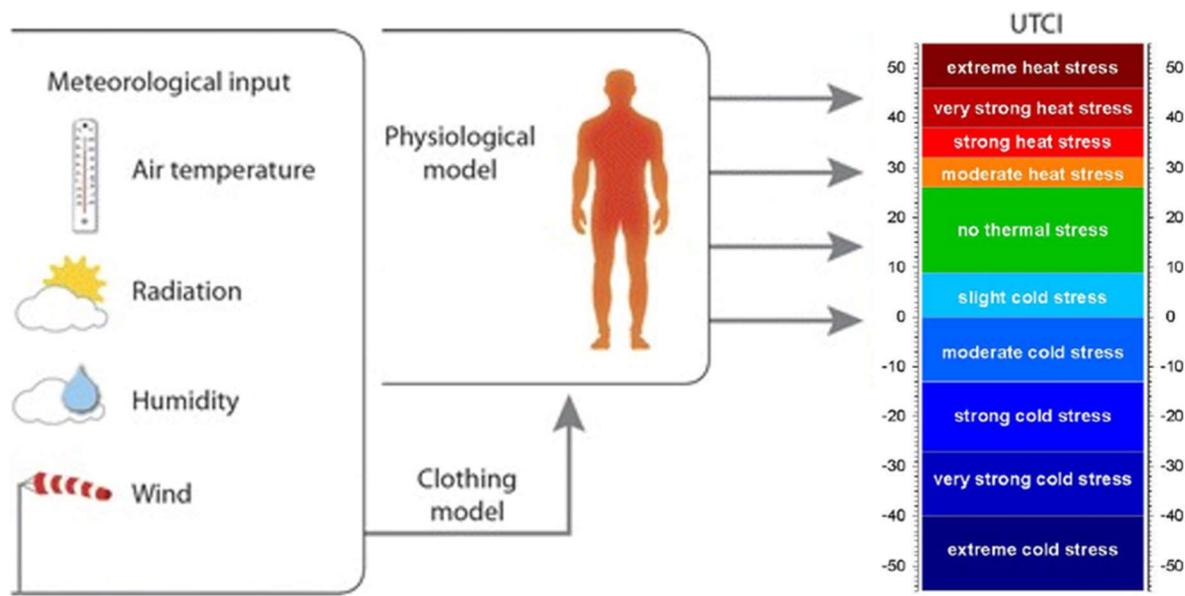


Abbildung 4: Schematische Darstellung des mathematischen Hintergrunds des UTCI. Die meteorologischen Einflüsse gehen in ein physiologisches Modell ein, das die Reizantwort des Körpers beschreibt. Zudem wird ein Bekleidungsmodell integriert, das die temperaturabhängige Bekleidung der Person berücksichtigt (Jendritzky et al., 2007).

Der UTCI basiert dabei auf dem Konzept der äquivalenten Temperatur. Für aktuelle Bedingungen ist der UTCI definiert als die Lufttemperatur unter Referenzbedingungen, bei der die gleiche thermische Belastung eintritt. Für jede Kombination von Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit kann der UTCI somit als diejenige Temperatur angegeben werden, bei der unter Referenzbedingungen die gleiche dynamische Reizantwort des Organismus bzw. die gleiche physiologische Belastung gegenüber den aktuell betrachteten Bedingungen vorkommt. Die Referenzbedingungen wurden mit einer relativen Feuchte von $RH = 50\%$, Windstille und mittlerer Strahlungstemperatur gleich Lufttemperatur festgelegt. Dabei wird angenommen, dass sich der Mensch mit 4 km/h bewegt (Jendritzky et al. 2007).

Das physiologische Modell folgt dem Ansatz von Fiala et al. (1999, 2001, 2007), der ausgiebig validiert worden ist (Psikuta et al., 2007 und 2008). Da Menschen ihre Bekleidung von der Temperatur abhängig machen (Winter- und Sommerkleidung), wurde außerdem ein Bekleidungsmodell entwickelt und in das Fiala-Modell integriert. Zur Thermoregulation zählen dabei Reaktionen des Körpers auf thermischen Stress, um diesen zu verringern. Dazu zählen v.a. die Verengung oder Ausdehnung der Blutgefäße zur Regulierung der Hautdurchblutung, Zittern zur Regulierung der Muskeldurchblutung und Schwitzen. Die dynamischen physiologischen Reaktionen des Organismus, wie Kerntemperatur, Schweißrate und Hautfeuchte, werden multidimensional erfasst.

Da sich die Berechnung des aktuellen UTCI durch wiederholtes Anwenden des aufwendigen Thermoregularisierungsmodells von Fiala et al. (2007) als zu rechenzeitaufwendig erweist, wurden verschiedene Methoden zur Beschleunigung der Berechnung entwickelt. Als eindimensionale Darstellung der Modell-Antworten wurde deshalb der UTCI als Belastungsindex über eine Hauptkomponenten-Analyse berechnet (Bröde et al. 2009). In BioClis kommen Gleichungen zum Einsatz, die durch einen Polynomfit 5. Grades bestimmt wurden, und die operationelle Bestimmung des UTCI mit hinreichender Genauigkeit ermöglicht. Der thermische Stress kann damit über eine 10-stufige Skala von „extremem Hitzestress“ bis zu „extremem Kältestress“ bewertet werden. Im Bereich von 9°C bis 26°C gefühlter Temperatur ist der Körper keinem thermischen Stress ausgesetzt (siehe Abbildung 4). Je weiter der UTCI von diesem Temperaturbereich abweicht, desto größer wird der thermische Stress und damit die physische Belastung für den Menschen.

Der UTCI basiert also auf wissenschaftlichen Erkenntnissen der Humanbiometeorologie und ist dadurch prädestiniert für die Beurteilung thermaler Belastung, die Anwendung im Gesundheitssystem, die Planung präventiver Maßnahmen und dient der Erforschung der Wirkungen des Klimawandels auf den Gesundheitssektor.

Mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt}

Während die zur Berechnung des UTCI benötigten Parameter Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte durch Messungen oder Wettermodelle relativ einfach zur Verfügung stehen, so ist die Ableitung der mittleren Strahlungstemperatur komplexerer Natur.

Die mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} ist über die Schwarzkörperstrahlung definiert. Ein Schwarzkörper ist eine idealisierte thermische Strahlungsquelle, die jegliche eintreffende elektromagnetische Strahlung vollständig absorbiert sowie diese Energie auch vollständig in Form von thermischer Strahlung wieder abgibt, also einen Emissionskoeffizienten von $\varepsilon=1$ besitzt. Es kann also einer beliebigen Strahlungsflussdichte S_{str} eine Temperatur zugeordnet werden, was durch das Stefan Boltzmann-Gesetz beschrieben wird:

$$S_{str} = T_{mrt}^4 * \varepsilon_p * \sigma \Leftrightarrow T_{mrt} = \sqrt[4]{\frac{S_{str}}{\varepsilon_p * \sigma}}, \quad (4.1)$$

wobei ε_p dem Emissionskoeffizienten der Haut entspricht und σ der Stefan-Boltzmann-Konstante.

T_{mrt} ist als die Temperatur definiert, die bei derselben Strahlungsflussdichte in einem Schwarzkörper als fiktiver Referenzumgebung vorliegen würde (siehe Abbildung 5).

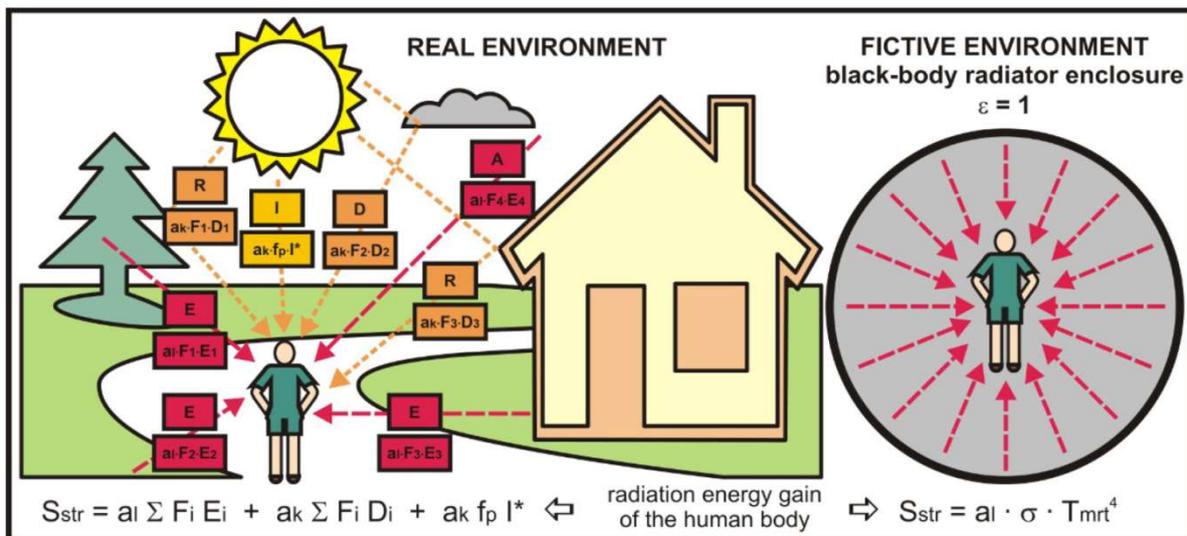


Abbildung 5: Beiträge zur mittleren Strahlungstemperatur und ihre Definition

Die mittlere Strahlungstemperatur setzt sich aus der langwelligeren und kurzwelligeren Strahlung zusammen, die auf den Körper trifft. Trotz gleicher Lufttemperatur ist es in der Sonne deutlich wärmer als im Schatten, was entsprechend hohen Einfluss auf den thermischen Stress hat. Zur kurzwelligeren Strahlung zählen die direkte Sonneneinstrahlung I , die diffuse Strahlung D , die aus der Streuung der Solarstrahlung an der Atmosphäre resultiert, und die an der Umgebung reflektierte direkte und diffuse Strahlung R . Die kurzwellige Strahlung wärmt die Erde E und die Atmosphäre A auf, die ihrerseits dann langwellige Strahlung emittiert.

Der langwellige Strahlungsfluss L auf den Menschen wird wie folgt berechnet:

$$L = a_l \cdot \sum_i F_i \cdot E_i \approx a_l \cdot F \cdot (LW_{up} + LW_{down}). \quad (4.2)$$

E_i entspricht hierbei den langwelligeren Strahlungsflüssen der Umgebung, die gewichtet werden mit dem Winkelfaktor bzw. Raumwinkel F_i der abstrahlenden Fläche i . Da es sich als sehr schwierig erweist, besonders in städtischer Umgebung, an jedem Punkt die einzelnen Winkelfaktoren zu bestimmen, wird als Näherung der Wert $F \approx 0,5$ angenommen. Der Absorptionskoeffizient der Haut für langwellige Strahlung a_l spielt natürlich auch eine wichtige Rolle, da der Körper nur auf das reagieren kann, was an ihm nicht reflektiert wird. Der Standardwert beträgt $a_l \approx 0,97$. Langwellige Strahlung, die von der Atmosphäre auf den Menschen trifft, wird hier als absteigende (downwelling) Strahlung (LW_{down}) bezeichnet, und die von der Umgebung emittierte Strahlung als aufsteigende (upwelling) Strahlung (LW_{up}). Um den langwelligeren Strahlungsfluss zu berechnen, werden also die Strahlungsflussdichten (in W/m^2) beider Größen benötigt.

Die Berechnung der kurzwelligeren Anteile ist etwas aufwendiger. Die solare Strahlung fällt unter diese Kategorie. Sie kann unterteilt werden in einen direkten SW_{dir} und diffusen Anteil SW_{diff} . Der direkte Anteil entspricht der Strahlung SW_{dir} , welche nicht von der Atmosphäre gestreut wurde und direkt auf die Erdoberfläche trifft:

$$I = a_k * f_p * SW_{dir} \quad (4.3)$$

Dabei ist I der vom Menschen absorbierte Strahlungsfluss von SW_{dir} . Analog zur langwelligen Strahlung wird hier der Absorptionskoeffizient der Haut für kurzwellige Strahlung a_k benötigt. Der Standardwert beträgt in dem Fall $a_k \approx 0,7$.

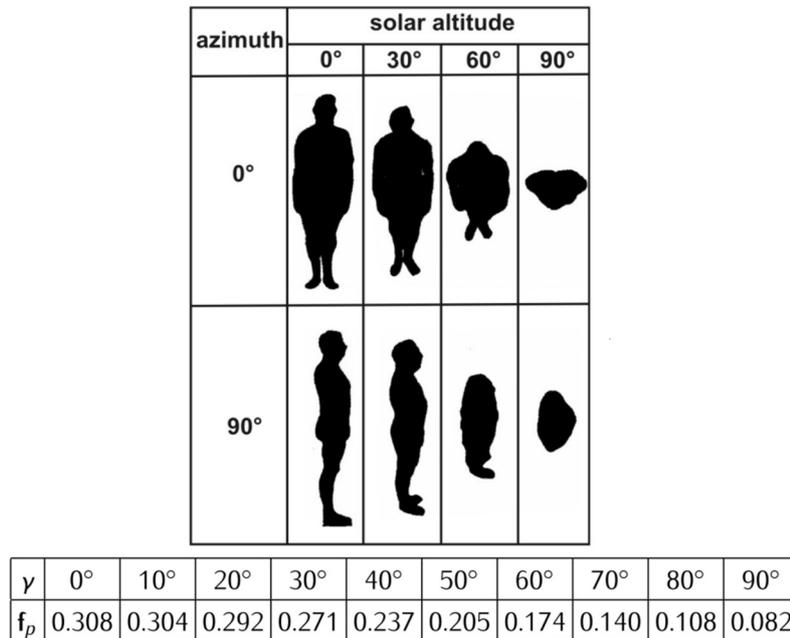


Abbildung 6: Azimut und Stand der Sonne und die damit verbundene Änderung der bestrahlten Fläche eines Menschen

Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, hängt die effektive bestrahlte Fläche des Körpers vom Azimutwinkel der Sonne sowie ihrem Stand γ ab. Je höher die Sonne steht, desto kleiner wird die bestrahlte Fläche. Dies geht in den Oberflächenprojektionsfaktor f_p ein, der mit steigendem Sonnenstand immer kleiner wird und somit SW_{dir} schwächer gewichtet.

Strahlung, die in der Atmosphäre (in erster Linie an Wolken) gestreut wurde, wird als diffuse Strahlung SW_{diff} bezeichnet. Jedoch fällt unter diffuse Strahlung auch die reflektierte direkte Strahlung R, sodass für die gesamte diffuse Strahlung D gilt:

$$D = a_k * \sum_i F_i * D_i \approx a_k * F * SW_{diff} + R \quad (4.4)$$

Da sich D aus an der Umgebung reflektierter Strahlung sowie aus an der Atmosphäre gestreuter Strahlung zusammensetzt, erfolgt die Berechnung ähnlich wie bei der langwelligen Strahlungsflussdichte L. Es werden die Strahlungsanteile über die einzelnen Flächen i (Boden, Atmosphäre, Hauswände, etc.) summiert, wobei der Winkelfaktor F_i wieder mit $F \approx 0,5$ genähert wird. In den reflektierten Anteil spielt zudem die Albedo mit hinein:

$$R = a_k * \sum_i F_i * A_i * R_i \approx a_k * F * A * (SW_{diff} + SW_{dir}) \quad (4.5)$$

Den reflektierten Anteil von SW_{dir} und SW_{diff} erhält man durch Multiplikation mit der Albedo A . Falls nur die gesamte solare Strahlung $SW = SW_{dir} + SW_{diff}$ gegeben ist, kann über eine Näherung der Zusammenhang zwischen der gesamten und der diffusen Solarstrahlung über den Wolkenbedeckungsgrad C_{frac} hergestellt werden:

$$SW_{diff} = SW * (0,12 + 0,83 * C_{frac}) \quad (4.6)$$

$$SW_{dir} = SW - SW_{diff} \quad (4.7)$$

Mit den Gleichungen (4.6) und (4.7) ergibt sich folgendes Gleichungssystem:

$$I = a_k * f_p * (SW - SW * (0,12 + 0,83 * C_{frac})) \quad (4.8)$$

$$R = a_k * F * A * SW \quad (4.9)$$

$$D = a_k * F * SW * ((0,12 + 0,83 * C_{frac}) + A) \quad (4.10)$$

Zusammen mit Gleichung (4.2) kann nun die gesamte vom Menschen aufgenommene Strahlungsflussdichte S_{str} berechnet und damit auch die mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} nach Gleichung (4.1) bestimmt werden:

$$S_{str} = L + I + D \Leftrightarrow T_{mrt} = \sqrt[4]{\frac{L+I+D}{\varepsilon_p * \sigma}}, \quad (4.11)$$

wobei der Emissionskoeffizient der Haut ε_p gleich dem Absorptionskoeffizienten für langwellige Strahlung a_l entspricht, also $\varepsilon_p = a_l = 0,97$. Die Stefan-Boltzmann-Konstante σ ist durch $\sigma = 5,67037 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ gegeben.

5 Datenprozessor und Simulationsinfrastruktur (AlpEnDAC)

Zur Realisierung von BioClis wurde die IT-Infrastruktur des AlpEnDAC (Alpine Environmental Data Analysis Center) genutzt und für den spezifischen Projektbedarf weiterentwickelt. Beim AlpEnDAC handelt es sich um die informationstechnische Plattform des Virtuellen Alpenobservatoriums (VAO, Virtual Alpine Observatory). Sie ist ein Service der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) und stellt eine Entwicklung der Universität Augsburg (Projektleitung), des DLR, des LRZ, der UFS GmbH und der bifa GmbH dar. In das bestehende AlpEnDAC wurden sowohl ein modularer Umweltdatenprozessor implementiert als auch die Simulationsinfrastruktur für numerische Modelle, die in BioClis zum Einsatz kommen, weiterentwickelt. Alle Schnittstellen zum Austausch der benötigten Daten von heterogenen Quellen wurden flexibel integriert. Durch eine effiziente Implementierung werden diese Schnittstellen zukünftig auch ein verzögerungsfreies Anstoßen weiterer Datenverarbeitungsschritte, sowie die Einbindung von Ergebnissen und Daten aus anderen Forschungsprojekten des VKG erlauben.

Arbeiten an Daten- und Simulationsinfrastruktur (AlpEnDAC)

Die von BioClis zu nutzende Infrastruktur AlpEnDAC wurde in den ersten Monaten des Projekts in enger Abstimmung mit dem AlpEnDAC-Projekt (gefördert vom BayStMUV) ausgebaut, um eine optimale und effiziente IT-technische Unterstützung des Projekts sicherzustellen.

Das Datenmanagement im AlpEnDAC wurde erweitert, um den kontinuierlichen Datenfluss wie umfangreiche Wetterdaten und Luftqualitätsdaten effizient und robust zu ermöglichen. Über Event-Behandlungsroutinen im AlpEnDAC-iRODS-Datenmanagementsystem wurde auch erstmals eine automatische Reaktion auf einlaufende Daten zur „Triggerung“ von Analysen realisiert.

Simulationsseitig wurde das WRF-Wettermodell (engl. Bezeichnung: Weather Research and Forecasting Model) (Skamarock et al., 2008; NCAR, 2019), das in BioClis als Wetterprognosemodell und Treibermodell für das Luftqualitätsmodellsystem POLYPHEMUS/DLR (Mallet et al., 2007) eingesetzt wird, auf den neuen LRZ-Hochleistungssystemen CoolMUC-3 und IvyMUC als festes Modul installiert. Zudem erfolgten auf CoolMUC-2 und Super-MUC ein entsprechendes Update. Für Simulationen mit mittlerem bis hohem Rechenaufwand wurde ein leichtgewichtiges Framework implementiert, um diese im Rahmen der AlpEnDAC-Infrastruktur zu containerisieren (d.h. unter der Virtualisierungsschicht Docker laufen zu lassen). Dieses ermöglicht es, das in BioClis eingesetzte Luftqualitätsmodellsystem POLYPHEMUS/DLR auf DLR- und LRZ-Hardware mit minimalem Portierungsaufwand flexibel auszuführen. Beide Modellsysteme können somit für das Bioklimatische Informationssystem Bayern sowohl im operationellen Computing als auch im Computing-on-Demand eingesetzt werden.

Datensätze Luftschadstoffe

Für die Berechnung des ARI (vgl. Kapitel 3, Seite 11) werden Konzentrationen der Luftschadstoffe NO₂, O₃, SO₂, PM_{2.5} und PM₁₀ in möglichst hoher raum-zeitlicher Auflösung für Bayern benötigt. Diese Daten werden primär durch das Luftqualitätsmodellsystem POLYPHEMUS/DLR, und zum anderen (als Back-up in schlechterer räumlicher Auflösung) über den Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS, Copernicus Dienst zur Atmosphärenüberwachung) täglich operationell akquiriert (Abbildung 7).

Datensätze Luftschadstoffe

Es werden folgende Luftschadstoffe berücksichtigt:

PM_{2.5} (24-Stunden-Mittel),
PM₁₀ (24-Stunden-Mittel),
O₃ (8-Stunden-Maximum, 24h Mittel),
NO₂ (24-Stunden-Mittel) und
SO₂ (24-Stunden-Mittel)

- **Polyphemus/DLR, Domäne Bayern**
- 3D-Chemietransportmodell, angetrieben durch Wettermodell WRF
 - Auflösung 0,063 – 0,125° (~7km → 2km)
 - Stündliche Daten
 - Vorhersage +3 Tage

- **CAMS, europaweit**
Copernicus Atmosphere Monitoring Service
- Ensemble aus 7 Chemietransport-modellen, Assimilation über satellitenbasierte und in-situ-Daten
 - Auflösung 0,1° (10km)
 - Stündliche Daten
 - Vorhersage +4 Tage
- **Polyphemus/DLR, Domäne Europa**
- Auflösung 0,2 – 0,3° (35km)
- => Europadomänen als Backup

Abbildung 7: Überblick zu den in BioClis verwendeten Luftschadstoffdaten. Dabei wird die Bayerndomäne von POLYPHEMUS/DLR (linke Box) genutzt. Die Europadomänen in der rechten Box dienen als Backup.

Das Luftqualitätsmodellsystem POLYPHEMUS/DLR wird am DLR und in Kooperation mit der Universität Augsburg kontinuierlich weiterentwickelt und ermöglicht in seiner jetzigen Konfiguration Vorhersagen von bis zu 72 Stunden (Khorsandi et al., 2018). Dieses operationelle System repräsentiert mit einer räumlichen Auflösung von 2 km nach unserem Wissen am besten die flächendeckende Luftschadstoffvariabilität in Bayern und eignet sich daher für die Berechnung des Gesundheitsrisikos in hoher räumlicher Auflösung. Perspektivisch werden als Ergebnis anderer laufender Projektarbeiten noch höhere räumliche Auflösungen mit POLYPHEMUS erreicht werden können und sind sodann auch für BioClis einsetzbar. Zu diesen Projekten zählen JOSEFINA (finanziert durch BayStMUV) und S-VELD (finanziert durch das BMVI). Die POLYPHEMUS/DLR-Modelldaten werden kontinuierlich mittels in-situ-Daten (LÜB) sowie Copernicus Satellitendaten (ESA/EUMETSAT) validiert (z.B. Valks et al., 2011). Satelliten liefern heutzutage wichtige Informationen für umweltmeteorologische Anwendungen wie die raumzeitliche Variabilität von Luftschadstoffen (Erbertseder et al., 2015c). Luftschadstoffe wie NO₂ und PM_{2.5} werden aber stets in einer vertikal integrierten Säule bestimmt und nicht direkt als bodennahe Konzentrationen (vgl. Erbertseder et al., 2015a, b; Rohde, 2017). Das für BioClis eingesetzte Modellsystem profitiert vor allem von einem hochaufgelösten und dynamischen Emissionskataster, das im Rahmen von JOSEFINA entwickelt wurde. Hier wurde das bayerische Emissionskataster EKATBY z.B. mittels Satelliten- und Geodaten zu Landnutzung, Besiedelung, Verkehr aktualisiert und verbessert.

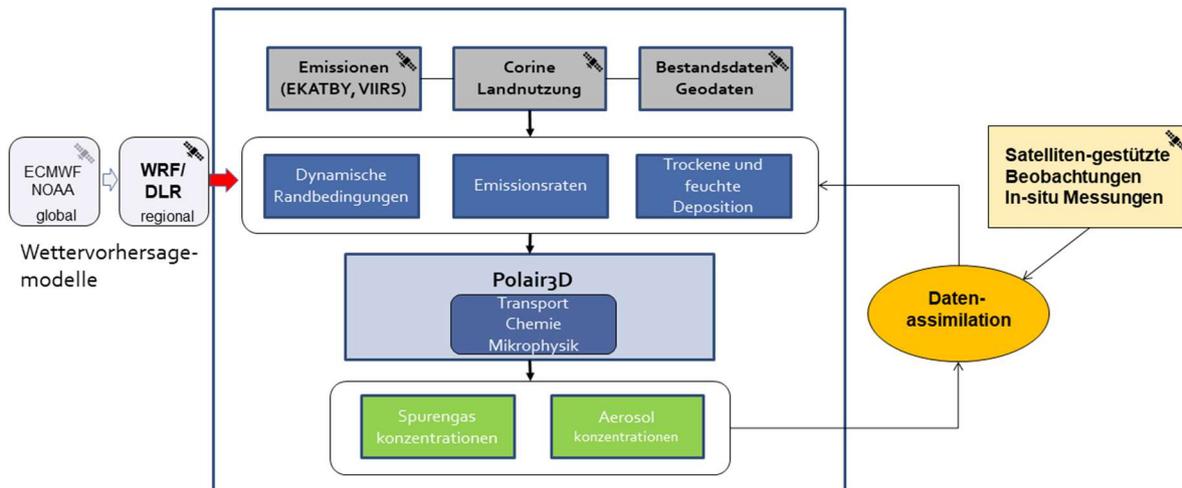


Abbildung 8: Schematischer Überblick zum modularen Aufbau des Luftschadstoffanalyse- und Prognose-Modellsystems POLYPHEMUS/DLR für Bayern. Zusammen mit dem Wetterprognosemodell WRF bildet es die Datenbasis für das Bioklimatische Informationssystem BioClis. Das Piktogramm eines Satelliten zeigt an, an welchen Stellen überall Erdbeobachtungsdaten aus dem All einfließen.

Die Luftschadstoffdaten von CAMS basieren auf einem europaweiten Ensemble aus sieben Chemietransportmodellen, die alle auf einem aktuellen europäischen Emissionskataster (TNO) aufsetzen und in die teilweise satellitenbasierte Beobachtungen und in-situ-Daten assimiliert werden (Marécal et al, 2015; Kukkonen et al., 2012). Die räumliche Auflösung beträgt aber nur $0,1^\circ$ (~ 10 km). Die CAMS-Daten werden einerseits als Back-Up zu POLYPHEMUS/DLR operational akquiriert, um die Ausfallsicherheit von BioClis zu verbessern. Hierzu werden die CAMS-Prognosen von bis zu 96 Stunden in stündlicher Zeitauflösung genutzt. Andererseits liegt derzeit eine aktuelle Reanalyse des CAMS Modellensemble für die Luftqualität im Zeitraum von 2010 bis 2016 vor. Basierend auf diesem sieben Jahre umfassenden Datensatz stündlicher Konzentrationen aller benötigten Luftschadstoffe, konnte die raumzeitliche Variabilität des aggregierten Gesundheitsrisikos in Bayern eingehend untersucht werden (siehe Kapitel 6.1).

Datenprozessor ARI

Der Prozessor wurde so programmiert, dass ein automatisches Herunterladen der benötigten Daten ermöglicht wird. Diese Daten werden im Datenformat netCDF eingelesen und unter Verwendung der Programmiersprache C++ zur Berechnung der ARI-Werte verwendet, die ebenfalls im netCDF-Format abgespeichert werden. Mit einem Postprozessor, basierend auf der Sprache Python, werden die ARI-Dateien anschließend eingelesen und grafisch als farbcodierte Landkarten für Bayern dargestellt. Bisher sind als Luftschadstoffe NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} und O_3 berücksichtigt. Der Programmcode ist jedoch mit wenigen Eingriffen um beliebig viele weitere Faktoren erweiterbar. Es werden verschiedene statistische Größen des ARI zu berechnet.

- Tagesmittelwerte. Die relativen Risikowerte von PM und NO_2 beziehen sich auf 24h-Mittelwerte bzw. sind auf 24h-Mittelwerte anwendbar. Für O_3 wird das Maximum von gleitenden 8h-Mittelwerten (in Übereinstimmung mit den EU-Richtlinien für Luftqualität) für die Berechnung des ARI verwendet.

- Langzeit-Mittelwerte. Es stehen Stundenwerte der Konzentration für die genannten Luftschadstoffe für den Zeitraum von 2010 bis 2016 zur Verfügung. Aus den Tagesmittelwerten des ARI wird der Mittelwert über alle Tage dieses Zeitraums bestimmt.
- Standardabweichungen. Die Standardabweichung der Tagesmittelwerte wird für die Jahre des Zeitraums von 2010 bis 2016 berechnet.
- Extremwerte. Die Extrema der Tagesmittelwerte werden für beliebige Zeiträume (Tag, Monat, Jahr) bestimmt.

Datensätze Meteorologie und Datenprozessor UTCI

Der UTCI wird entsprechend der im Kapitel 4 beschriebenen Methodik operationell berechnet. Abbildung 9 gibt einen Überblick zu den in BioClis verwendeten Wetterdaten zur Bestimmung des UTCI und zum Antrieb des Luftqualitätsmodellsystems POLYPHEMUS/DLR. Dabei wird die Bayerndomäne von WRF (linke Box) genutzt. Die COSMO und ICON Daten, die vom Deutschen Wetterdienst operationell zur Verfügung gestellt werden, dienen als Backup. Vom UTCI werden Tagesmittelwerte, Tagesminima und Tagesmaxima berechnet.

Datensätze Meteorologie

WRF:

- Weather Research and Forecasting Model (NCAR)
- Operationell am DLR
- Europa, Auflösung 0,008 – 0,01°
- Vorhersage +96 h

COSMO:

- Consortium for Small-scale Modeling
- Nutzung der operationellen DWD Vorhersagen

COSMO-D2:

- Abdeckung Deutschland und Teile Nachbarstaaten
- Auflösung 0,02°
- Vorhersage +27- 45h

ICON-EU:

- Abdeckung Europa
- Auflösung 0,0625°
- Vorhersage +78h

https://www.dwd.de/DE/forschung/wettervorhersage/num_modellierung/o1_num_vorhersagemodelle/regionalmodell_cosmo_de.html

Abbildung 9: Überblick zu den in BioClis verwendeten Wetterdaten zur Bestimmung des UTCI und zum Antrieb des Luftqualitätsmodellsystems POLYPHEMUS/DLR. Dabei wird die Bayerndomäne von WRF (linke Box) genutzt. Die COSMO und ICON Daten, die vom Deutschen Wetterdienst operationell zur Verfügung gestellt werden, dienen als Backup.

6 Ergebnisse - Das Bioklimatische Informationssystem

6.1 Bewertung des aggregierten Gesundheitsrisikos durch Luftschadstoffe

Im Folgenden betrachten wir die Erhöhung des aggregierten Gesundheitsrisikos durch Luftschadstoffe in seiner räumlichen und zeitlichen Verteilung in Bayern an drei beliebigen Tagen (12. bis 14. November 2019) (Abbildung 10). Für die Zunahme des allgemeinen Gesundheitsrisikos (obere Reihe) dominieren Werte mit geringem Risiko ($RR < 16\%$, $ARI < 4$). Lediglich die Ballungsräume München, Ingolstadt, Nürnberg-Erlangen und Würzburg treten teilweise leicht hervor. Eine völlig andere Risikobewertung ergibt sich jedoch für Herz-Kreislauf Erkrankungen. Einige Teile des Landes liegen nun auch im Bereich eines erhöhten Risikos ($RR > 16\%$, $ARI > 4$). Besonders wird ein starker Risikoanstieg vom 12. auf den 13. November offensichtlich. In den Ballungsgebieten treten ARI-Werte von bis zu 7 auf, was einer Risikoerhöhung von bis zu 28 % entspricht. Die Tag-zu-Tag Variabilität der Risikoerhöhung kann dabei entweder schwankenden Emissionen, veränderten meteorologischen Bedingungen, der Akkumulation von Luftschadstoffen oder einer Kombination aus diesen Prozessen geschuldet sein.

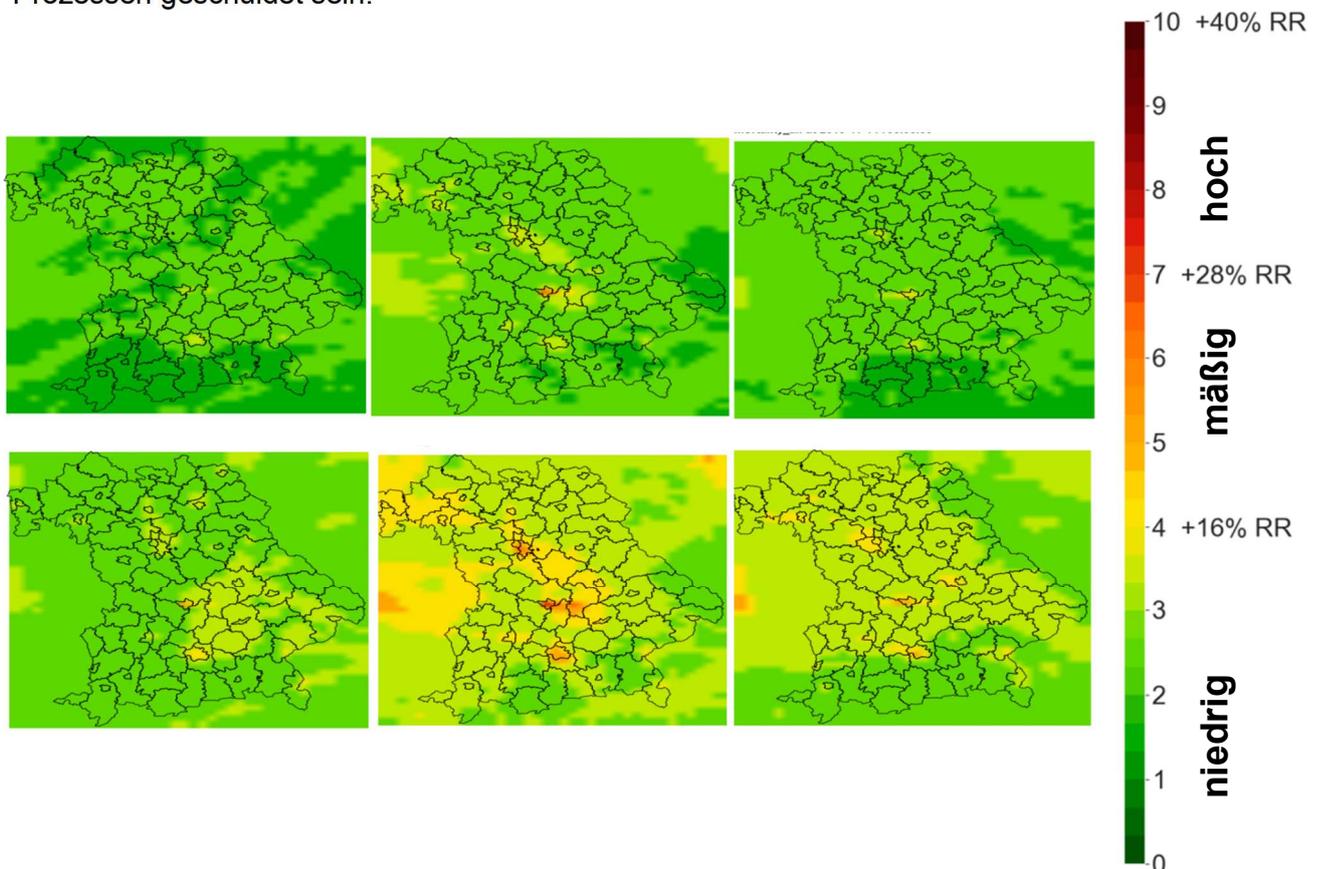


Abbildung 10: Aggregiertes Gesundheitsrisiko durch Luftschadstoffe in Bayern vom 12. bis 14. November 2019 für die Gesundheitsendpunkte: Erhöhung des allgemeinen Gesundheitsrisiko (oben) und des Risikos für Herz-Kreislauf-Erkrankungen (unten). Die Farbskala zeigt den ARI (0-10) sowie die aggregierte Risikoerhöhung RR in Prozent.

Um nun die zeitliche Variabilität der Risikoerhöhung durch Luftschadstoffe näher zu beleuchten, kommen wir nun zum Verlauf des aggregierten Gesundheitsrisikos (ARI) über das Jahr, am Beispiel von München 2016 (Abbildung 11). Wir vergleichen hierzu die allgemeine Risikoerhöhung mit der für Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Verfolgen wir den ARI, dargestellt in rot, sehen wir, dass die Werte in der Graphik links überwiegend weit unter 16% Risikoerhöhung (geringes Risiko, $ARI < 4$) liegen, während sie rechts im Mittel deutlich höher liegen und oft Werte über 16 % (mäßiges Risiko, $ARI > 4$) erreichen. In beiden Kurven fällt die teilweise hohe Tag-zu-Tag Variabilität auf. Auch hierin manifestiert sich das komplexe Wechselspiel aus den Prozessen Emission, Chemie, Dynamik und Strahlung und den daraus resultierenden Luftschadstoffkonzentrationen (Immission). Während beim allgemeinen Risiko (alle Ursachen, links) lediglich einzelne Tage im Wertebereich des mäßigen Risikos liegen, erreichen manche Tage für Herz-Kreislauf-Erkrankungen durchaus hohe Risiken ($ARI > 7$, $RR > 28\%$). Hier gilt bereits konkreter und proaktiver Handlungsbedarf zu Präventivmaßnahmen und umweltmedizinischen Informationen für Risikogruppen.

Neben der Erhöhung des (aggregierten) Gesamtrisikos (rote Kurve) verdeutlicht Abbildung 11 auch anschaulich, wie unterschiedliche Luftschadstoffe über das Jahr hinweg zur Risikoerhöhung beitragen. Ozon zeigt einen starken Jahresgang mit einem ausgeprägten Sommermaximum, denn es wird durch photolytische Prozesse bei hohem Sonnenstand bevorzugt gebildet. Im Sommer leistet O_3 somit den überwiegenden Beitrag zum Gesamtrisiko. Feinstaub und NO_2 zeigen erhöhte Werte und einzelne Spitzen hingegen gerade in den Wintermonaten. Hier kann sich der Feinstaub insbesondere bei Inversionswetterlagen akkumulieren. Im Kontext dieser Ergebnisse soll betont werden, dass unterschiedliche Luftschadstoffe für verschiedene Gesundheits-Endpunkte unterschiedlich zum Gesamtrisiko beitragen. Je nach Erkrankung werden einzelne Luftschadstoffe in Bezug auf ihre relativen Risiken bzw. Expositions-Wirkungsfunktionen anders gewichtet.

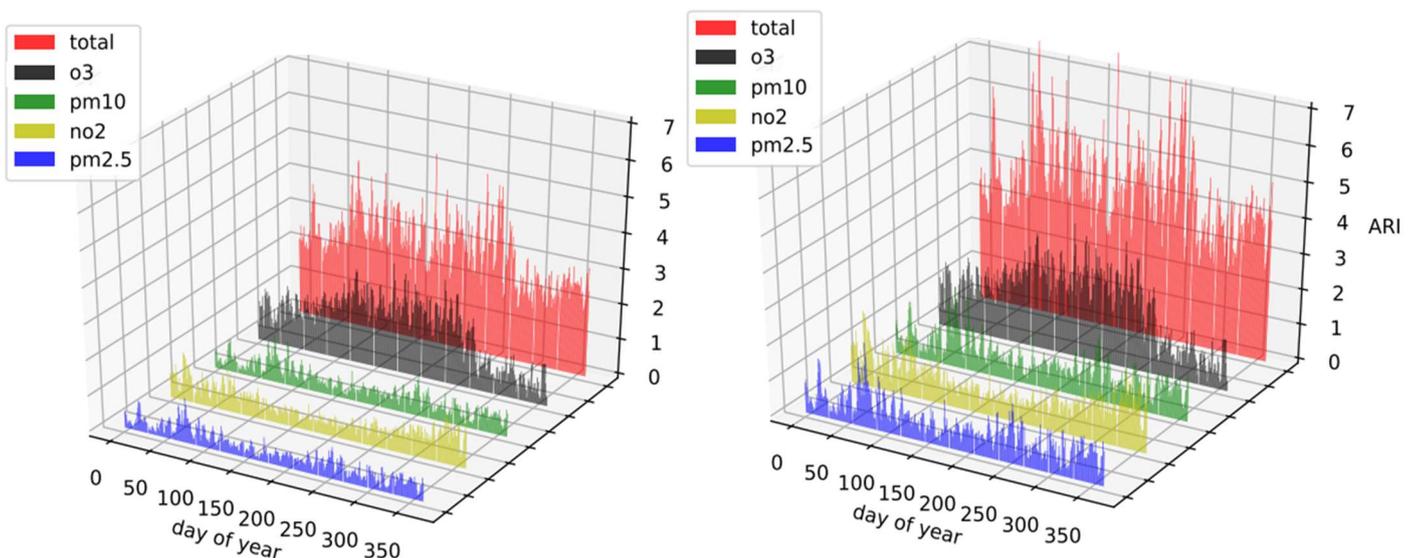
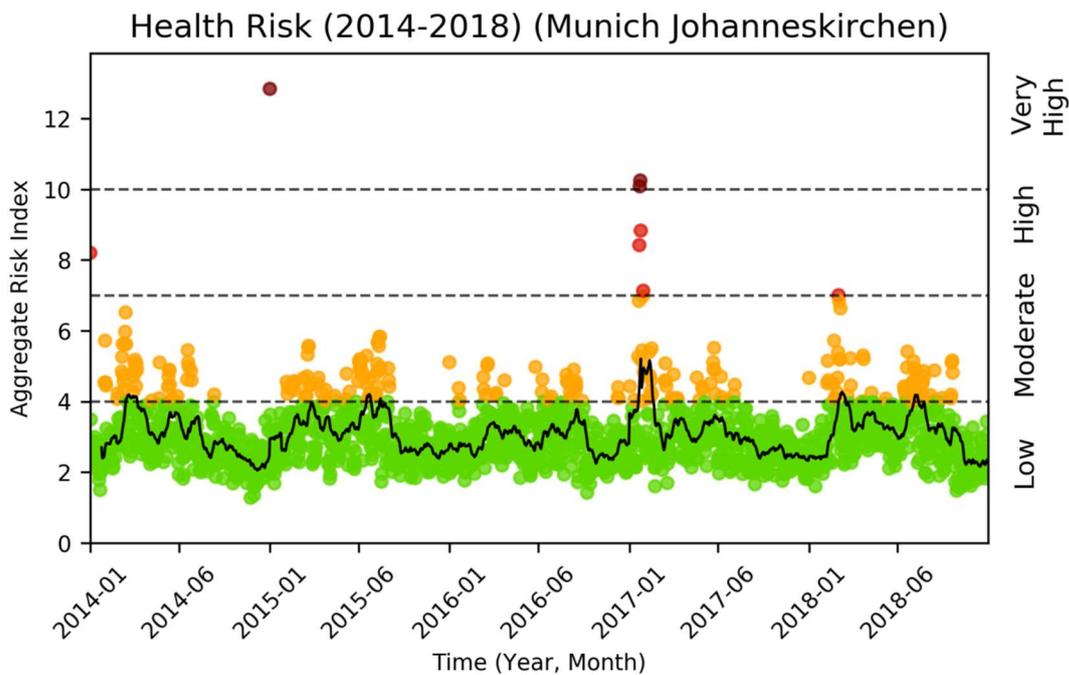


Abbildung 11: Risikoerhöhung durch Luftschadstoffe in München für die Tage des Jahres 2016 und die Gesundheitsendpunkte alle Ursachen (links) und kardiovaskulär (rechts). Neben dem aggregierten Gesamtrisiko (rot) sind auch die Anteile der einzelnen Luftschadstoffe aufgetragen. Risikoerhöhung ist jeweils in der ARI Indexskala angegeben, wobei Werte über 4 ein mäßiges und Werte über 7 ein hohes Risiko bedeuten.

Um den zeitlichen Verlauf des ARI in Abhängigkeit von der Umgebungssituation zu analysieren, wurden in-situ Daten des Lufthygienischen Überwachungssystem Bayern (LÜB) ausgewertet. Bedingung hierfür ist, dass an der Messstation die Luftschadstoffe O_3 , NO_2 , SO_2 , $PM_{2.5}$ und PM_{10} erfasst werden. Als Beispiel seien hier die Stationen München Johanneskirchen (vorstädtischer Hintergrund), München Lothstraße (städtischer Hintergrund) und München Stachus (Verkehrsmessstation) im Zeitraum von 2014 bis 2018 dargestellt. Dabei wurde täglich der ARI für die allgemeine Risikoerhöhung durch Luftschadstoffe berechnet. Erwartungsgemäß zeigt die Verkehrsstation die höchsten Werte (es dominieren mittlere Belastungen), die vorstädtische Hintergrundstation die niedrigsten (es dominieren niedrige Belastungen). Die Zeitreihen zeigen an allen Stationen im Halbjahresgang höhere Werte im Sommer (Hauptanteil O_3) und im Winter (Hauptanteil NO_2 und PM_x). Ebenso fällt das Augenmerk auf die Spitzenwerte am 1. Januar 2017, wohl verursacht durch eine Inversionssituation und dem Silvesterfeuerwerk. Am Stachus sind im Zeitraum von fünf Jahren bzw. 1826 Tagen, insgesamt elf Tage mit hohem und 3 Tage mit sehr hohem Gesundheitsrisiko zu verzeichnen.



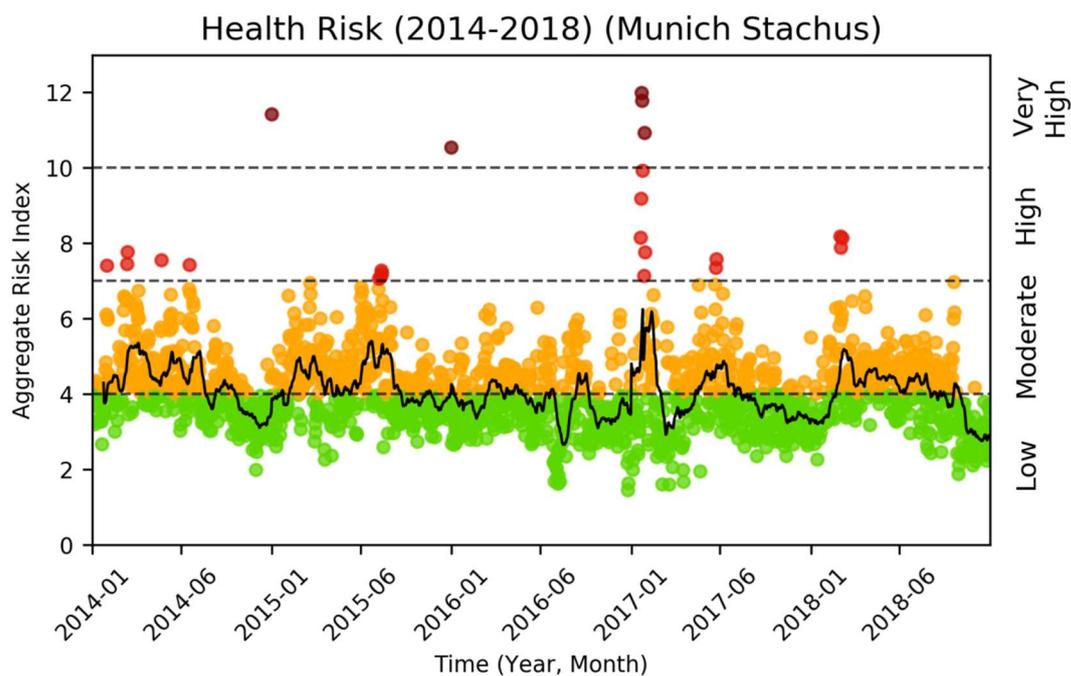
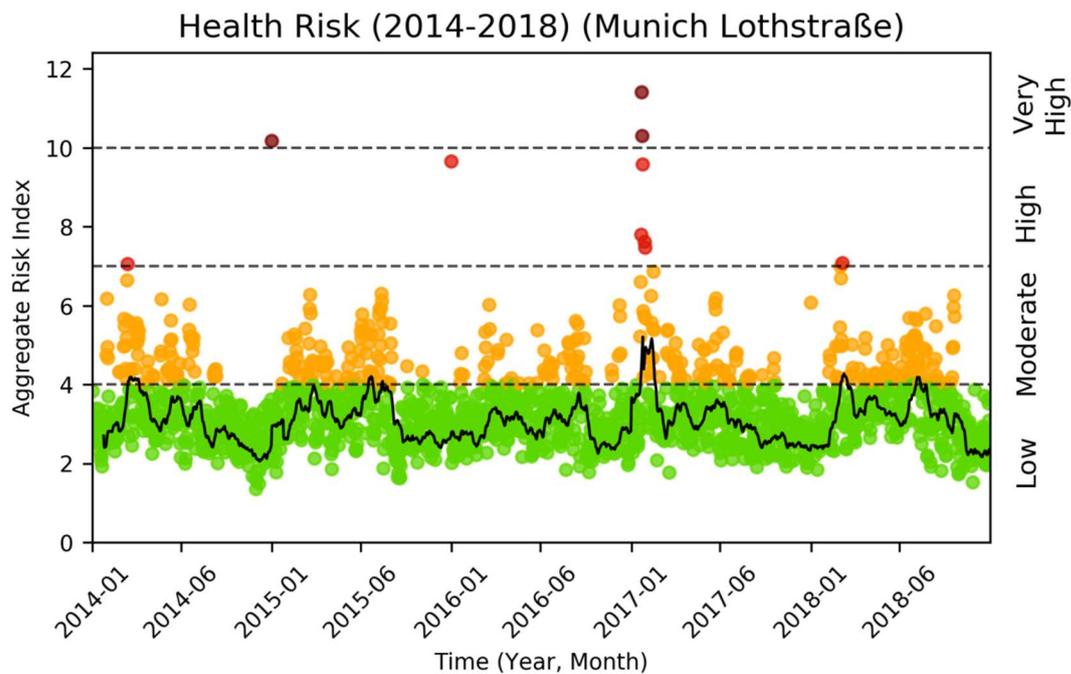
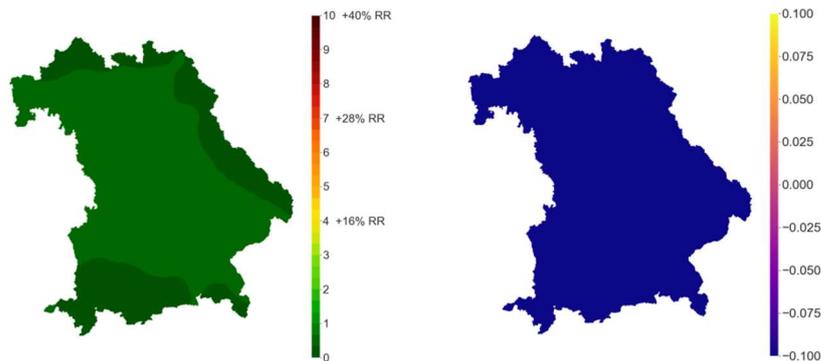


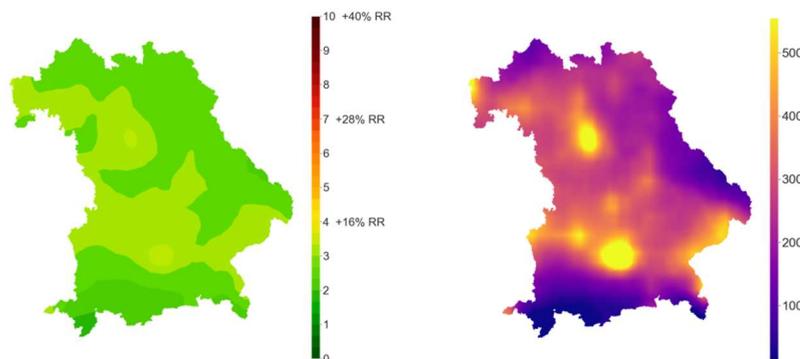
Abbildung 12: Zeitreihen des ARI für die allgemeine Risikoerhöhung durch Luftschadstoffe von 2014 bis 2018, berechnet anhand von in-situ Daten des Lufthygienischen Überwachungssystem Bayern (LÜB) für die Stationen München Johanneskirchen (vorstädtischer Hintergrund), München Lothstraße (städtischer Hintergrund) und München Stachus (Verkehrsmessstation) (pers. Kommunikation Marion Houdayer, DLR). Die Farbgebung der Kreissymbole entspricht der Risikoskala in Abbildung 10. Die schwarze Kurve zeigt das gleitende 24-Stundenmittel.

Die letzten Beispiele dienen dazu, schlaglichtartig die räumliche und zeitliche Verteilung der Erhöhung des aggregierten Gesundheitsrisikos durch Luftschadstoffe in Bayern allgemein zu verdeutlichen. Nun soll der Zusammenhang zwischen Luftschadstoffkonzentrationen und Gesundheitsrisiko bzw. verschiedenen Gesundheitsendpunkten statistisch näher untersucht werden. Hierzu wurden Luftschadstoffdaten des Copernicus Atmosphären Überwachungsdienstes (CAMS) für Bayern im Zeitraum 2010 bis 2016 ausgewertet. Dieser Datensatz umfasst modellbasierte, flächendeckende und stündlich aufgelöste Analysen aller relevanten Luftschadstoffe mit einer räumlichen Auflösung von ca. 15 x 15 km. Für jeden Tag innerhalb dieses Zeitraums wurde nun das aggregierte Gesundheitsrisiko für verschiedene Gesundheitsendpunkte berechnet und danach der Mittelwert über den gesamten Zeitraum 2010 bis 2016 gebildet. Durch die Auswertung dieses 2554 Tage umfassenden Zeitraums, lassen sich erste statistisch belastbare Aussagen zur Bewertung der Erhöhung des Gesundheitsrisiko durch Luftschadstoffe in Bayern mittels des hier gewählten methodischen Ansatzes treffen. Zudem lässt sich nach Tabelle 2 die Risikoerhöhung für verschiedene Gesundheitsendpunkte analysieren. Als Ergebnis zeigt Abbildung 13 nun die mittlere Risikoerhöhung für Krankenhauseinweisungen durch Atemwegserkrankungen bei Kindern (oben), durch Herzkrankheiten für Personen ab 65 Jahren (Mitte) und ischämische (koronare) Herzerkrankung. Es wird offensichtlich, dass die mittlere Risikoerhöhung je nach Gesundheitsendpunkt völlig unterschiedlich zu bewerten ist. Während beim Risiko für die Krankenhauseinweisung bei Kindern das Risiko für die gegebene Luftschadstoffsituation in Bayern vernachlässigt werden kann, ist die Lage für ischämische Herzerkrankungen bei Personen ab 65 Jahre sehr ernst zu nehmen. Hier treten im siebenjährigen Mittel noch erhöhte Belastungen von 20 bis 24% (ARI 5 bis 6) auf.

Risikoerhöhung für Krankenhauseinweisung durch Atemwegserkrankungen Kinder 0 bis 14 Jahre



Risikoerhöhung für Krankenhauseinweisung durch Herzkrankheiten Personen älter 65 Jahre



Risikoerhöhung für Krankenhauseinweisung durch ischämische Herzkrankheit Personen älter 65 Jahre

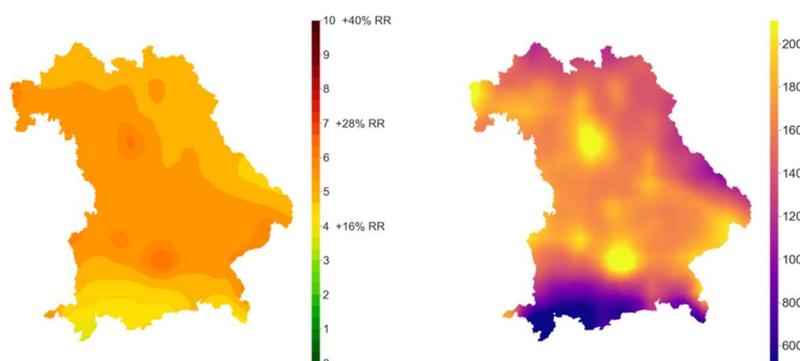


Abbildung 13: Mittlere Risikoerhöhung durch Luftschadstoffe in Bayern im Zeitraum 2010 bis 2016 für verschiedene Gesundheitsendpunkte (linke Spalte). Rechts davon ist jeweils die Anzahl der Tage angegeben, an denen eine Risikoerhöhung von 16% (niedrig) überschritten wird. Es muss betont werden, dass die gleiche Exposition zu unterschiedlichen Risiken führt. Die Exposition bezieht sich aber nur auf die Hintergrundbelastung. Vor allem in den Städten werden hot spots bei dieser räumlichen Auflösung nicht erfasst.

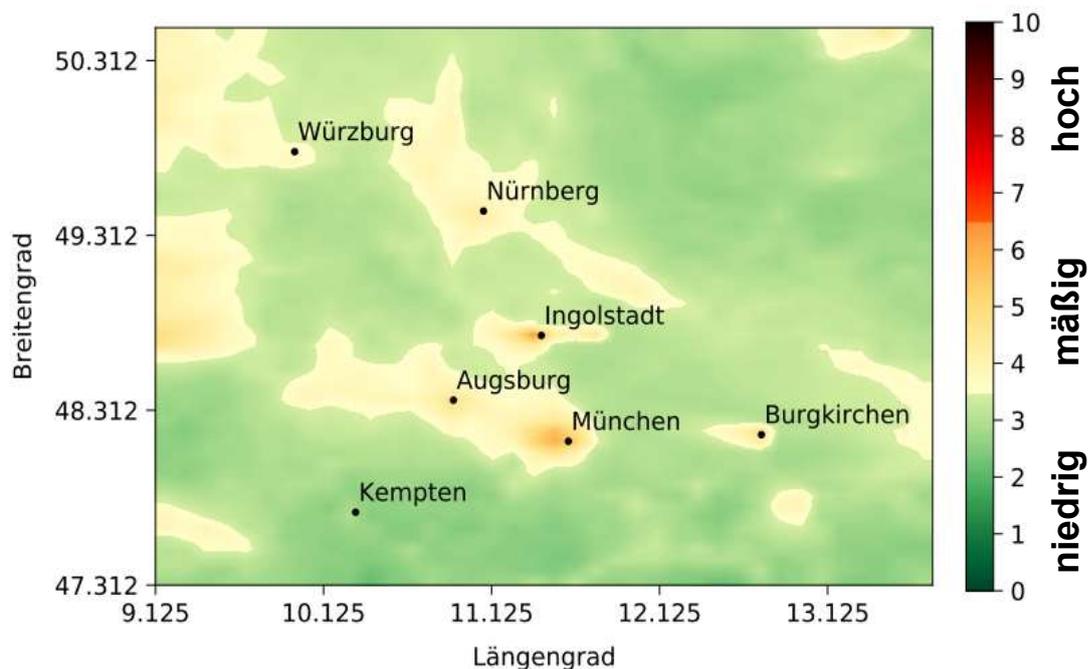
Deutlich wird das auch durch die Statistik der Überschreitungstage. Auf den Karten in der rechten Spalte ist jeweils die Anzahl der Tage angegeben, an denen eine Risikoerhöhung von 16% (niedrig) überschritten wird. Während die Anzahl bei der Risikoerhöhung für Krankenhauseinweisungen durch Atemwegserkrankungen bei Kindern von 0 bis 14 Jahren im Langzeitmittel null ist, ist das Risiko für Krankenhauseinweisungen durch Herzkrankheiten für Personen älter 65 Jahre im Großraum München und Nürnberg an mehr als 500 Tagen im Zeitraum 2010 bis 2016 hin zum mäßigen und hohen Risiko überschritten. Im Anhang 10.4 sind Ergebnisse dieser Analyse für 11 Gesundheitsendpunkte zusammengestellt.

Wir sehen, dass die gleiche Exposition zu unterschiedlicher Risikobewertung führt und es wird daraus umso deutlicher, dass spezifische Informationen und Empfehlungen für Risikogruppen in einem bioklimatischen Informationssystem unverzichtbar sind. Das allgemeine Risiko, wie es derzeit in verschiedenen Apps oder News kommuniziert wird, ist aufgrund dieser Ergebnisse des BioClis Projekts nur bedingt aussagekräftig. Teile der Bevölkerung werden unnötig gewarnt, während für bestimmte Risikogruppen nicht eindringlich und zielführend genug informiert wird. Selbst bei den Risikogruppen mit kardiovaskulären oder respiratorischen Vorerkrankungen tragen verschiedene Luftschadstoffe unterschiedlich zum Gesamtrisiko bei. Dominiert beispielsweise der Feinstaub das Gesamtrisiko, ist eine der beiden Risikogruppen gar nicht signifikant betroffen. Eine Information der Art „die Luftqualität ist befriedigend“ ist daher nicht zielgerichtet genug. Auch bei der Planung von Maßnahmen zur Minderung von Luftschadstoffen bzw. deren Emissionen muss berücksichtigt werden, für welche Risikogruppe die Maßnahmen durchgeführt werden sollen bzw. auf welche Risikogruppe die Maßnahmen abzielen.

Abbildung 14 verdeutlicht, dass mittels BioClis die wesentlichen Umweltstressoren im Bereich Luftschadstoffe und thermaler Stress zusammengefasst werden. Die umweltmedizinische Aussagekraft der aggregierten Parameter ARI und UTCI sowie der methodische Fortschritt durch die hohe räumliche Auflösung der Daten wird offensichtlich. Im ARI sehen wir die kleinräumige Variabilität der Erhöhung des Gesundheitsrisikos aufgrund der überwiegend urbanen (München-Augsburg, Nürnberg-Erlangen und Würzburg) sowie industrie-geprägten (Ingolstadt, Burgkirchen Burghausen) Emissionen. Diese kleinräumige Variabilität durch die meteorologische Situation in Verbindung mit der Landnutzung und Topographie wird auch im UTCI deutlich. So herrscht im Raum München und Augsburg an dem ausgewählten Tag (3. Juni 2019) starker Hitzestress. Ebenso das Inntal ist hier orographisch bedingt betroffen. Die Höhenlagen der Alpen und Mittelgebirge hingegen weisen keinen thermischen Stress auf.

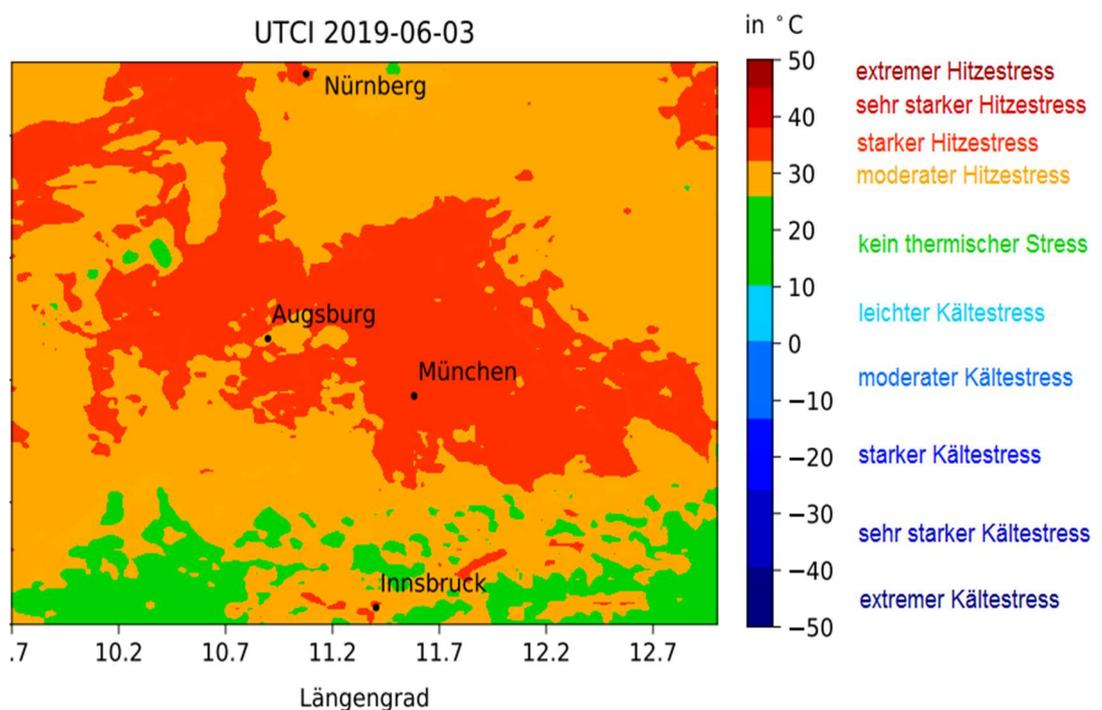
Diese Ergebnisse zeigen die Leistungsfähigkeit der implementierten Methodik, den Bedarf für die hohe räumliche Auflösung sowie die konkrete Anwendung für Bayern und seine Bürgerinnen und Bürger. Ein zukünftiges Forschungsthema wird sicher sein, nun den thermischen Stress und die Risikoerhöhung durch Luftschadstoffe zu einem übergeordneten Gesamtrisiko, also thermalen Stress und Luftschadstoffe in ihrer Wechselwirkung, zu kombinieren. Hierzu sind jedoch noch weitere Studien notwendig. Jedoch liegen mit dem ARI und UTCI bereits zwei Indizes vor, die mit entsprechenden Informationen begleitet, leicht verständlich kommuniziert und direkt mit Maßnahmen begleitet werden können, ohne dass dafür umständlich verschiedene Luftschadstoffkonzentrationen, die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, die Windgeschwindigkeit und Strahlungsparameter durch die Bevölkerung interpretiert werden müssen.

ARI Bayern 2019-06-03 (Polyphemus)



- Luftqualitätsmodellsystem Polyphemus/DLR
- Angetrieben durch Wettermodell WRF
 - Räumliche Auflösung (2 km)
 - Vorhersagen bis zu 72 Stunden

UTCI 2019-06-03



- Wettermodelle WRF/DLR + DWD/COSMO-D2
- Räumliche Auflösung 0,02°
 - Vorhersagen bis zu 72 Stunden

Abbildung 14: Diese Karten des ARI (oben) und UTCI sollen beispielhaft für den 3. Juni 2019 sowohl die hohe räumliche Variabilität der Umweltstressoren verdeutlichen, als auch die Leistungsfähigkeit des eingesetzten Prognosesystems hinsichtlich der hohen räumlichen Auflösung.

6.2 Das Online Informationssystem BioClis als Service der UFS

BioClis wurde als webbasiertes Informationssystem mit Analysen und Vorhersagen des integrierten und aggregierten Gesundheitsrisikos der atmosphärischen Umwelt realisiert. Es wurde in das Alpine Environmental Data and Analysis Center (AlpEnDAC) implementiert und wird nun als Service der UFS frei zugänglich über das Internet der Öffentlichkeit angeboten. Das Angebot umfasst ein

- interaktives Tool mit aktuellen bioklimatischen Informationen auf Landkreisebene. Zusätzlich Anzeige der Prognose als Zeitreihe für die folgenden Tage für verschiedene wählbare Parameter

<https://www.alpendac.eu/bioclis>

Das Informationsangebot umfasst:

Tagesaktuelle Analysen und Prognosen bis zu 72 Stunden von

- ARI, Index zur Bewertung des zusätzlichen Gesundheitsrisikos durch Luftschadstoffe (für verschiedene Gesundheitsendpunkte)
- UTCI, Index zur Bewertung von Hitze- und Kältestress
- Ozon, Stickstoffdioxid und Feinstaub PM10
- Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Grenzschichthöhe
- Tägliche Mittel und Maxima, Zeitreihen

Beim Überfahren der Landkreise oder der Zeitreihen mit der Maus (mouse-over) werden zudem die Namen der Landkreise und die Werte numerisch angezeigt.

- Interaktives Tool mit tagesaktuellen und farbcodierten Karten in höchster räumlicher Auflösung. Umfangreiche Auswahlmöglichkeiten an 11 Gesundheitsendpunkten:

https://www.alpendac.eu/spa#!/air-ari_by

<https://www.alpendac.eu/spa#!/air-utci>

Topic: Infrastructure

AlpEnDAC

Main menu

- Home
- **Bioclimatic Information System**
- Airmass footprinting
- Air quality
- Air chemistry
- Satellite observations
- Health
- EURAC Snow Cover
- Meteorology
- Climate at UFS Zugspitze
- Meteorological UFS Dashboard
- Data explorer
- Computing on demand
- NRLMISE-00 Atmosphere Model
- Horizontal Wind Model (HWM)
- Product registration
- My products
- VAO Partners
- Links
- Privacy Policy
- Legal notice

Bioclimatic Information System

This viewer combines several datasets. The map shows air quality forecasts as spatial averages for each county in the alpine region air chemistry model POLYPHEMUS/DLR. Below you can select the air quality parameter (amount of substance or health index) v of your interest. You can choose between the substances ozone (O3), nitrogen dioxide (NO2) and particulate matter (PM10) and Thermal Climate Index) and ARI (Aggregated Risk Index).

Clicking on a single county shows time series for different parameters spatially averaged for the selected county. Beside air quality meteorological parameters from WRF model are provided. Move your mouse cursor over the time series to see explicit values for

Health risk: Mortality, all causes mean tomorrow

Forchheim

3

PM10

— PM10 — PM11

PM

UTCI

— UTCI — UTCI

UT

Reference day: 22.4.2020

Species:

Day:

Aggregation:

Abbildung 15: Das BioClis Online Informationssystem als Service der UFS (Prototyp) integriert in das AlpEnDAC. Das Informationsangebot umfasst Analysen, Prognosen und Zeitreihen von ARI, UTCI und verschiedene meteorologischen und luftchemischen Umweltstressoren. In der Abbildung ist der Landkreis Forchheim ausgewählt.

The screenshot displays the BioClis online information system interface. At the top left is the 'Virtual Alpine Observatory' logo. The main header area is dark blue with the text 'Topic: Infrastructure' and 'AlpEnDAC'. On the left side, there is a 'Main menu' with various navigation options such as 'Home', 'Bioclimatic Information System', 'Air mass footprinting', 'Air quality', 'Air chemistry', 'Satellite observations', 'Health', 'UTCI', 'ARI Bavaria', 'EURAC Snow Cover', 'Meteorology', 'Climate at UFS Zugspitze', 'Meteorological UFS Dashboard', 'Data explorer', 'Computing on demand', 'NRLMSISE-00 Atmosphere Model', 'Horizontal Wind Model (HWM)', 'Product registration', 'My products', 'VMO Partners', 'Links', 'Privacy Policy', and 'Legal notice'. Below the menu is a 'User login' section with fields for 'Username' and 'Password', and buttons for 'Log In', 'Create new account', and 'Request new password'. The main content area is titled 'Aggregated Risk Index'. It includes a descriptive paragraph: 'The Aggregated Risk Index (ARI) is an indicator for the increase of health risks associated with levels of air pollution. There are different risk groups, which are taking into account the sensitivity of several diseases to specific air pollutants, such as O3, NO2, PM2.5, PM10 and SO2. Calculations are based on model data from POLYPHEMUS/DLR. For more information about ARI see Sicard, 2011 and Sicard, 2012.' Below this is a date selector set to '2019-12-24'. A 'Daily admissions to hospital:' section contains several radio button options for different health endpoints and age groups. The 'ischemic heart diseases, age > 65' option is selected. At the bottom, a map of the Alpine region is shown with a color-coded overlay representing the risk index for 'ischemic_65 at 2019-12-24T00:00:00'. The map uses a color scale from green (low risk) to yellow and orange (higher risk), with the highest risk areas concentrated in the central and eastern parts of the region.

Abbildung 16: Das BioClis online Informationssystem zum Aggregierten Risiko verschiedener Gesundheitsendpunkte (Prototyp). Über ein Kalendertool sind hochaufgelöste Farbcodierte Karten für ein beliebiges Datum selektierbar.

BioClis Informationssystem als Service der UFS (AlpEnDAC)

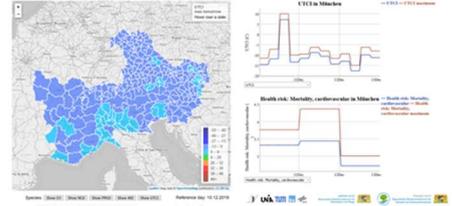
Service Bayern

- Nur Bayern
- Möglichst hohe Auflösung
- Tagesaktuell
- Deutsch
- Vorangegangene Tage abrufbar



Service Alpenraum auf Landkreisebene

- Bayern und Alpenraum (erweiterbar)
- Auflösung: 1 Wert pro Landkreis
- Gestern bis Übermorgen
- Englisch
- Zeigt aktuelle Situation



auswählbar: ARI, UTCI, Spurengaskonzentrationen, Temperatur, Windgeschwindigkeit, Luftdruck, rel. Luftfeuchte, Höhe der Grenzschicht → erweiterbar bei Bedarf

Abbildung 17: Übersicht zum Informationsangebot der beiden derzeitigen BioClis Prototypen. Als Beispiel für verschiedene selektierbare Umweltstressoren sind in der Abbildung operationelle Informationsprodukte des UTCI dargestellt.

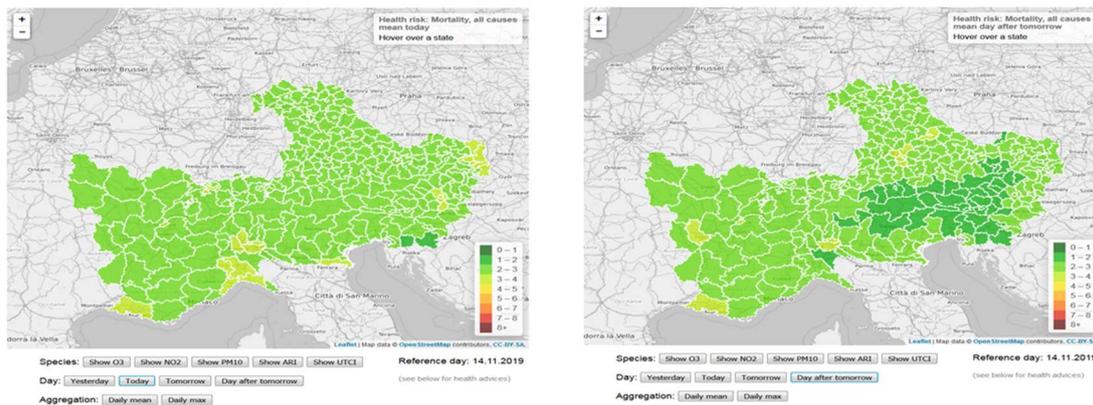
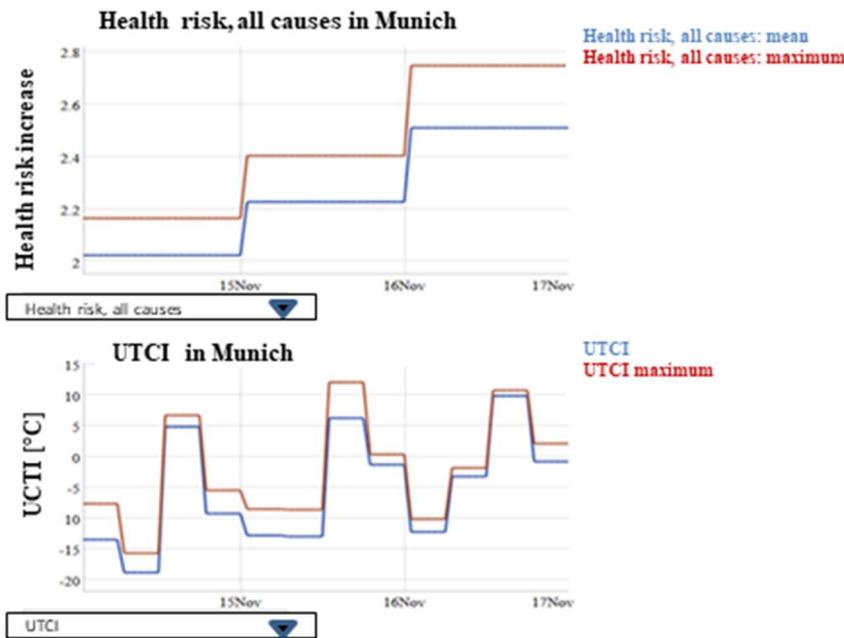


Abbildung 18: Über Schaltflächen kann die zeitliche Entwicklung der Erhöhung der Gesundheitsrisiken verfolgt werden (jeweils gestriger Tag bis 72 Stunden Prognose)

Durch die Nutzung von generischen Modulen bzw. Entwicklungen aus anderen Projekten konnten in BioClis zusätzliche Funktionalitäten realisiert werden, die über den Rahmen des beantragten Projektes hinausgehen. So war es vorgesehen, Karten mit den aktuellen und prognostizierten Werten des ARI und UTCI online zu publizieren. Wir können durch die Einbindung anderer Module nun diese interaktiven Karten anbieten (mit mouse over, hover), durch die man landkreisspezifische Information abrufen kann, u.a. auch die Entwicklung und Vorhersage von UTCI, ARI und anderen meteorologischen und luftchemischen Umweltstressoren über mehrere Tage. Letztlich wird durch die nachhaltige Finanzierung der UFS IT-Infrastruktur durch das Bayerische Umweltministerium im Rahmen UFS, VAO und AlpEnDAC der Aufbau und Betrieb eines komfortablen und leistungsfähigen bioklimatischen Informationssystems ermöglicht.



auswählbar: ARI, UTCI, Spurengaskonzentrationen, Temperatur, Windgeschwindigkeit, Luftdruck, rel. Luftfeuchte, Höhe der Grenzschicht → erweiterbar bei Bedarf

Abbildung 19: Über ein Zeitreihentool und Auswahllisten kann die Entwicklung beliebig zu selektierender Parameter aggregiert für jeden Landkreis (hier als Beispiel die Stadt München) verfolgt und verglichen werden

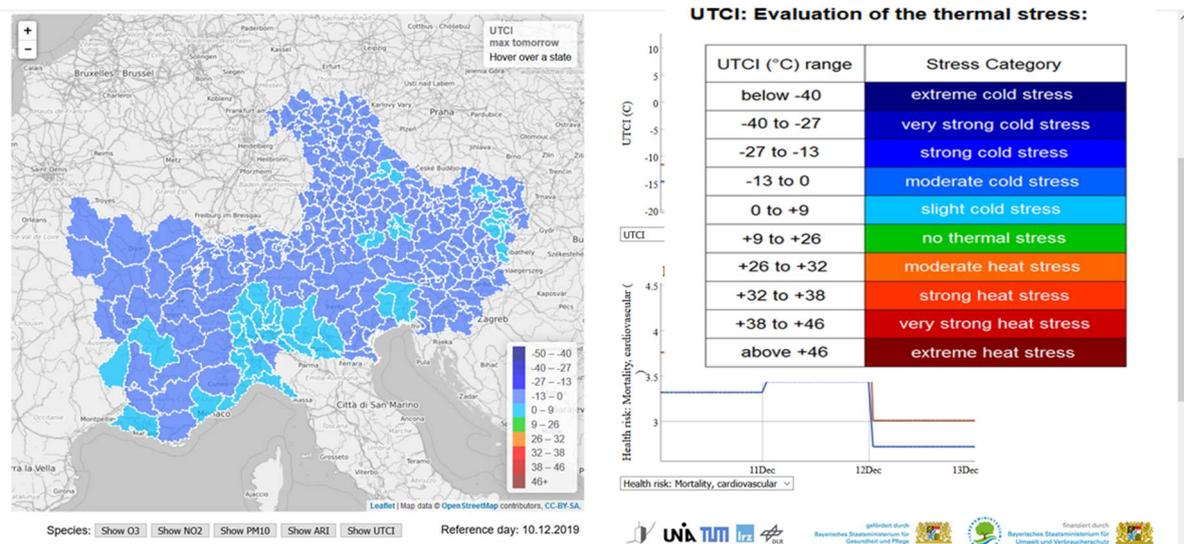


Abbildung 20: Als operationeller Service der UFS wird in BioClis der UTCI mit den zugehörigen thermalen Stresskategorien angeboten

Zusammen mit den Indexwerten, die farbcodiert auf Karten für Bayern ausgegeben werden, werden umweltmedizinisch abgestimmte Verhaltensempfehlungen kommuniziert. Nach Rücksprache mit dem BayStMGP werden die Verhaltensempfehlungen so spezifisch wie nötig und so allgemein wie möglich formuliert. Es wird darauf hingewiesen, dass das Bioklimatische Informationssystem in keiner Weise die individuelle medizinische Betreuung und Diagnose eines Arztes ersetzen kann und will.

Risikobewertung und umweltmedizinische Verhaltensempfehlungen für die allgemeine Bevölkerung - ARI
(Altersklassen von 15 bis 64 Jahren, ohne Vorerkrankungen)

ARI	Zusätzliches Gesundheitsrisiko auf Grund aktueller Luftschadstoffe	Umweltmedizinische Verhaltensempfehlung
0 1 2 3	niedrig	Ideale Bedingungen für Aktivitäten im Freien und Sport.
4 5 6	mittel	Ändern Sie ihre üblichen Aktivitäten im Freien oder Ihr Training nur, falls Symptome auftreten.
7 8 9	hoch	Jeder, der unter Beschwerden wie Husten oder Halsreizungen leidet, sollte anstrengende Aktivitäten im Freien reduzieren oder auf Tage verschieben, in denen der Index niedriger ist.
10	sehr hoch	<p>Gesundheitswarnung</p> <p>Jeder kann von schwerwiegenden gesundheitlichen Auswirkungen betroffen sein.</p> <p>Jeder sollte körperliche Anstrengung, insbesondere Aktivitäten im Freien, reduzieren oder auf Tage verschieben, an denen der Index niedriger ist.</p> <p>Falls Sie sich unwohl fühlen, suchen Sie einen Arzt auf.</p>

Health advice for the general population - ARI
(age classes 15 to 64, without pre-existing conditions)

ARI	Excess health risk from current air pollution	Health advice and preventive measures
0 1 2 3	low	Ideal conditions for outdoor activities.
4 5 6	moderate	No need to modify your usual outdoor activities unless you experience symptoms.
7 8 9	high	Anyone experiencing discomfort such as coughing or throat irritation should consider reducing or rescheduling strenuous outdoor activities to periods when the index is lower.
10	Very high	Health alert Everyone may experience more serious health effects. Everyone should reduce or rescheduling physical exertion, particularly outdoor activities to times when the index is lower. If you feel uncomfortable, contact your doctor or general practitioner.

Risikobewertung und umweltmedizinische Verhaltensempfehlungen für Risikogruppen - ARI

(Kinder unter 15, Erwachsene ab 65 Jahren sowie Menschen mit Vorerkrankungen / chronischen Herz-Kreislauf oder Atemwegserkrankungen)

ARI	Zusätzliches Gesundheitsrisiko auf Grund aktueller Luftschadstoffe	Umweltmedizinische Verhaltensempfehlung
0 1 2 3	niedrig	Genießen Sie Ihre gewohnten Aktivitäten im Freien. Befolgen Sie die Anweisungen Ihres Arztes zum Sport.
4 5 6	mittel	Wenn Sie Herz- oder Lungenprobleme haben, sollten Sie anstrengende körperliche Aktivitäten im Freien reduzieren oder auf Tage verschieben, an denen der Index niedriger ist. Befolgen Sie die Anweisungen Ihres Arztes zum Sport.
7 8 9	hoch	Kinder, Personen ab 65 und Personen mit Herz- oder Atemwegsproblemen sollten die körperliche Anstrengung reduzieren, insbesondere wenn Sie Symptome bemerken. Achten Sie auf Beschwerden wie Husten oder Halsreizungen. Körperliche Anstrengung auf Tage verschieben, in denen der Index niedriger ist. Befolgen Sie die üblichen Ratschläge Ihres Arztes. Personen mit Asthma müssen möglicherweise ihren Inhalator häufiger verwenden. Bei anhaltenden Symptomen suchen Sie Ihren Arzt auf.
10	sehr hoch	Gesundheitswarnung vor Notfällen Kinder, Personen ab 65 und Personen mit Herz- oder Atemwegsproblemen sollten körperliche Aktivitäten unbedingt vermeiden. Achten Sie auf Symptome wie Husten, Halsreizungen und Kurzatmigkeit. Falls Sie sich unwohl fühlen kontaktieren Sie Ihren Arzt. Menschen mit Asthma müssen möglicherweise ihren Inhalator häufiger verwenden.

Health advice and preventive measures for at risk population - ARI
(Children under 15, adults over 65 and people with pre-existing conditions / suffering from chronic cardio-vascular or respiratory diseases)

ARI	Excess health risk from current air pollution	Health advice and preventive measures
0	low	Enjoy your usual outdoor activities. Follow your doctor's advice for exercise.
1		
2		
3		
4	moderate	If you have heart or lung problems, consider reducing strenuous physical outdoors activities, or reschedule to times when the index is lower. Follow your doctor's advice for exercise.
5		
6		
7	high	Children, the elderly and people with heart or lungs problems should reduce physical exertion outdoors and particularly if they experience symptoms or reschedule to periods when the index is lower. Follow your doctor's usual advice. People with asthma may find they need to use their reliever inhaler more often. If symptoms persist seek medical advice.
8		
9		
10	Very high	Health warnings of emergency conditions. Children, the elderly and people with heart or breathing problems should avoid physical activities. People with asthma may find they need to use their reliever inhaler more often. If you feel uncomfortable, contact your doctor or general practitioner.

Umweltmedizinische Verhaltensempfehlungen und Präventionsmaßnahmen Hitze- und Kältestress – UTCI

UTCI (°C)	Thermische Stresskategorie	Umweltmedizinische Verhaltensempfehlungen und Präventionsmaßnahmen
Unter -40	Extremer Kältestress	Extreme Kältewarnung! Bleiben Sie zu Hause. Falls Aufenthalt im Freien erforderlich, verwenden Sie feste und windgeschützte Kleidung. Kopfbedeckung und Handschuhe sind notwendig.
-40 bis -27	Sehr starker Kältestress	Kältewarnung! Reduzieren Sie den Aufenthalt im Freien. Intensivieren Sie ihre körperliche Aktivität und schützen Sie Gesicht und Extremitäten vor Auskühlung. Benutzen Sie wärmende Kleidung. Kopfbedeckung und Handschuhe sind notwendig.
-27 bis -13	Starker Kältestress	Intensivieren Sie ihre körperliche Aktivität und schützen Sie Gesicht und Extremitäten vor Auskühlung. Benutzen Sie wärmere Kleidung.
-13 bis 0	Mäßiger Kältestress	Intensivieren Sie ihre körperliche Aktivität und schützen Sie Gesicht und Extremitäten vor Auskühlung.
0 bis +9	Leichter Kältestress	Benutzen Sie Handschuhe und Kopfbedeckung.
+9 bis +26	Komfortbereich, kein thermischer Stress	
+26 bis +32	Mäßiger Hitzestress	Trinken Sie mehr als 250 ml pro Stunde.
+32 bis +38	Starker Hitzestress	Vermeiden Sie Aufenthalt in der direkten Sonne. Bevorzugen Sie Aufenthalt im Schatten. Reduzieren Sie körperliche Aktivitäten vorübergehend und verschieben Sie diese auf kühlere Morgenstunden. Trinken Sie mehr als 250 ml pro Stunde. Reduzieren Sie Alkohol, bevorzugen Sie leichte Mahlzeiten. Schützen Sie Kinder, alleinstehende ältere und pflegebedürftige Menschen

+38 bis +46	Sehr starker Hitzestress	<p>Hitzewarnung!*</p> <p>Gehen Sie aus der direkten Sonne. Halten Sie sich im Schatten auf. Reduzieren Sie körperliche Anstrengung auf ein Minimum. Kühlen Sie ihren Körper (kalte Arm- und Fußbäder, kühlende Dusche oder Bad). Trinken Sie mehr als 500 ml pro Stunde Verzichten Sie auf Getränke mit Alkohol, Koffein oder viel Zucker. Bevorzugen Sie leichte kleine Mahlzeiten. Essen Sie wasserreiches Obst und Gemüse. Vorübergehende Nutzung einer Klimaanlage, halten Sie Ihre Wohnung kühl. Schützen Sie Ihre Zimmer vor direkter Sonneneinstrahlung. Lüften Sie am besten nur in den kühleren Morgenstunden.</p> <p>Tragen Sie leichte, bequeme und helle Kleidung.</p> <p>Schützen Sie Kinder, alleinstehende ältere und pflegebedürftige Menschen.</p>
über +46	Extremer Hitzestress	<p>Extreme Hitzewarnung!*</p> <p>Kein Aufenthalt in der direkten Sonne. Bleiben Sie im Schatten. Keine körperliche Anstrengung.</p> <p>Kühlen Sie ihren Körper (kalte Arm- und Fußbäder, kühlende Dusche oder Bad). Trinken Sie mehr als 650 ml pro Stunde.</p> <p>Verzichten Sie auf Getränke mit Alkohol, Koffein oder viel Zucker. Bevorzugen Sie leichte und kleine Mahlzeiten, essen Sie wasserreiches Obst und Gemüse. Nutzung einer Klimaanlage, halten Sie Ihre Wohnung kühl. Schützen Sie Ihre Zimmer vor direkter Sonneneinstrahlung. Lüften Sie am besten nur in den kühleren Morgenstunden.</p> <p>Tragen Sie leichte, bequeme und helle Kleidung.</p> <p>Schützen Sie Kinder, alleinstehende ältere und pflegebedürftige Menschen.</p>

*Wenn Sie bei sich oder anderen ungewöhnliche Gesundheitsprobleme wie Kreislaufbeschwerden, Kopfschmerzen, Übelkeit oder Verwirrtheit feststellen, die auf übermäßigen Hitzestress zurückzuführen sind, suchen Sie Schatten auf, lagern Sie den Oberkörper hoch und trinken Sie etwas. Verschaffen Sie etwas Abkühlung, indem Sie beispielsweise ein kühles Tuch auf die Stirn legen. Kontaktieren Sie einen Arzt und zögern Sie nicht, bei Bedarf den Notruf 112 zu wählen.

Über weitere Maßnahmen informiert Sie Ihre zuständige Gesundheitsbehörde.

Health advice and preventive measures. Heat and cold stress – UTCI (English)

UTCI (°C)	Thermal stress category	Health advice, protection measures
below -40	Extreme cold stress	Extreme cold spell warning! Stay at home. If outdoor exposure is necessary, use heavy and wind protected clothing.
-40 to -27	Very strong cold stress	Cold spell warning! Intensify activity and protect face and extremities against cooling. Use warmer clothing. Reduce outdoor exposure time.
-27 to -13	Strong cold stress	Intensify activity and protect face and extremities against cooling. Use warmer clothing.
-13 to 0	Moderate cold stress	Intensify activity and protect face and extremities against cooling.
0 to +9	Slight cold stress	Use gloves and hat.
+9 to +26	Comfort, no thermal stress	
+26 to +32	Moderate heat stress	Drink more than 0.25 liter per hour.
+32 to +38	Strong heat stress	Limit direct sun exposure. Use shaded places. Reduce physical activity temporarily, move it to morning hours. Drink more than 0.25 liters per hour. Limit alcohol, prefer light meals. Protect children, single elderly and people in need of care.

+38 to +46	Very strong heat stress	<p>Heatwave warning! **</p> <p>Avoid direct sun exposure. Shaded places necessary. Reduce physical activity to a minimum.</p> <p>Temporary body cooling recommended. Drink more than 0.5 liters per hour. Avoid alcohol, prefer light meals.</p> <p>Temporary use of air conditioning, keep your apartment cool. Protect your rooms from direct sunlight.</p> <p>Wear light and comfortable clothing.</p> <p>Protect children, single elderly and people in need of care.</p>
above +46	Extreme heat stress	<p>Extreme heatwave warning!</p> <p>No direct sun exposure. Stay in the shaded places. No physical activity. Temporary body cooling and drinking more than 0.65 liters per hour necessary. No alcohol, light meals.</p> <p>Use of air conditioning, keep your apartment cool. Protect your rooms from direct sunlight.</p> <p>Wear light and comfortable clothing.</p> <p>Protect children, single elderly and people in need of care.</p>

** If you or other people experience unusual health problems, such as circulatory problems, headache, nausea, or confusion, which are possibly associated with heat stress, seek shade, raise your upper body, and have a drink. Cool down a bit, for example by placing a cool towel on your forehead. Contact a doctor and do not hesitate to call 112 if necessary.

Your responsible health authority will inform you about further measures.

Umweltmedizinische Verhaltensempfehlungen zum Hitzestress - UTCI

Informationen zum Gesundheitsschutz bei Hitze:

- Tipps für sommerliche Hitze und Hitzewellen, zum vorbeugenden Gesundheitsschutz, Empfehlungen zu Essen und Trinken, zur Kühlung von Räumen und zum Umgang mit Säuglingen und Kleinkindern (UBA und DWD, 2019)
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/190617_uba_fl_tipps_fur_sommerliche_hitze_und_hitzewellen_bf.pdf
- Der Hitzeknigge: Über das richtige Verhalten bei Hitze – Tipps für Ihren Alltag, (UBA, 2019b) https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/364/dokumente/schattenspender_hitzeknigge.pdf
- Allgemeine Verhaltensempfehlungen bei Hitze des Deutschen Wetterdienstes:
https://www.dwd.de/DE/leistungen/hitzewarnung/verhaltensempfehlungen.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Informationen zu gesundheitlichen Auswirkungen sommerlicher Hitze und Hitzewellen und Tipps zum vorbeugenden Gesundheitsschutz (UBA, 2008)
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ratgeber-klimawandel-gesundheit>

Weitere Hitzewarndienste, die für Bayern relevant sind:

- Hitzewarndienst des Deutschen Wetterdienstes, liefert allgemeine bundesweite Warnungen
https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_gemeinden/warnWetter_node.html
<http://www.dwd.de/DE/leistungen/hitzewarnung/hitzewarnung.html>
- Vorhersagesystem für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Hitzewellen (EuroHEAT): <http://www.euroheat-project.org/dwd/index.php>

Umweltmedizinische Verhaltensempfehlungen zum Hitzestress für Risikogruppen-UTCI

Die WHO empfiehlt die besondere Beachtung von Risikogruppen, die bei Hitzeereignissen besonders gefährdet oder besonders schutzbedürftig sind. Die gesundheitlichen Präventionsempfehlungen sollten möglichst zielgruppenspezifisch ausgearbeitet werden.

- Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit (BMU, 2017)
https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/hap_handlungsempfehlungen_bf.pdf
Hierin wird darauf verwiesen, dass folgende Risikogruppen besonderer Beachtung bedürfen: ältere Menschen, isoliert lebende Menschen, pflegebedürftige Menschen, Personen mit starkem Übergewicht, Menschen mit chronischen Erkrankungen, Menschen mit fieberhaften Erkrankungen, Menschen mit Demenz, Menschen, die bestimmte Medikamente einnehmen, Personen, die thermophysiologische Anpassungsprobleme haben, sowie Säuglinge und Kleinkinder. Ferner wird eine Handlungsempfehlung zur Vorbereitung der Gesundheits- und Sozialsysteme gegeben
- In einem Informationsblatt der WHO zum Thema Hitze und Gesundheit (WHO, 2018a): <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-heat-and-health>
- In einer Broschüre der WHO zum Thema Hitzestress sind Informationen für die Öffentlichkeit, Mediziner, medizinische Fachkräfte und Pflegedienste, Alters- und Pflegeheimmanager zusammengefasst (WHO, 2011).
http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0007/147265/Heat_information_sheet.pdf?ua=1

Für Mediziner:

- Trinkempfehlungen bei heißem Wetter und Hitzewellen
- Nebenwirkungen von Medikamenten bei heißem Wetter
- leichte und mittelschwere Hitzeerkrankungen und ihr Management
- Management von lebensbedrohlichem Hitzschlag

Für Gesundheitsbehörden, Alten- und Pflegeheimleiter sowie Arbeitgeber:

- Standards für die Arbeitssicherheit bei Hitzewellen
- Reduzierung der Innentemperaturen bei heißem Wetter
- Risikofaktoren für Hitzekrankheiten und Sterblichkeit

Für medizinische Fachkräfte und Pflegedienste:

- Gesundheitszustände mit hohem Risiko für gesundheitliche Auswirkungen von Hitze

- Spezifische Handlungsempfehlungen auf Deutsch:
http://www.hitze.nrw.de/fuer_pflegekraefte/index.html
http://www.hitze.nrw.de/fuer_alle/index.html
http://www.hitze.nrw.de/fuer_aerzte/index.html
http://www.hitze.nrw.de/info_fuer_oegd/index.html
http://www.nlga.niedersachsen.de/download/12181/Sommerhitze_Hinweise_fuer_Hausaerzte.pdf

Ein gemeinsamer Risikoscore für Hitze-Kältestress und Luftschadstoffe?

Nach dem derzeitigen Stand der Forschung und der gegebenen Datenlage können die beiden aktuellen Risikoscores zu Hitze-Kältestress und Luftschadstoffen nicht ohne weiteres verbessert oder zusammengefasst werden. Jedoch wäre dies das große Ziel und von hoher Priorität, da dies die Kommunikation von Verhaltensempfehlungen weiter vereinfachen würde.

Die wesentliche Innovation in BioClis gelingt durch die verbesserte Quantifizierung der Variabilität der Umweltstressoren und die bessere Kommunikation des Risikos. Studien zu Wechselwirkungen von Umweltstressoren und den entsprechenden Gesundheitsendpunkten wären dazu nötig gewesen, um kombinierte Effekte zu quantifizieren, die den Umfang des Projektes gesprengt hätten. Insbesondere die Kombination von Hitze- und Kältestress und Luftschadstoffen ist komplex (z. B. die Wirkung von Temperatur und Ozon). Vielmehr haben Experten darauf verwiesen, dass die derzeitig verwendeten Risikoscores zu ARI und UTCI und ihre Verhaltensempfehlungen die relevante Information adäquat kommunizieren. Vertreter des Bayerischen Gesundheitsministeriums und des Bayerischen Umweltministeriums teilten die Ansicht, die derzeitigen Bewertungen und Empfehlungen des ARI gemäß dem aktuellen Stand-der-Forschung seien ausreichend. Vielmehr sollten die Risikoscores nicht enger definiert und Handlungsempfehlungen nicht spezifischer gefasst werden. Genauere Empfehlungen soll nur der behandelnde Arzt geben.

Die allgemeinen Handlungsempfehlungen zum ARI wurden daher beibehalten (Sicard et al., 2011). Die Handlungsempfehlungen zum UTCI wurden jedoch aus der umfassenden Literatur (Kapitel 9) neu zusammengestellt (siehe insbesondere WHO, 2018a; Di Napoli et al., 2019; UBA 2019b; UBA und DWD, 2019; UBA, 2008).

Evaluation des online Bioklimatischen Informationssystems durch Testnutzer

Der Webaufttritt von BioClis wurde durch ein breites Spektrum an Nutzern fortlaufend evaluiert und darauf aufbauend verbessert. Die Testnutzer kamen aus den Bereichen Umweltmeteorologie, Umweltmedizin, Informatik, Krankenversicherungswesen, Pädiatrie, Physik, Geographie und Mathematik. Es wurde auch besonderer Wert darauf gelegt die Interessen von behördlichen und politischen Nutzern adäquat umzusetzen. Das Feedback wurde durch Emails, Telefonate oder gezielte Meetings erhoben und mit den Testnutzern iteriert. Die Webseite wird im Rahmen von AlpEnDAC, das den Service nun operationell betreibt, laufend verbessert und intuitiver gestaltet.

6.3 Effekte des Klimawandels in Bayern und Maßnahmen zur Adaption

Obwohl die globale Erwärmung regional Vorteile bringen kann, dürften die gesundheitlichen Auswirkungen eines sich ändernden Klimas überwiegend negativ sein (WHO, 2018b, 2016), die Extreme werden zunehmen und der menschliche Organismus wird vor neue Herausforderungen gestellt. So zeigt Abbildung 21a, wie sich in den letzten 40 Jahren die Zahl der Hitzewellen in den gemäßigten Breiten auf der Nordhalbkugel zusammen mit der Erwärmung der Erdoberfläche kontinuierlich erhöht hat (Küchelbacher, 2020). Dem Klima-Report Bayern 2015 folgend, wird sich die Anzahl der „Heißen Tage“ im Zeitraum 2021-2050 im Mittel von bisher 5 auf bis zu 14 und von 2071-2100 auf bis zu 30 Tage erhöhen (BayStMUV, 2015). Auch die Anzahl der Sommertage mit einem Maximum der Lufttemperatur von über 25°C wird voraussichtlich in Bayern um bis zu 21 Tage (2021-2050) bzw. um bis zu 51 Tage (2071-2100) zunehmen.

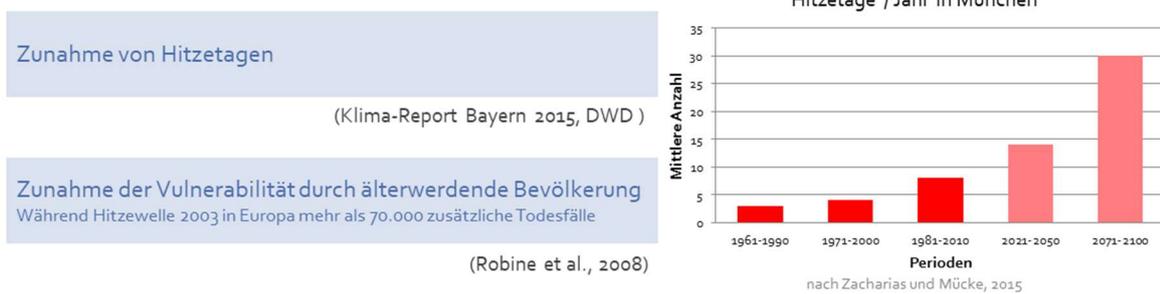


Abbildung 21: Zusammenfassung der Effekte des Klimawandels auf thermalen Stress in Bayern

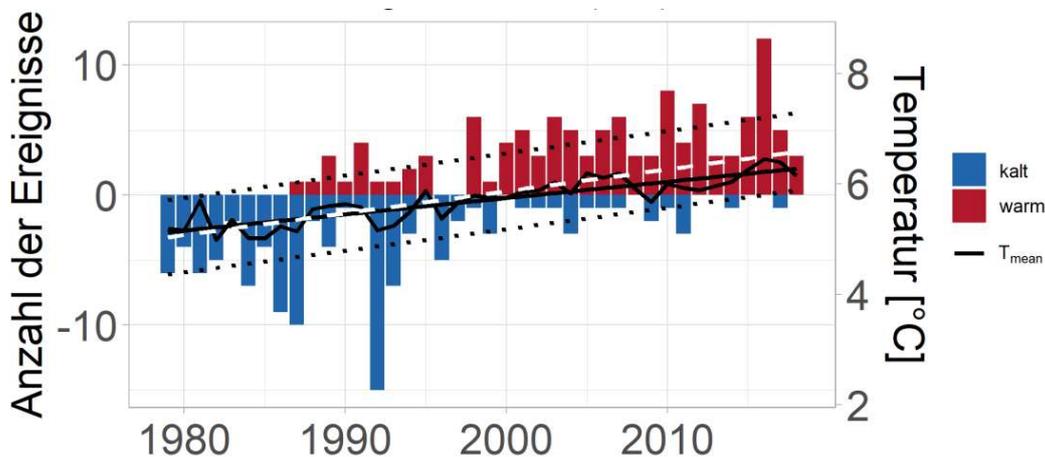


Abbildung 22: Zunahme von Hitzewellen auf der nördlichen Hemisphäre (rote Balken) in den letzten 40 Jahren. Die schwarze Kurve gibt den mittleren Anstieg der Oberflächentemperatur an (Küchelbacher, 2020).

Eine Zusammenfassung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Konzentration von Luftschadstoffen geben Jacob und Winner (2009). Wie oben bereits eingeführt, können austauscharme Wetterlagen mit hohen Temperaturen und Stagnation die Ozonbildung fördern, während z. B. verstärkter Niederschlag und höhere Windgeschwindigkeiten die Feinstaubbelastung senken (Abbildung 23). Wärmeres und trockeneres Klima in Bayern wird

außerdem zu erhöhten Ozonwerten und einer vermehrten Feinstaubbelastung führen (BayStMUV, 2015). Auf der anderen Seite geht man heute davon aus, dass die Grenzschichthöhe im Zuge des Klimawandels ansteigt, was einer Verschlechterung der Luftqualität entgegenwirkt (Rohde, 2017, Zhang et al, 2013).

Durch die erwartete Klimaerwärmung in den gemäßigten Breiten wird sich auch in Bayern die Anzahl der Eistage (Maximum der Lufttemperatur unter 0°C) im Mittel um bis zu 36 Tage (2021-2050) und in der fernen Zukunft (2071-2100) um bis zu 60 Tage reduzieren (BayStMUV, 2015, LfU, 2012). Dies bedeutet eine Verbesserung der Situation für chronisch Atemwegs- und Herz-Kreislaufkranke. Dem zu Folge kann mit weniger umweltbedingten Krankenhauseinlieferungen und Wintertodesfällen in Bayern gerechnet werden.

Mit dem Klimawandel geht zudem eine allmähliche Änderung der Zirkulation in den mittleren Breiten der Atmosphäre einher. So weisen erste Studien darauf hin (Küchelbacher, 2020), dass zukünftig mit einem verstärkten Eintrag ozonarmer Luftmassen in der Stratosphäre über Europa zu rechnen ist. Damit wird eine Erhöhung der gesundheitsschädlichen UV-Strahlung verbunden sein.

Variable	Ozon	Feinstaub
Lufttemperatur	++	-
Stagnation	++	++
Windgeschwindigkeit	-	-
Mischungshöhe	o	--
Luftfeuchte	o	+
Bedeckungsgrad	-	-
Niederschlag	o	--

Jacob and Winner, 2009

Für Bayern: → Erhöhte Ozon- und Feinstaubbelastung durch wärmeres und trockeneres Klima
→ Minderungsmaßnahmen werden in ihrer Wirkung begrenzt

Abbildung 23: Effekte des Klimawandels auf Luftschadstoffe und die konkret erwarteten Auswirkungen auf Bayern

Die Kopplungen zwischen Kurzzeiteffekten der Lufttemperatur auf die Sterblichkeitsrate in Verbindung mit Luftschadstoffen wurden in München, Augsburg und Nürnberg nachgewiesen (Breitner et al., 2014a, b). Den Einfluss von Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Sonneneinstrahlung, Temperatur und Windgeschwindigkeit auf die Anzahl ambulanter Besuche aufgrund einer chronisch obstruktiven Lungenerkrankung in Bayern haben Ferrari et al. (2012) untersucht.

Maßnahmen zur Klimaanpassung

Zu den häufig vorgeschlagenen Maßnahmen, die sich zur Adaption an Hitze und zur Verbesserung der Luftqualität als wirksam erwiesen haben, gehören das Pflanzen von Bäumen, die Gestaltung von Gründächern und eine allgemeine Zunahme von Grünflächen (Susca et al., 2011; Upreti et al., 2017; Oliviera et al., 2011; Santamouris, 2014) sowie die Aufhellung von Straßen, Dächern und Gebäuden zur Erhöhung der Albedo (Kyriakodis und Santmouris, 2018; Radhi et al., 2017) und die Umsetzung von Maßnahmen, die eine bessere

Durchlüftung und schnellere Abkühlung der Stadt erlauben. Zur Klimaanpassung ist insbesondere für die bayerischen Städte eine ausgewogene Mischung aus einer klimasensitiven (climate-sensitive urban design (CSUD)) und einer wassersensitiven Stadtplanung (water-sensitive urban design) notwendig (vgl. Oke, 2017, S. 408). Zur Klimaadaptation und Verbesserung der Luftqualität in Städten gelten naturbasierte Lösungen (nature-based solutions) für innovativ und wirksam (z.B. Kabisch et al., 2017; Faivre et al., 2017; Makido et al., 2019):

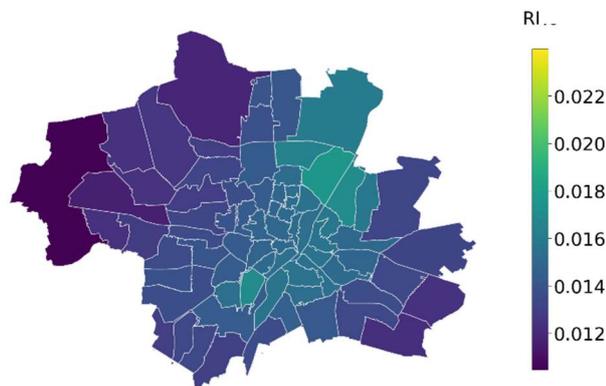
- Technologien wie Gründächer und grüne Wände werden im Kontext der städtischen grünen Infrastruktur als naturbasierte Lösungen empfohlen. Es gibt einen aktiven europäischen Markt für die verfügbare Technologie.
- Die Vision von Städten, gegen den Klimawandel resilient zu sein, kann nur durch die Wahl von „Grün statt Grau“ verwirklicht werden. Im Fokus stehen Regenerierung und Renaturierung grauer Infrastrukturen wie ehemaliger Industrie- und Versiegelungsflächen, die Schaffung und Erhaltung grüner Korridore sowie die Vernetzung mit Grünflächen des Umlands, besonders im Hinblick auf Frischluftschneisen und Kaltluftschneisen (vgl. BayStMUV, 2015, S. 136).
- Derartige Adaptionsmaßnahmen stehen vor mehreren Herausforderungen in der Praxis. Derzeit bestehen finanzielle Hindernisse wie höhere Installations- und Wartungskosten, technische Hindernisse wie Nachrüstungen und Wissensbarrieren in Planung und Gesetzgebung.

Wie könnte der erarbeitete "BioClis Prototyp" auch im innerstädtischen Umfeld eingesetzt werden?

Die Kombination von Satellitendaten mit numerischer Modellierung ermöglicht Analysen in höchster räumlicher und zeitlicher Auflösung sowie die Durchführung von Szenarien (was wäre, wenn?). Wie wirken sich Maßnahmen bei der Verkehrsführung, der Stadtbegrünung oder Klimaanpassung, größere bauliche Veränderungen oder gar die Verkehrswende auf Luftqualität, Stadtklima und assoziierte Gesundheitsrisiken aus?

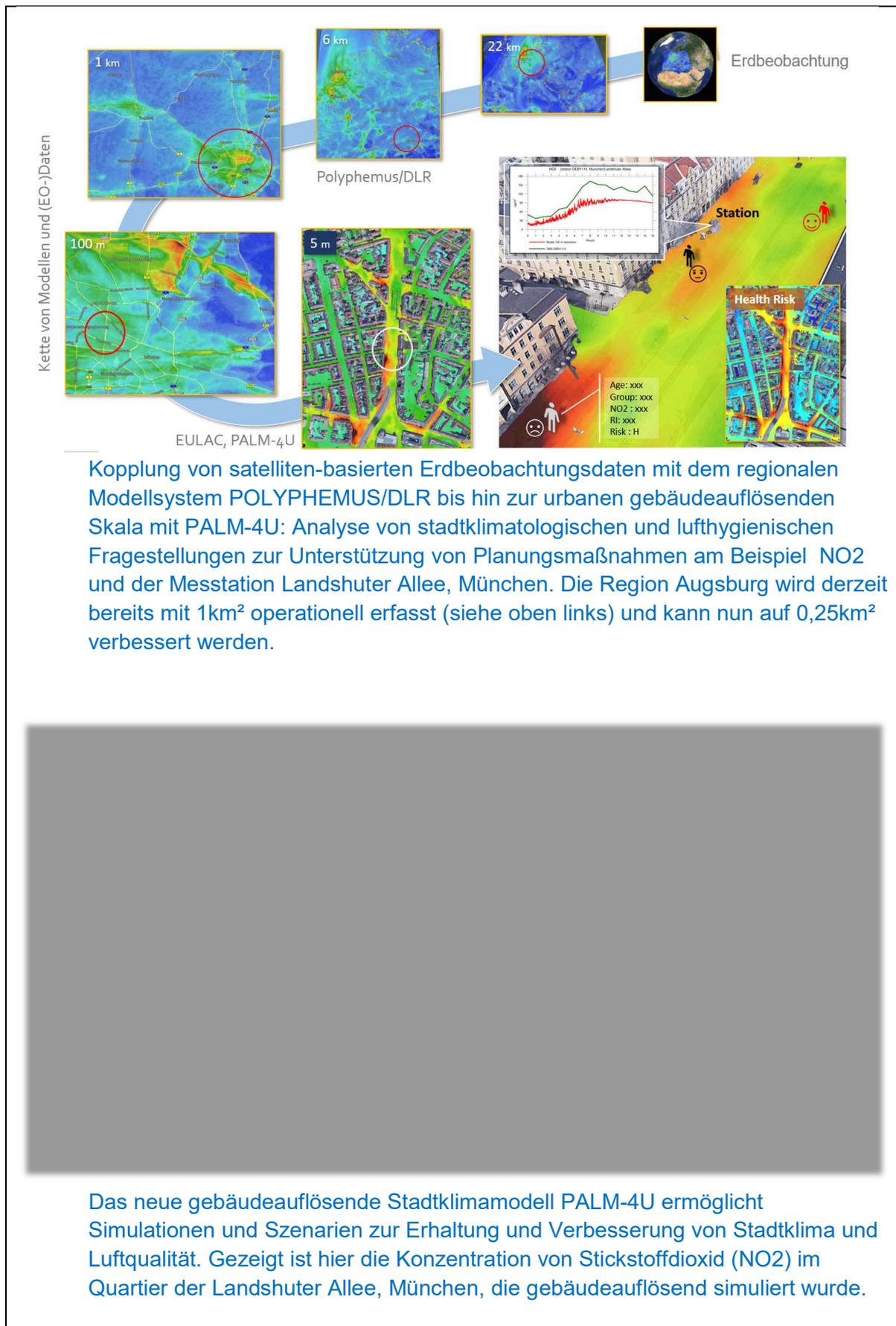
- 1) Satellitendaten können speziell für einzelne Städte in höchster räumlicher Auflösung aufbereitet und ausgewertet werden. In Ergänzung zu boden-gestützten Messungen kann somit die räumliche und zeitliche Variabilität von Umweltstressoren oder der Stadtmorphologie als Grundlage für planerische Maßnahmen erhoben werden.
- 2) Das für BioClis eingesetzte Modellsystem kann in seiner räumlichen Auflösung so verbessert werden, dass auch die innerstädtische Variabilität von Umweltstressoren und Gesundheitsrisiken besser erfasst wird. Basierend auf dem POLYPHEMUS/DLR Modellsystem für Bayern, können die tägliche Luftschadstoff- und Wetterprognose bzw. -analyse für eine Stadt in ihrer räumlichen Auflösung operationell auf z.B. 0,25km² (=500m) verbessert werden.

- 3) Das BioClis-Informationssystem kann durch eine Lupen- oder Zoomfunktion für einzelne Städte erweitert werden. Die täglichen Analysen und Prognosen der Umweltstressoren sowie der assoziierten aggregierten Gesundheitsrisiken für Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen können somit auf der Ebene von Stadtbezirken oder Postleitzahlen täglich als farbcodierte Karten zur Verfügung gestellt werden.



Beispielhafte Darstellung der Erhöhung des Gesundheitsrisikos durch NO₂ für München am 15. Oktober 2020. Aufgetragen ist das relative Risiko (RI) aggregiert auf Postleitzahlengebiete.

- 4) Für gezielte städtische Anwendungen können POLYPHEMUS/DLR und das Wettermodell WRF mit PALM-4U gekoppelt werden. PALM-4U ist ein neues gebäudeauflösendes Stadtklimamodell (Marronga et al., 2020; Erbertseder et al., 2021). Bisher verfügbare Stadtklimamodelle waren entweder zu grobmaschig, um die gerade für die Planung von Maßnahmen zur Erhaltung und Verbesserung des Stadtklimas, zum Klimaschutz und zur Anpassung an den Klimawandel sowie zur Verbesserung der Luftreinhaltung äußerst wichtigen mikroskaligen (Gebäude und Straßenschluchten) und lokalskaligen (Stadtquartiere) Prozesse auflösen zu können, oder sie decken nur kleinere Stadtgebiete ab und können nicht an großräumige numerische Modelle gekoppelt werden, wie sie in der Wettervorhersage oder für regionale Klimaprojektionen zum Einsatz kommen. Die Initialisierung von PALM-4U kann u.a. über Satellitendaten zur 3D-Gebäudestruktur und Landnutzung erfolgen.
- 5) Was wäre, wenn? Szenarien und Fallstudien können durch Einsatz und Kombination von Satellitendaten, POLYPHEMUS/DLR und PALM-4U realisiert werden. Dies umfasst die Planung von Bau- und Verkehrsmaßnahmen zur Erhaltung und Verbesserung des Stadtklimas, zum Klimaschutz und zur Anpassung an den Klimawandel sowie zur Verbesserung der Luftreinhaltung. So können durch Szenarien auch Effekte von Hitzewellen oder Maßnahmen zur Stadtbegrünung quantifiziert werden (Abb. 2).



Es liegen zahlreiche Veröffentlichungen zu den messbaren öffentlichen und privaten Vorteilen von Investitionen in städtisches Grün vor. Bestimmte clevere Anreize könnten die Umsetzung beschleunigen, indem attraktive und einfache Business Cases und Return On Investments (ROI) generiert werden.

Diese konkreten naturbasierten Lösungen führen zur Temperaturverringerung durch Verdunstung und Schattenwurf von Bäumen (Bowler et al. 2010) sowie zur Filtration von Luftschadstoffen durch Pflanzen. Eine energieeffiziente Kühlung durch Grün- und Wasserflächen (green and blue spaces) führt zudem zur Reduzierung des Energiebedarfs. Diese Adaptionsmaßnahmen werden von einigen Co-Vorteilen begleitet, wie der Verbesserung der Naherholung z.B. durch öffentlich zugängliche Dachgärten, der Erhöhung der biologischen Vielfalt durch städtische Bienenzucht und Landwirtschaft, der Schaffung von Gemeinschaftsgärten als Räume für soziales Leben, der Steigerung der Attraktivität der Stadt zugunsten von Wirtschaft und Tourismus sowie der Verbesserung der physischen und psychischen Gesundheit der Bevölkerung. Diese Co-Vorteile von Grünflächen werden aktuell immer öfter in eine umfassendere Vision zur Förderung und Erhaltung der öffentlichen Gesundheit integriert (Jennings et al., 2019).

Erfolgsindikatoren für die Wirksamkeit naturbasierter Klimaanpassungsmaßnahmen mit direktem Gesundheitsbezug sind:

- Abnahme der Luftverschmutzung
- Verringerung der CO₂-Emissionen
- Verbesserung der lokalen Wasserretention mit ihrer kühlenden Wirkung
- Pufferung von Temperaturspitzen, Abmilderung von Hitzetagen
- Zunahme der Menschen, die Rad fahren und laufen
- Abnahme von Atemwegserkrankungen und Fettleibigkeit
- Rückgang der Sterblichkeitsrate älterer Menschen in heißen Sommern
- Entlastung der Gesundheitssysteme

Die Projekte „Planerische Strategien und städtebauliche Konzepte zur Reduzierung der Auswirkungen von klimatischen Extremen auf Wohlbefinden und Gesundheit von Menschen in Städten“ (KLIMES) und das Netzwerk zur Klimaadaptation (KLARA-NET) schlussfolgern für das Handlungsfeld Gesundheit:

„Da ein grundsätzliches Informationsdefizit zum Thema Klimawandel und Gesundheit festgestellt wurde, sind Maßnahmen einer besseren (zielgruppenorientierten) Öffentlichkeitsarbeit vordringlich. Dies geschieht bspw. im Rahmen von Gesundheitstagen, Beiträgen in Mitgliederzeitschriften von Krankenkassen oder gesonderten Flyern, die über richtige Verhaltensweisen bei Hitze informieren. Das regionalisierte Hitzewarnsystem des Deutschen Wetterdienstes, das in Folge des Hitzesommers 2003 im Jahr 2004 eingeführt wurde, dient als gutes Beispiel“ (UBA, 2016).

BioClis schließt eine Informationslücke

Das Vorhaben BioClis schließt eine wesentliche Lücke, da Informationen zur aktuellen Situation und zur Entwicklung des integrierten und aggregierten Gesundheitsrisikos durch atmosphärische Klima- und Umweltparameter nach unserem Wissen für Bayern nicht vorliegen. Eine Vielfalt von Daten und komplexen Zusammenhängen werden in zwei Risikoindizes zusammengefasst und erleichtert somit erheblich die Beurteilung der Gesundheitsrisiken und die Planung von geeigneten Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel. So könnten beispielsweise Stadtplanungen (z.B. Nachverdichtungen, Straßenplanung etc.) unterstützt werden mit dem Ziel, etwa Krankenhäuser, Altenheime, Schulen und Kindergärten vor einer Erhöhung von gesundheitsschädlichen Luftschadstoffansammlungen zu bewahren. Gerade eine mögliche Zunahme von Extremen verlangt diese wissenschaftsbasierten Erkenntnisse. Die Informationen und Vorhersagen können genutzt werden, um präventive Verhaltensmaßnahmen bei Risikopatienten besser zu kommunizieren und deren Lebensqualität zu erhöhen.

Die Ergebnisse von BioClis verdeutlichen, dass die gleiche Exposition zu einer unterschiedlichen Risikobewertung führt und es wird umso deutlicher, dass risikogruppenspezifische Informationen und Empfehlungen in einem bioklimatischen Informationssystem unvermeidbar und unverzichtbar sind. Das allgemeine Risiko, wie es derzeit in verschiedenen Apps oder News kommuniziert wird, ist aufgrund dieser Ergebnisse des BioClis Projekts nicht hilfreich. Teile der Bevölkerung werden unnötig gewarnt, während für bestimmte Risikogruppen nicht eindringlich und zielführend genug informiert wird. Eine allgemeine Bewertung der Luftqualität mit „gut“, „befriedigend“ oder „schlecht“ muss daher hinterfragt werden. Gerade bei der Planung von Maßnahmen zur Minderung von Luftschadstoffen bzw. deren Emissionen muss definiert werden, für welche Risikogruppe die Maßnahmen umgesetzt werden sollen.

Neben der mangelnden Informationslage gibt es auch Bedarf zur Verbesserung des Gesundheitsmanagements. Asthma verursacht beispielsweise in Europa jährlich Kosten im zweistelligen Milliardenbereich, wobei mehr als die Hälfte davon auf Produktivitätsverluste aufgrund schlechter Asthmakontrolle und mangelndem Gesundheitsmanagement zurückzuführen ist (Jackson et al., 2011). Auch direkte Folgen des Klimawandels erfordern ein besseres Gesundheitsmanagement. Während der Hitzewelle des Sommers 2003 in Europa wurden zum Beispiel mehr als 70.000 zusätzliche Todesfälle registriert (Robine et al., 2008). Durch Untersuchungen wurde deutlich, dass viele Menschen unnötigerweise an den Folgen der Hitze, an Herz-Kreislauf-Problemen oder an tödlich verlaufenden Infekten sterben mussten, was die Bedeutung von Informationssystemen wie BioClis unterstreicht. Wie unnötig viele Todesfälle waren, geht aus der Tatsache hervor, dass in Altersheimen die Todesrate mit eingesetztem Personal und medizinischen Möglichkeiten antikorreliert war: in gut ausgestatteten Einrichtungen musste niemand an den Folgen der Hitze sterben (Robine et al., 2008). Informationssysteme wie BioClis können also perspektivisch auch zur Personaleinsatzplanung herangezogen werden.

Was kann BioClis noch nicht?

- BioClis ist in seiner jetzigen prototypischen Entwicklungsstufe nach zwei Jahren Entwicklungszeit noch nicht als umfassendes Patienteninformationssystem geeignet.
- Die umweltmedizinischen Handlungs- und Verhaltensempfehlungen sind so konkret wie nötig und so allgemein wie möglich. Das Informationssystem soll unter keinen Umständen individuelle Gesundheitsempfehlungen liefern, noch einen Arztbesuch ersetzen. Individuelle Gesundheitsempfehlungen gibt nur der Arzt.
- Obwohl eine Vielzahl von Umweltstressoren in nur zwei Indizes zusammengefasst werden und dadurch die Komplexität schon sinnvoll reduziert worden ist, werden Wirkungen von Luftschadstoffen und thermalem Stress derzeit noch vollständig getrennt behandelt.
- Die aggregierte Wirkung von Luftschadstoffen wird additiv (linear) behandelt. Es gibt Hinweise darauf, dass der menschliche Organismus eher nichtlinear reagiert.
- Obwohl die verwendeten Daten der Umweltstressoren eine derzeit hohe räumliche Auflösung aufweisen, können noch keine Expositionen in Straßen oder engen Tälern mit vernünftigem Rechenaufwand bestimmt werden. Der aktuell am DLR in der Erprobung befindliche Prototyp (eine Kombination aus dem POLYPHEMUS/WRF-Modell und dem PALM-Modell (Maronga et al., 2020), der eine räumliche Auflösung von einem Meter und darunter ermöglicht, benötigt derzeit etwa fünf Stunden Rechenzeit (bei 400 CPU's), um zwei Stunden in der Realität für ein Gebiet von einem Quadratkilometer in München selbst bei einer stark vereinfachten Behandlung der chemischen Reaktionen abzubilden. Hier gibt es noch erhebliches Optimierungspotential, um z.B. die Verfahren weiter zu parallelisieren und intelligente Parametrisierungen zu entwickeln. Gerade im städtischen Umfeld werden daher mit dem aktuellen System eher Hintergrundkonzentrationen repräsentiert, so dass die wahre Exposition durchaus etwas höher oder niedriger liegen kann.

6.4 BioClis Community Workshops

Um die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Projekts „Bioklimatisches Informationssystem Bayern (BioClis)“ laufend an die umweltmedizinischen Erkenntnisse und politischen Anforderungen anzupassen, wurden zwei Community Workshops realisiert:

1. Community Workshop als Side Event des VAO-Symposiums 2018, 13-15 März, Grenoble.
2. Community Workshop am 25. November 2019, UNIKA-T, Augsburg.

An den Workshops nahmen zahlreiche Personen aus Wissenschaft, Gesellschaft und Politik teil, um über die aktuelle Entwicklung des Projekts „Bioklimatisches Informationssystem Bayern (BioClis)“ zu diskutieren. Konkrete Zielsetzungen der Workshops und deren Vereinbarungen umfassten:

- Präsentation der Projektergebnisse sowie des webbasierten BioClis Informationssystems als Service der UFS.
- Sammlung von Feedback von Umweltmedizinern und Entscheidungsträgern zur weiteren Anpassung des BioClis an den aktuellen politischen Bedarf und Berücksichtigung der aktuellen umweltmedizinischen Erkenntnisse.
- Diskussion von Möglichkeiten zur besseren Abschätzung des durch Umweltstressoren verursachten zusätzlichen Gesundheitsrisikos durch Einsatz moderner statistischer Verfahren, durch Methoden des maschinellen Lernens und durch Entwicklung eines makroskopischen biophysikalischen Modells.
- Beurteilung der Information nach umweltmedizinischen Gesichtspunkten. Für spezifische Erkrankungen sollen je nach Gesundheitsrisiken nach Möglichkeit Empfehlungen zum Verhalten und für Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel erarbeitet und kommuniziert werden.
- Möglichkeiten einer informationstechnischen Erweiterung des BioClis durch Einbindung weiterer Informationsebenen und Daten mit dem Ziel der Schaffung eines umfassenderen bioklimatischen Informationssystems zur Förderung der präventiven Medizin und besseren Anpassung an den Klimawandel, das die Bayerischen Bürger über ihr Umwelt- und Gesundheitsrisiko aufklärt.
- Möglichkeiten zur Verstetigung des Betriebs des BioClis.
- Verabschiedung von Empfehlungen und möglichen nächsten Schritten.



Abbildung 24: Das Foto zeigt die Teilnehmenden am BioClis Community Workshop 2. (Foto: UNIKA-T)



Abbildung 25: Das Foto zeigt die Veranstalter und Teilnehmenden des BioClis Community Workshops 2 am UNIKA-T vom 25.11. 2019 mit Vertretern des Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, des Bayerischen Staatsministeriums für Gesundheit und Pflege, des Landesamts für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, des Landesamts für Umwelt, sowie den Projektpartnern Universität Augsburg, Technische Universität München, Leibniz Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

7 Darstellung des Nutzens im Rahmen der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie

In der Bayerischen Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS) (BayStMUV, 2016) werden bereits bestehende als auch mögliche Klimaanpassungsmaßnahmen in Bayern unter Berücksichtigung ihrer Wirksamkeit, Umsetzung, Dringlichkeit, Verantwortlichkeit, Umsetzungsgrundlage und intersektoralen Vernetzung zwischen den Handlungsfeldern vorgestellt. BioClis trägt dabei direkt zu folgenden Schwerpunkten bei:

- Ausweitung der bayerischen Warn- und Informationsdienste durch das online Bioklimatische Informationssystem BioClis.
- Verringerung der Folgen von Hitzebelastung durch die Unterstützung in der Umsetzung des Schwerpunktthemas „Hitzewarnsystem zum Schutz der Bevölkerung“.
- Verringerung der Folgen von Atembeschwerden durch bodennahes Ozon durch Vorhersage und Kommunikation des aggregierten Risikoindex durch Luftschadstoffe und präventiver Maßnahmen.
- Weiterentwicklung von Forschung und Monitoring zu Auswirkungen des Klimawandels auf Morbidität und Mortalität.
- Weiterentwicklung einer nachhaltigen IT-Infrastruktur für klimarelevante Forschung und Informationsdienste in der UFS.

BioClis liefert zudem innovative Informationsgrundlagen und Methoden zur Schaffung einer nachhaltigen und klimaschonenden Siedlungsentwicklung, Verkehrsinfrastruktur, Energieproduktion und Tourismuswirtschaft, sowie Möglichkeiten den Erfolg von Klimaanpassungsmaßnahmen zu evaluieren.

Im Handlungsfeld menschliche Gesundheit adressiert BioClis mit den Themen „Hitzebelastung“ sowie „Atembeschwerden durch bodennahes Ozon“ zwei Bereiche, die in ihrer Klimawirkung in der Gegenwart als „hoch“ und „mittel“ und in der nahen Zukunft bei einem starken Klimawandel beide als „hoch“ eingestuft werden (siehe Abbildung 26).

Klimawirkung	Gegenwart	Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel
Hitzebelastung	hoch	mittel	hoch
Atembeschwerden durch bodennahes Ozon	mittel	mittel	hoch
Produktionsfunktionen (Standortstabilität, Bodenfruchtbarkeit)	mittel	mittel	mittel
Überträger von Krankheitserregern	gering	gering	gering
Längere Pollensaison	mittel	mittel	mittel

Abbildung 26: Bedeutung der Klimawirkung im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ für die Gegenwart und nahe Zukunft (2021 bis 2050) unter einem schwachen und einem starken Wandel gemäß der Vulnerabilitätsstudie des Bundes (BayStMUV, 2016, S. 106)

Für die Bayerische Klima-Anpassungsstrategie unterstützt BioClis die Umsetzung und das Monitoring der Klimaanpassungsmaßnahmen im Schwerpunkt Wetterereignisse und nicht-infektiöse Krankheiten (WK) (BayStMUV, 2016, S. 111-112).

Bei den allgemeinen Maßnahmen im Handlungsfeld menschliche Gesundheit (AG) liefert BioClis Informationen zur Aufklärung der Bevölkerung und für medizinisches Pflege- und Fachpersonal (BayStMUV, 2016, S. 113).

Der konkrete Nutzen durch BioClis soll im Folgenden schlaglichtartig beleuchtet werden:

Ausweitung der bayerischen Warn- und Informationsdienste

- Das Bioklimatische Informationssystem BioClis schließt eine Lücke, da flächendeckende Informationen zur aktuellen Situation und Vorhersage von Umweltstressoren und aggregierten Gesundheitsrisiken nach unserem Wissen für Bayern nicht vorliegen.
- Integrierte, aggregierte, tagesaktuelle und zielgerichtete Informationen zur Erhöhung von Gesundheitsrisiken durch atmosphärische Umweltstressoren erweitern das Informationsspektrum für die Bayerische Staatsregierung, das Gesundheitswesen (Ärzte, Apotheker, Krankenhäuser), die allgemeine Bevölkerung sowie die umweltmedizinische und epidemiologische Forschung.
- Alle Informationsprodukte sind auch aggregiert auf Landkreisebene verfügbar und tragen somit zur Erhöhung der Akzeptanz in Politik und Bevölkerung bei.
- In BioClis kommen für Politik und Praxis veredelte und integrierte Produkte umweltmeteorologischer Parameter zum Einsatz, in denen in-situ Messungen, Satellitendaten und numerische Modelle synergistisch verarbeitet werden (u.a. des Copernicus Atmosphärendienstes). Bayern kann so von wegweisenden europäischen Entwicklungslinien profitieren (Copernicus 2017a, 2017b).
- Eine Vielfalt von Daten und komplexen Zusammenhängen werden in zwei Risikoindizes zusammengefasst und erleichtern somit erheblich die Beurteilung der Gesundheitsrisiken und die Planung von geeigneten Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel.
- BioClis ist ein erster Schritt hin zu einem Informationssystem zur Förderung der präventiven Medizin, das den Bayerischen Bürger über sein Umwelt- und Gesundheitsrisiko aufklärt und ihn zu Verhaltensanpassungen ermuntert und informiert.
- BioClis bietet einen weiteren Baustein zur Förderung von eigenverantwortlichem und proaktivem Verhalten und Handeln bei der Anpassung an den Klimawandel.

Verringerung der Folgen von Hitzebelastung

- Bewertung und Prognose thermaler Belastung (Hitzestress, Kältestress).
- Bayernweite Berechnung des Universellen Thermalen Klima Index (UTCI) unter Berücksichtigung von Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit (Windchill) und Strahlungstemperatur.

- Kommunikation von Hitze- und Kältestress als farbcodiertem Index mit konkreten Verhaltensempfehlungen und umweltmedizinischen Verweisen für die Öffentlichkeit, Mediziner, medizinische Fachkräfte und Pflegedienste, Alters- und Pflegeheimmanager.
- Veröffentlichung von Informationsprodukten zur Hitzebelastung auch aggregiert auf Landkreisebene und damit Erhöhung der Akzeptanz in Politik und Bevölkerung
- Unterstützung einer effizienteren Personaleinsatz-Planung im Gesundheitswesen (v.a. Anpassung von Dienstplänen und Kapazitäten in Umweltambulanzen und Notfalldiensten).

Verringerung der Folgen von Beschwerden durch Luftschadstoffe

- Bewertung und Prognose des aggregierten Gesundheitsrisikos für verschiedene Altersklassen und Vorerkrankungen unter Verwendung von relativen Risiken.
- Veröffentlichung von flächendeckenden Daten zur Luftschadstoffverteilung in Bayern zusammengefasst in einem Index (ARI), ohne verwirrende Vielzahl von Luftschadstoffkonzentrationen.
- Veröffentlichung von Informationsprodukten zur Belastung durch Luftschadstoffe aggregiert auf Landkreisebene und damit Erhöhung der Akzeptanz in Politik und Bevölkerung.
- Kommunikation von Risikobewertungen mit Handlungsempfehlungen zu präventiven Verhaltensmaßnahmen.
- Information zur Planung und Umsetzung präventiver Maßnahmen für Risikogruppen (Personen ab 65, Kinder, Personen mit Vorerkrankungen im Spektrum von Herz-Kreislauf- und Atemwegs-Erkrankungen) wie Verhaltensänderungen, rechtzeitige Beschaffung und Einnahme von Medikamenten.
- Unterstützung bei der Planung und Logistik zur Bestellung von Medikamenten für Apotheken.
- Unterstützung zur effizienteren Personaleinsatz-Planung im Gesundheitswesen (v.a. Anpassung von Dienstplänen und Kapazitäten in Umweltambulanzen und Notfalldiensten).
- Beitrag zur Erhöhung der Lebensqualität für Senioren und Menschen mit Vorerkrankungen (Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen).
- Beitrag zur Senkung der Kosten im Gesundheitssystem durch Förderung pro-aktiver und präventiver Maßnahmen.

Forschung und Monitoring zu Auswirkungen des Klimawandels auf Morbidität

- Flächendeckende Bewertung des aggregierten Gesundheitsrisikos durch die Luftschadstoffe O₃, NO₂, PM_{2.5} und PM₁₀ für Bayern im Zeitraum 2010 bis 2016 für verschiedene Gesundheitsendpunkte.
- Flächendeckende Analyse und Prognose der aktuellen Erhöhung von Gesundheitsrisiken in Bayern durch Luftschadstoffe.
- Beiträge zur Bewertung und Erforschung der Wirkung des Klimawandels auf Gesundheitsrisiken in Bayern durch Integration von verschiedenen Datenquellen (in-situ Daten, Modellergebnisse und Satellitenbeobachtungen).

- Schaffung der methodischen und informationstechnischen Basis für ein weiterführendes personalisiertes Gesundheitssystem.
- Implementation von Methoden, um den Erfolg von Klimaanpassungsmaßnahmen zu evaluieren.

Weiterentwicklung einer nachhaltigen IT-Infrastruktur für klimarelevante Forschung

- Weiterentwicklung des AlpEnDAC als nachhaltige IT-Infrastruktur für klimarelevante Forschung und Informationsdienste als Beitrag der UFS und des VAO.
- Entwicklung von modularen und flexiblen Schnittstellen und Datenprozessoren für den harmonisierten Zugang zu verschiedensten Umwelt-, Klima- und Gesundheitsdaten.
- Weiterentwicklung eines skalierbaren Datenmanagementsystems des AlpEnDAC zum Austausch von Daten aus verschiedensten Quellen, zur Einbindung weiterer Daten, die spätere Erweiterung von BioClis um zusätzliche Parameter und Informationsprodukte, sowie die Nutzung durch weitere Forschungsprojekte des VKG.
- Entwicklung und Vorbereitung von Schnittstellen und Prozessoren zum verzögerungsfreien Anstoßen weiterer Datenverarbeitungsschritte bis hin zu Informationsdiensten an die Bevölkerung bei Gesundheitsrisiken.
- Schaffung der informationstechnischen Basis für ein weiterführendes personalisiertes Gesundheitssystem.
- Realisierung eines ersten Schrittes hin zu einem Informationssystem zur Förderung der präventiven Medizin und zur besseren Anpassung an den Klimawandel in Bayern.

Schaffung einer nachhaltigen und klimaschonenden Siedlungsentwicklung

- Schaffung innovativer Informationsgrundlagen und Methoden als möglichen Beitrag zur Planung und Umsetzung einer nachhaltigen und klimaschonenden Siedlungsentwicklung, Verkehrsinfrastruktur, Energieproduktion und Tourismuswirtschaft.
- Bewertung des aggregierten Gesundheitsrisikos in München und innerstädtischer Differenzierung durch Auswertung von Zeitreihen des Lufthygienischen Überwachungssystems Bayern.
- Unterstützung in der Planung, Umsetzung und Erfolgskontrolle von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel.
- Unterstützung eines modernen Städtebaus, einer klimaresilienten Stadtplanung und der Anpassung des Stadtklimas durch Umweltdaten.
- Mögliche Nutzung der in BioClis entwickelten Methoden zur Berechnung von Gesundheitsindizes als Planungswerkzeug des modernen Städtebaus, bei welchem Gesundheitsökonomie und die Folgen des Klimawandels bedacht werden können (z.B. geeignete Standorte für Krankenhäuser, Altenheime, Kindergärten, Bildungseinrichtungen, Auswirkung von Baumaßnahmen auf Belüftung und Schadstofftransport).

Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur Umsetzung von BayKLAS im Kontext BioClis

- Anpassung des Bioklimatischen Informationssystems nach Anforderungen des BayStMUV und des BayStMGP.
- Weiterentwicklung des BioClis Prototypen zu einem operationellen Service der UFS.
- Evaluierung des aggregierten Risiko Index in seiner räumlichen und zeitlichen Variabilität mit Gesundheitsdaten (hierzu sollen Fallzahlen des medizinischen Diagnoseklassifikationssystems ICD-10 (englisch für International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems) ausgewertet werden).
- Evaluierung des Bioklimatischen Informationssystems und der prognostizierten Risikoerhöhungen durch Citizen Science und Rückmeldungen.
- Anpassung der relativen Risikowerte und Koeffizienten für Bayern basierend auf den Ergebnissen der Evaluierung.
- Spezifizierung von risikogruppen-spezifischen Handlungsempfehlungen zur gesundheitlichen Vorsorge basierend auf den Ergebnissen der Evaluierung.
- Quantifizierung des aggregierten Risikos unter Wechselwirkungen bzw. Kopplung von Luftschadstoffen und thermalem Stress.
- Entwicklung eines makroskopischen biophysikalischen Modells (basierend auf thermodynamischen Größen wie Temperatur, Druck, Dichte), mit dem der Einfluss von Umweltstressoren auf das Wohlbefinden zukünftig vielleicht genauer berechnet werden kann.
- Verbesserte Bestimmung der Exposition der Bayerischen Bevölkerung durch Einsatz verbesserter Modelle und Methoden vor allem in Städten (verbesserte räumliche Auflösung, Berücksichtigung von Straßenschluchteneffekten).
- Implementation eines Nests für München mit hoher räumlicher Auflösung inklusive Lupenfunktion für die Landeshauptstadt.
- Berechnung von Szenarien für verschiedene Ausprägungen des Klimawandels in Bayern.

Welche Maßnahmen wären notwendig um BioClis für BayKLAS umzusetzen?

Maßnahme 1: Weitere Operationalisierung von BioClis bzw. Stabilisierung des operationellen Betriebs; Erhöhung der Ausfallssicherheit durch redundante Systeme und Backups, Dokumentation des operationellen Prozessors und Schnittstellen.

Maßnahme 2: Definition und Ausarbeitung des Informationsdienstes bzw. Einbettung in die Kommunikationsstrategie Bayerns. Realisierung der medialen Information für relevante Medien und Verstärker (Interessensverbände, Gemeinden, Gesellschaften).

Maßnahme 3: Verbreiterung der Datenbasis in BioClis um weitere Informationsebenen wie Pollen (ePIN) oder sozioökonomische Daten (Bevölkerungsdichte, Altersstruktur).

Maßnahme 4: Verfeinerung der räumlichen Auflösung z.B. in Städten (Lupen- bzw. Zoomfunktion für die Landeshauptstadt).

Maßnahme 5: Evaluierung des aggregierten Risikos in seiner räumlichen und zeitlichen Variabilität durch Vergleich mit Gesundheitsdaten wie Inzidenzen und Prävalenzen

verschiedener Erkrankungen nach medizinischem Diagnoseklassifikationssystem ICD-10 (englisch für International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems).

- ➔ Erstellung eines dedizierten Arbeits- und Zeitplans gemäß Umsetzung von BayKLAS (Vergleiche auch Seite 52/53).

Danksagung

Wir bedanken uns herzlich beim Bayerischen Staatsministerium für Umwelt- und Verbraucherschutz, dem Bayerischen Staatsministerium für Gesundheit und Pflege, dem Bayerischen Landesamt für Umwelt und dem Bayerischen Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit für die fachliche Begleitung und konstruktiven Gespräche.

BioClis wurde im Rahmen des Verbundprojekts Klimawandel und Gesundheit (VKG) durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt- und Verbraucherschutz und das Bayerische Staatsministerium für Gesundheit und Pflege gefördert (Förderkennzeichen: K3-8503-PN 17-13).

8 Glossar

AlpEnDAC Alpine Environmental Data and Analysis Centre

Bei AlpEnDAC handelt es sich um eine Forschungsdatenmanagement- und Analyseplattform für Forschungseinrichtungen rund um die Alpen und verwandte Bergregionen. Es ist Teil des technischen Rahmens der Bayerischen Umweltforschungsstation Schneefernerhaus/Zugspitze (UFS) und dient als informationstechnische Infrastruktur für das virtuelle Alpenobservatorium VAO (<https://www.alpendac.eu>).

ARI Aggregate Risk Index

Der ARI beschreibt einen Algorithmus zur Berechnung des aggregierten Gesundheitsrisikos, das durch Luftschadstoffe hervorgerufen wird. Angabe des Risikos anhand einer Skala von 0 bis 10 (Sicard et al., 2012).

CAMS Copernicus Atmosphere Monitoring Service

CAMS liefert konsistente und qualitätsgeprüfte globale Informationen in Bezug auf Luftverschmutzung und Gesundheit, Solarenergie, Treibhausgase und Klimawandel. Er ist einer von sechs Diensten, die Copernicus, das Erdbeobachtungsprogramm der Europäischen Union, bilden und wird vom European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) im Auftrag der Europäischen Kommission umgesetzt [30]. Es werden tagesaktuelle, Vorhersage- und Reanalyse-Daten zur Verfügung gestellt (<https://atmosphere.copernicus.eu/>).

LfU Bayerisches Landesamt für Umwelt
<https://www.lfu.bayern.de>

- LGL Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit
<https://www.lgl.bayern.de/>
- LÜB Lufthygienisches Überwachungssystem Bayern
LÜB steht für ein System aus 54 Messstationen (Stand 2018) zur Erfassung der Luftschadstoffbelastung in ländlichen Bereichen (großräumige Hintergrundbelastung), Industriegebieten sowie an verkehrsbelasteten Straßen in der Innenstadt (Hot Spots). Neben den Luftschadstoffen werden noch meteorologische Daten erfasst sowie der Staub auf seine Inhaltsstoffe analysiert. Durch mobile Messungen mit Luftmessfahrzeugen und durch Ausbreitungsrechnungen werden die Daten ergänzt. U.a. werden so die Schadstoffkonzentrationen auf Grenzwertüberschreitungen hin überprüft (<https://www.lfu.bayern.de/luft/immissionsmessungen/doc/lueb.pdf>).
- POLYPHEMUS/DLR Modellsystem zur Luftqualitätsmodellierung
3D-Chemietransportmodell, angetrieben durch das WRF-Wettermodell. Es werden zwei Gaußsche und zwei Eulersche Modelle verwendet. Die Struktur des Systems umfasst vier unabhängige Ebenen mit Daten-Management, physikalischen Parametrisierungen, numerischen Lösungsverfahren und Datenassimilation. Es sollen damit der Umfang und die Fähigkeiten moderner Luftqualitätssysteme abgedeckt werden (Mallet et al., 2007).
- RR Relatives Risiko
Das relative Risiko wird in der deskriptiven Statistik verwendet und berechnet sich in der Medizin aus dem Verhältnis der Erkrankungswahrscheinlichkeit für eine Gruppe, die einem bestimmten Risikofaktor ausgesetzt ist, zu der einer Gruppe, die dem Risikofaktor nicht ausgesetzt ist.
- StMGP Bayerisches Staatsministerium für Gesundheit und Pflege
<https://www.stmgp.bayern.de/>
- StMUV Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
<https://www.stmuv.bayern.de/>
- UFS Umweltforschungsstation Schneefernerhaus
Bei der UFS handelt es sich um eine Einrichtung für die Erforschung des Klimawandels, der Geo- und Biosphäre sowie umweltmedizinischer Fragestellungen. Es werden Luftschadstoffe, Klimagase, Wetter- und Naturphänomene observiert. Sie ist mit 2.650 m Höhe Deutschlands höchstgelegene Forschungsstation und bietet aufgrund ihrer Höhe günstige

Bedingungen für kontinuierliche Atmosphärenerkundungen. Neben der Forschung stellt sie auch ein Kommunikations- und Tagungszentrum für Lehre, Bildung und Nachhaltigkeitsstrategien dar (<https://www.schneefernerhaus.de/startseite.html>).

UTCI Universal Thermal Climate Index

Der UTCI dient der Berechnung der Äquivalenttemperatur/gefühlten Temperatur basierend auf Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit (<http://www.utci.org>).

VAO Virtual Alpine Observatory – Virtuelles Alpenobservatorium

Das VAO ist ein Netzwerk von europäischen hochalpinen Forschungsstationen in den Alpen und ähnlichen Gebirgszügen und umfasst bisher acht Länder (Österreich, Frankreich, Deutschland, Georgien, Italien, Norwegen, Slowenien und der Schweiz). In interdisziplinärer Zusammenarbeit werden wissenschaftliche Probleme in Bezug auf Atmosphäre, Biosphären-, Hydrosphären- und Kryosphären-Systeme sowie die möglichen Auswirkungen von Umwelteinflüssen auf die Gesundheit eingehend behandelt. Untersucht wird zu diesem Zweck die Alpenregion, da diese besonders empfindlich auf Klimaveränderungen reagiert (<https://www.vao.bayern.de>).

WHO World Health Organisation - Weltgesundheitsorganisation

Die WHO ist eine spezialisierte Organisation der Vereinten Nationen, die sich mit internationaler öffentlicher Gesundheit befasst, und ist Mitglied der Entwicklungsgruppe der Vereinten Nationen. Ziel der WHO ist es, mehr Menschen eine universelle Gesundheitsversorgung zu bieten, sie vor gesundheitlichen Notfällen zu schützen und allgemein für mehr Gesundheit und Wohlbefinden zu sorgen (<https://www.who.int/>).

WRF Weather Research and Forecasting Modell - Wettervorhersagemodell

Das Wetterforschungs- und Prognosemodell (WRF) ist ein numerisches Wettervorhersagesystem, das sowohl für atmosphärische Untersuchungen als auch für operationelle Vorhersageanwendungen entwickelt wurde (Skamarock et al., 2008; NCAR, 2019). WRF kann Simulationen basierend auf den tatsächlichen atmosphärischen Bedingungen (d. h. aus Beobachtungen und Analysen) oder idealisierten Bedingungen erzeugen. Das System verfügt über zwei dynamische Kerne: ein Datenassimilierungssystem und eine Softwarearchitektur, die die parallele Berechnung und Systemerweiterung unterstützt. (<https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>).

9 Literaturverzeichnis

- Åströma, D.O., Forsberg, B., Rocklövab, J. (2011), Heat wave impact on morbidity and mortality in the elderly population: A review of recent studies. *Maturitas*, 69, 99–105.
- Backer, H.D., Shlim, D.R. (2019), Problems with Heat and Cold [website]. Atlanta, GA: U.S. Centers for Disease Control and Prevention. Available: <https://wwwnc.cdc.gov/travel/yellowbook/2020/noninfectious-health-risks/extremes-of-temperature> [30.05.2020]
- BayStMUV, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2015), Klima Report Bayern 2015, <https://www.stmuv.bayern.de/themen/klimaschutz/forschung/klimareport2015.htm> [30.05.2020]
- BayStMUV, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2016), Bayerische Klima-Anpassungsstrategie, Ausgabe 2016. https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/stmuv_klima_009.htm [30.05.2020]
- Beelen, R. et al. (2014), Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. *Lancet*, 383(9919), 785-795.
- Berko J. et al. (2014), Deaths attributed to heat, cold, and other weather events in the United States, 2006–2010. National Health Statistics Reports, No. 76. Hyattsville, MD: National Center for Health Statistics, U.S. Centers for Disease Control and Prevention. Available: <http://www.cdc.gov/nchs/data/nhsr/nhsr076.pdf> [30.05.2020]
- Bobb, J.F., Peng, R., Bell, M., Dominici, F. (2014), Heat-related mortality and adaptation to heat in the United States. *Environ Health Perspectives*, 122(8), 811–816. doi:10.1289/ehp.1307392.
- Boldo, E., Medina, S., LeTertre, A., Hurley, F., Mücke, H.G., Ballester, F., Aguilera, I., Eilstein, D. (2006), Health impact assessment of long-term exposure to PM_{2.5} in 23 European cities. *European Journal of Epidemiology*, 21(6), 449-458.
- Bouchama, A., Knochel, J.P. (2002), Heat stroke. *N Engl J Med*, 346(25), 1978–1988. doi:10.1056/NEJMra011089.
- Bowler, D., Buyung-Ali, L., Knight, T., Pullin, A. (2010), A systematic review of evidence for the added benefits to health of exposure to natural environments. *BMC Public Health*, 10, 456. <https://doi.org/10.1186/1471-2458-10-456>.
- Breitner, S., Wolf, K., Devlin, R.B., Diaz-Sanchez, D., Peters, A., Schneider, A.E. (2014a), Short-term effects of air temperature on mortality and effect modification by air pollution in three cities of Bavaria, Germany: A time-series analysis. *Sci. Total Environ.*, 485-486, 49-61.
- Breitner, S., Wolf, K., Peters, A., Schneider, A.E. (2014b), Short-term effects of air temperature on cause-specific cardiovascular mortality in Bavaria, Germany. *Heart* 100, 1272-1280.
- Bröde, P., Fiala, D., Blazejczyk, K., Epstein, Y., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Richards, M., Rintamäki, H., Shitzer, A., Havenith, G. (2009), Calculating UTCI Equivalent

- Temperature - in: Castellani, J.W and Endrusick, T.L. eds. Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Ergonomics, USARIEM, Natick, MA.
- Brown, J.S. (2015), Nitrogen dioxide exposure and airway responsiveness in individuals with asthma. *Inhalation Toxicology*, 27(1), 1-14.
- Brunekreef, B. et al. (2009), Effects of long-term exposure to traffic-related air pollution on respiratory and cardiovascular mortality in the Netherlands: The NLCS-AIR Study. Health Effects Institute, Boston, MA.
- CCSP, US Climate Change Science Program (2008), Weather and climate extremes in a changing climate. Synthesis and Assessment Product 3.3.
- CDC, U.S. Centers for Disease Control and Prevention (2019), Hypothermia. Atlanta, GA, <https://www.cdc.gov/disasters/winter/staysafe/hypothermia.html> [30.05.2020]
- Cairncross, E.K., John, J., Zunckel, M. (2007), A novel air pollution index based on the relative risk of daily mortality associated with short-term exposure to common air pollutants. *Atmospheric Environment*, 41, 8442-8454.
- Cesaroni, G. et al. (2013), Long-term exposure to urban air pollution and mortality in a cohort of more than a million adults in Rome. *Environ Health Perspectives*, 121(3), 324-31.
- Clifford, A. et al. (2016), Exposure to air pollution and cognitive functioning across the life course – A systematic literature review. *Environmental Research*, 147, 383-398.
- Copernicus Programm zur Erdbeobachtung (2017a), <http://www.copernicus.eu/> [30.05.2020]
- Copernicus Programm zur Erdbeobachtung in Deutschland (2017b), <http://www.d-copernicus.de/> [30.05.2020]
- Corrigan, A.E. et al. (2018), Fine particulate matters: The impact of air quality standards on cardiovascular mortality. *Environmental Research*, 161, 364-369.
- De Bord, D. G., Carreón, T., Lentz, T. J., Middendorf, P. J., Hoover, M. D., Schulte, P. A. (2016), Use of the "Exposome" in the Practice of Epidemiology: A Primer on -Omic Technologies. *American Journal of Epidemiology*, 184(4), 302–314. <https://doi.org/10.1093/aje/kwv325>
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (o.J.), Verhaltensempfehlungen bei Hitze. [Online] o.J. https://www.dwd.de/DE/leistungen/hitzewarnung/verhaltensempfehlungen.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [30.05.2020]
- Di, Q. et al. (2017), Air Pollution and Mortality in the Medicare Population. *New England Journal of Medicine*, 376(26), 2513-2522.
- Di Napoli, C., F. Pappenberger, Cloke, H. L. (2019), Verification of Heat Stress Thresholds for a Health-Based Heat-Wave Definition. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 58, 1177–1194. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-18-0246.1>.
- Erbertseder, T. (2013a), Take a deep breath with Myair Services – success stories in: Window on Copernicus, 44-51, <https://www.copernicus.eu/sites/default/files/2018-11/G4R-2013-UK-2407.pdf> (Englisch) [30.05.2020]

Erbertseder, T. (2013b), Tief durchatmen mit Myair – in: Window on Copernicus (in Deutsch), 44-51, <https://www.copernicus.eu/sites/default/files/2018-11/G4R-2013-DE-2607.pdf> [30.05.2020]

Erbertseder, T., Taubenböck, H., Meyer-Arnek, J. (2015a), Stadtregionen als globale Zentren der Luftverschmutzung – in: Taubenböck, H., Wurm, M., Esch, T., Dech, S. (Hrsg.): Globale Urbanisierung – Perspektive aus dem All, Springer.

Erbertseder, T., Baier, F., Bergemann, C. (2015b), Der Wochenrhythmus der Städte – in: Taubenböck, H., Wurm, M., Esch, T., Dech, S. (Hrsg.): Globale Urbanisierung – Perspektive aus dem All, Springer.

Erbertseder T., Baier, F., Holzer-Popp, T., Bergemann, C., Klüser, L. (2015c), Nutzungspotentiale der Satellitenfernerkundung für umweltmeteorologische Anwendungen. *Annalen der Meteorologie*, Vol. 47, 50-51, Deutscher Wetterdienst.

Erbertseder, T., Schneider, C., Ament, F., Holtmann, A., Fehrenbach, U., Goldberg, V., Grassmann, T., Hansen, A., Kalthoff, N., Kiseleva, O., Klemp, D., Koßmann, M., Langer, I., Leidl, B., Maronga, B., Phillip, A., Queck, R., Raasch, S., Roiger, A., Samad, A., Scherber, K., Scherer, D., Schneidmesser von, E., Venkatraman, J., Vogt, U., Weber, S., Wegener, D. (2021), Stadtklima im Wandel [UC]² - Evaluierung des Stadtklimamodells PALM-4U; Technischer Bericht.

EUA (Europäische Umweltagentur), Air quality in Europe - 2019 report (2019), <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2019> [30.05.2020]

EUA, Europäische Umweltagentur (EEA) (2017), Climate change, impacts, and vulnerability in Europe 2016, EEA Report No 1/2017, <http://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-impacts-and-vulnerability-2016> [30.05.2020]

Eze, I.C. et al. (2015), Association between Ambient Air Pollution and Diabetes Mellitus in Europe and North America: Systematic Review and Meta-Analysis. *Environmental Health Perspectives*, 123(5), 381-389.

Ferrari, U., Exner, T., Wanka, E., Bergemann, C., Meyer-Arnek, J., Hildenbrand, B. (2012), Influence of air pressure, humidity, solar radiation, temperature, and wind speed on ambulatory visits due to chronic obstructive pulmonary disease in Bavaria, Germany. *International Journal of Biometeorology*, 137-143.

Faivre, N., Fritz, M., Freitas, T., de Boissezon, B., Vandewoestijne, S. (2017), Nature-Based Solutions in the EU: Innovating with nature to address social, economic and environmental challenges. *Environ Res.*, 159, 509-518. doi: 10.1016/j.envres.2017.08.032.

Fiala, D., Lomas, K.J., Stohrer, M. (1999), A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: The passive system. *Journal of Applied Physiology*, 87 (5), 1957-1972.

Fiala, D., Lomas, K.J., Stohrer, M. (2001), Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *International Journal of Biometeorology*, 45(2), 143-159.

Fiala, D., Lomas, K.J., Stohrer, M. (2007), Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort, http://www.utci.org/cost/publications/ICEE_2007_-Abstract-UTCI-Fiala.et.al.pdf [30.05.2020]

Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., Jendritzky, G. (2012), UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 429–441. doi: 10.1007/s00484-011-0424-7.

García-Trabanino R, Jarquín E, Wesseling C, Johnson RJ, González-Quiroz M, Weiss I, Glaser J, José Vindell J, Stockfelt L, Roncal C, Harra T, Barregard L. (2015), Heat stress, dehydration, and kidney function in sugarcane cutters in El Salvador: a cross-shift study of workers at risk of Mesoamerican nephropathy. *Environ Res*, 142, 746–755. doi:10.1016/j.envres.2015.07.007.

Gasparrini A. et al. (2015), Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *Lancet*, 386(9991), 369–375. doi:10.1016/S0140-6736(14)62114-0.

Gasparrini, A. et al. (2015), Temporal variation in heat–mortality associations: a multi-country study. *Environ Health Perspectives*, 123(11), 1200–1207. doi:10.1289/ehp.1409070.

GBD, Global Burden of Disease 2013 - Mortality and Causes of Death Collaborators (2015), Global, regional, and national age–sex specific all-cause and cause-specific mortality for 240 causes of death, 1990–2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *Lancet*, 117-171.

Gosling, S.N. et al. (2009), Associations between elevated atmospheric temperature and human mortality: a critical review of the literature. *Clim Change* 92(3), 299–341. doi:10.1007/s10584-008-9441-x.

Hayes, D. Jr. et al. (2012), Bronchoconstriction triggered by breathing hot humid air in patients with asthma: role of cholinergic reflex. *Am J Respir Crit Care Med* 185(11), 1190–1196. doi:10.1164/rccm.201201-0088OC.

He, D. et al. (2017), Association between particulate matter 2.5 and diabetes mellitus: A meta-analysis of cohort studies. *Journal of Diabetes Investigation*, 8(5), 687-696.

Hoek, G. et al. (2013), Long-term air pollution exposure and cardio- respiratory mortality: a review. *Environ Health*, 12(1), 43.

IARC, International Agency for Research on Cancer (2016), Outdoor air pollution, IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Lyon. <https://publications.iarc.fr/publications/media/download/4317/b1f528f1fca20965a2b48a220f47447c1d94e6d1.pdf> [30.05.2020]

Institut de veille sanitaire (2002) „Surveillance des effets sur la sante lies a la pollution atmospherique en milieu urbain.“

Institut de veille sanitaire (2006) „Relations a court terme entre les niveaux de pollution atmospherique et les admissions a l’hopital dans huit villes francaises.“

Institut de veille sanitaire (2008) „Analyse des liens a court terme entre pollution atmospherique urbaine et mortalite dans neuf villes francaises.“

IPCC, International Panel on Climate Change (2014), Summary for Policymakers. In: Edenhofer O, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B., Kriemann JS, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel

and J.C. Minx editors. Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: Cambridge University Press.

Jackson, D. J., Sykes, A., Mallia, P., Johnston, S. L. (2011), Asthma exacerbations: Origin, effect and prevention. *Journal of Allergy and Clinical Immunology* 128(6), 1165-1174.

Jacob, D. J., Winner, D. A. (2009), Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment* 43(1), 51-63.

Jendritzky, G., Fiala, D., Havenith, G., Koppe, C., Laschewski, G., Staiger, H., Tinz, B. (2007), Thermische Umweltbedingungen. *Promet* 33, Nr.3/4, 83-94.

Jendritzky, G., De Dear, R. (2008), Adaptation and the Thermal Environment. In: Ebi KL, Burton I, McGregor G (eds.) *Biometeorology for Adaptation to Climate Variability and Change: Research Frontiers and Perspectives*. Springer, Heidelberg. 9-32.

Jendritzky, G., de Dear, R., Havenith, G. (2012), UTCI--why another thermal index? *Int J Biometeorol.* 56(3), 421-428. doi: 10.1007/s00484-011-0513-7.

Jennings, V., Browning, M., Rigolon, A. (2019), *Urban Green Spaces - Public Health and Sustainability in the United States*, Springer. doi:10.1007/978-3-030-10469-6.

Kabisch N., Korn H., Stadler J., Bonn A. (eds) (2017), *Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas. Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions*. Springer. doi:10.1007/978-3-319-56091-5.

Khorsandi, E., Baier, F., Erbertseder, T., Bittner, M. (2018), Air quality monitoring and simulation on urban scale over Munich, Proc. SPIE 10793, Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments III, 1079303 (26 October 2018). doi: 10.1117/12.2503969.

Knockel, J.P. (2015), Heatstroke. in: Merck Manual: Consumer Version (Lane KAG, et al., eds.), Available: <http://www.merckmanuals.com/home/resourcespages/editors> [accessed 30 Januar 2020].

KOM, Europäische Kommission, (2013), Impact Assessment, SWD(2013) 531 final https://ec.europa.eu/governance/impact/ia_carried_out/docs/ia_2013/swd_2013_0531_en.pdf [30.05.2020]

KOM, Europäische Kommission, (2018a), MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS-UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN: Ein Europa, das schützt: Saubere Luft für alle, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0330&from=FR> [30.05.2020]

KOM, Europäische Kommission (2018b), What are the health costs of environmental pollution? Science for Environment Policy https://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/health_costs_environmental_pollution_FB21_en.pdf [30.05.2020]

Kovats, R.S., Hajat, S. (2008), Heat stress and public health: a critical review. *Annual Review of Public Health*, 29, 41-55.

- Küchelbacher, L. (2020), Charakterisierung der Änderungen der planetaren Wellenaktivität vor dem Hintergrund des Klimawandels, Doktorarbeit, Universität Augsburg, angefertigt am DLR Oberpfaffenhofen.
- Kukkonen, J., Olsson, T., Schultz, D., Baklanov, A., Klein, T., Miranda, A. et al. (2012), A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 1-87.
- Kumar N. (2016), The Exposure Uncertainty Analysis: The Association between Birth Weight and Trimester Specific Exposure to Particulate Matter (PM2.5 vs. PM10). *Int J Environ Res Public Health*, 13(9), E906. doi: 10.3390/ijerph13090906.
- Kyriakodis, G., Santamouris, M. (2018), Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates—Results from a large-scale urban mitigation project. *Urban Clim.* 24, 326–339.
- Landrigan, P. J., Fuller, R., Acosta, N. J. R., Adeyi, O., Arnold, R., Basu, N. N., Zhong, M. (2018), The Lancet Commission on pollution and health. *Lancet*, 391(10119), 462-512. doi:10.1016/S0140-6736(17)32345-0.
- Lelieveld, J., Pozzer, A., Pöschl, U., Fnais, M., Haines, A., Münzel, T. (2020), Loss of life expectancy from air pollution compared to other risk factors: a worldwide perspective, *Cardiovascular Research*. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvaa025>.
- LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt (2012), Der Klimawandel in Bayern – Auswertung regionaler Klimaprojektionen, Klimabericht Bayern, www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_klima_00082.htm
- Makido, Y., Hellmann, D., Shadas, V. (2019), Nature-Based Designs to Mitigate Urban Heat: The Efficacy of Green Infrastructure Treatments in Portland, Oregon, *Atmosphere*, 10, 282. doi:10.3390/atmos10050282.
- Mallet, V., Quélo, D., Sportisse, B., Ahmed de Biasi, M., Debry, E., Korsakissok, I. (2007), Technical Note: The air quality modeling system Polyphemus. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 5479-5487.
- Marécal, V., Peuch, V.-H., Andersson, C., Andersson, S., Arteta, J., Beekmann, M., Benedictow, A., Bergström, R., Bessagnet, B., Cansado, A., Chéroux, F., Colette, A., Coman, A., Curier, R. L., Denier van der Gon, H. A. C., Drouin, A., Elbern, H., Emili, E., Engelen, R. J., Eskes, H. J., Foret, G., Friese, E., Gauss, M., Giannaros, C., Guth, J., Joly, M., Jaumouillé, E., Josse, B., Kadygrov, N., Kaiser, J. W., Krajsek, K., Kuenen, J., Kumar, U., Liora, N., Lopez, E., Malherbe, L., Martinez, I., Melas, D., Meleux, F., Menut, L., Moinat, P., Morales, T., Parmentier, J., Piacentini, A., Plu, M., Poupkou, A., Queguiner, S., Robertson, L., Rouïl, L., Schaap, M., Segers, A., Sofiev, M., Tarasson, L., Thomas, M., Timmermans, R., Valdebenito, Á., van Velthoven, P., van Versendaal, R., Vira, J., Ung, A. (2015), A regional air quality forecasting system over Europe: the MACC-II daily ensemble production. *Geosci. Model Dev.*, 8, 2777–2813. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2777-2015>.
- Maronga, B., Banzhaf, S., Burmeister, C., Esch, T., Forkel, R., Fröhlich, D., Fuka, V., Gehrke, K. F., Geletič, J., Giersch, S., Gronemeier, T., Groß, G., Heldens, W., Hellsten, A., Hoffmann, F., Inagaki, A., Kadasch, E., Kanani-Sühring, F., Ketelsen, K., Khan, B. A., Knigge, C., Knoop, H., Krč, P., Kurppa, M., Maamari, H., Matzarakis, A., Mauder, M., Pallasch, M., Pavlik, D., Pfafferott, J., Resler, J., Rissmann, S., Russo, E., Salim, M.,

- Schrempf, M., Schwenkel, J., Seckmeyer, G., Schubert, S., Sühling, M., von Tils, R., Vollmer, L., Ward, S., Witha, B., Wurps, H., Zeidler, J., Raasch, S. (2020), Overview of the PALM model system 6.0. *Geosci. Model Dev.*, 13, 1335–1372. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1335-2020>.
- Morfeld, P.; Erren, T. (2019), Warum ist die „Anzahl vorzeitiger Todesfälle durch Umweltexpositionen“ nicht angemessen quantifizierbar? *Das Gesundheitswesen*, 81(02), 144 – 149. doi:10.1055/a-0832-2038.
- NCAR, National Center for Atmospheric Research (2019), Weather Research and Forecasting Model [Online]. Available: <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model> [30.05.2020]
- Oliveira, S., Andrade, H., Vaz, T. (2011), The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. *Build. Environ.*, 46, 2186–2194.
- Oke, T.R., Mills, G., Christen, A., Voogt, J. A. (2017), *Urban Climates*, Cambridge University Press.
- Paoloni-Giacobino A. (2011), Post genomic decade--the epigenome and exposome challenges. *Swiss Med Wkly*, 141, w13321. doi:10.4414/smw.2011.13321.
- Peters, A., Hoffmann, B., Brunekreef, B., Künzli, N., Joss, K. J., Probst-Hensch, N., Ritz, B., Schulz, H., Straif, K., Wichmann, E. (2019), Die Rolle der Luftschadstoffe für die Gesundheit – Eine Expertise im Namen der Internationalen Gesellschaft für Umweltepidemiologie (ISEE) und der European Respiratory Society (ERS).
- Power, M.C. et al. (2016), Exposure to air pollution as a potential contributor to cognitive function, cognitive decline, brain imaging, and dementia: A systematic review of epidemiologic research. *Neurotoxicology*, 56, 235-253.
- Psikuta, A., Fiala, D., Richards, M. (2007), Validation of the Fiala Model of Human Physiology and Comfort for COST 730. Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Ergonomics. Piran Slovenia, August 19-24, 2007, Editors: IB Mekjavic, SN Kounalakis, NAS Taylor. Special Session on the Universal Thermal Climate Index, 516.
- Psikuta, A., Richards, M., Fiala, D. (2008), Single-sector thermo-physiological human simulator. *Physiol. Meas.* 29, 181–192.
- Radhi, H., Sharples, S., Taleb, H., Fahmy, M. (2017), Will cool roofs improve the thermal performance of our built environment? A study assessing roof systems in Bahrain. *Energy Build.*, 135, 324–337.
- Robine, J.M., Cheung, S.L., Le Roy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J.P. (2008), Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *C R Biol.*, 331(2), 171-178.
- Robins, J. and Greenland, S. (1991), Estimability and estimation of expected years of life lost due to a hazardous exposure. *Statist. Med.*, 10, 79-93. doi:10.1002/sim.4780100113.
- Robins, J.M. and Greenland, S. (1989), Estimability and estimation of excess and etiologic fractions. *Statist. Med.*, 8, 845-859. doi:10.1002/sim.4780080709.

Rohde, A. (2017), Satellitengestützte Analyse der Feinstaubkonzentration über Deutschland – Masterarbeit an der Universität Augsburg, angefertigt am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

Ryti, N.R., Guo, Y., Jaakkola, J.J. (2016), Global Association of Cold Spells and Adverse Health Effects: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Environmental Health Perspectives* 124,1 CID. <https://doi.org/10.1289/ehp.1408104>.

Santamouris, M. (2014), Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Sol. Energy* 103, 682–703.

Scherer, D. and Endlicher, W. (2013), Urban climate and heat stress. *Die Erde*, 144(3-4), 175-180.

Schneider, A. et al. (2009), Ursachenspezifische Mortalität, Herzinfarkt und das Auftreten von Beschwerden bei Herzinfarktüberlebenden in Abhängigkeit von der Lufttemperatur in Bayern (MOHIT). Schlussbericht (Endfassung), https://www.helmholtz-muenchen.de/fileadmin/EPI_II/PDF/Schlussbericht_Endfassung_MOHIT_Dec2009.pdf [30.05.2020]

Schneider, A., Schuh, A., Maetzel, F. K., Ruckerl, R., Breitner, S., Peters, A. (2008), Weather-induced ischemia and arrhythmia in patients undergoing cardiac rehabilitation: another difference between men and women. *Int J Biometeorol*, 52, 6, 535-547.

Schultz, E.S., A.A. Litonjua, Melen E. (2017), Effects of Long-Term Exposure to Traffic Related Air Pollution on Lung Function in Children. *Current Allergy and Asthma Reports*, 17(6).

Seltenrich, N. (2015), Between Extremes: Health Effects of Heat and Cold. *Environ Health Perspectives*, 123, 11. doi:10.1289/ehp.123-A275.

Sicard, P., Lesne, O., Mangin, A., Alexandre, N., & Collomp, R. (2011): Air quality trends and potential health effects - Development of an aggregate risk index. *Atmospheric Environment*, 45.

Sicard, P., Talbot, C., Lesne, O., Mangin, A., Alexandre, N., Collomp, R. (2012): The Aggregate Risk Index: An intuitive tool providing the health risks of air pollution to health care community and public. *Atmospheric Environment*, 11-16.

Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Duda, M. et al. (2008), A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR.

Son J.Y. et al. (2019), Temperature-related mortality: a systematic review and investigation of effect modifiers. *Environ. Res. Lett.*, 14, 073004.

Stieb, D.M. et al. (2012), Ambient air pollution, birth weight and preterm birth: a systematic review and meta-analysis. *Environ Res*, 117, 100-11. doi:10.1016/j.envres.2012.05.007

Susca, T., Gaffin, S.R., Dell’Osso, G.R. (2011), Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environ. Pollut.*, 159, 2119–2126.

Thurston, G.D. et al. (2017), A joint ERS/ATS policy statement: what constitutes an adverse health effect of air pollution? An analytical framework. *Eur Respir J.*, 49(1).

Sun, X.L. et al. (2016), The associations between birth weight and exposure to fine particulate matter (PM_{2.5}) and its chemical constituents during pregnancy: A meta-analysis. *Environmental Pollution*, 211, 38-47.

Sweileh, W.M., Al-Jabi, S.W., Zyoud, S.H. et al. (2018), Outdoor air pollution and respiratory health: a bibliometric analysis of publications in peer-reviewed journals (1900 – 2017). *Multidiscip Respir Med*, 13, 15. <https://doi.org/10.1186/s40248-018-0128-5>.

Turner, M.C. et al. (2016) Long-Term Ozone Exposure and Mortality in a Large Prospective Study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 193(10), 1134-1142.

U.S.EPA, US Environmental Protection Agency (2006), Excessive Heat Events Guidebook. https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/eheguide_final.pdf [30.05.2020]

U.S. EPA, United States Environmental Protection Agency (2009), Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter (Final Report), US EPA: Washington, DC.

U.S. EPA, United States Environmental Protection Agency (2013), Integrated Science Assessment (ISA) of Ozone and Related Photochemical Oxidants (Final Report., U.S. EPA: Washington DC.

U.S. EPA, United States Environmental Protection Agency (2016), Integrated Science Assessment for Oxides of Nitrogen – Health Criteria. 2016, U.S. EPA: Research Triangle Park, NC.

U.S. EPA, United States Environmental Protection Agency (2019), Health Effects of Sulfur Dioxide, <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics#effects> [30.05.2020]

Uejio C.K. et al. (2015), Summer indoor heat exposure and respiratory and cardiovascular distress calls in New York City, NY, US. *Indoor Air*. doi:10.1111/ina.12227.

UBA, Umweltbundesamt (2008), Klimawandel und Gesundheit, Informationen zu gesundheitlichen Auswirkungen sommerlicher Hitze und Hitzewellen und Tipps zum vorbeugenden Gesundheitsschutz, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ratgeber-klimawandel-gesundheit> [30.05.2020]

UBA, Umweltbundesamt (2016), KLARA-NET - Netzwerk zur Klimaadaptation in der Region Starkenburg, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/projektatalog/klara-net-netzwerk-zur-klimaadaptation-in-der-region> [30.05.2020]

UBA, Umweltbundesamt (2018a), Quantifizierung von umweltbedingten Krankheitslasten aufgrund der Stickstoffdioxid-Exposition in Deutschland - in: *Umwelt & Gesundheit* | 01/2018, S. 172: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/quantifizierung-von-umweltbedingten> [30.05.2020]

UBA, Umweltbundesamt (2019a), Daten zur Luftqualität 2018: 57 Städte über dem NO₂-Grenzwert, Pressemitteilung, Nr 22/2019, <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/daten-zur-luftqualitaet-2018-57-staedte-ueber-dem> [30.05.2020]

UBA, Umweltbundesamt (2019b), Der Hitzeknigge, über das richtige Verhalten bei Hitze – Tipps für Ihren Alltag, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/364/dokumente/schattenspender_hitzeknigge.pdf [30.05.2020]

UBA und DWD (Umweltbundesamt und Deutscher Wetterdienst (2019), Klimawandel und Gesundheit: Tipps für sommerliche Hitze und Hitzewellen, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimawandel-gesundheit-tipps-fuer-sommerliche-hitze> [30.05.2020]

Upreti, R., Wang, Z., Yang, J. (2017), Radiative shading effect of urban trees on cooling the regional built environment. *Urban For. Urban Green*, 26, 18–24.

Valks, P., Pinardi, G., Richter, A., Lambert, J., Hao, N., Loyola, D. (2011), Operational total and tropospheric NO₂ column retrieval for GOME-2. *Atmospheric Measurement Techniques*, 1491-1514.

Volk, H.E., Kerin, T., Lurmann, F., Hertz-Picciotto, I., McConnell, R., Campbell, D.B. (2014), Autism spectrum disorder: interaction of air pollution with the MET receptor tyrosine kinase gene. *Epidemiology*, 25(1), 44-7. doi:10.1097/EDE.000000000000030.

WHO, World Health Organization (2006), Air Quality Guideline: Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global Update 2005.

WHO, World Health Organisation (2011), Public Health Advice on Preventing Health Effects from Heat, http://www.euro.who.int/data/assets/pdf_file/0007/147265/Heat_information_sheet.pdf?ua=1 [30.05.2020]

WHO, World Health Organisation (2013), Review of evidence on health aspects of air pollution REVIHAAP Project- . Technical Report. WHO Regional Office for Europe: Copenhagen. p. 309 - http://www.euro.who.int/data/assets/pdf_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-report-final-version.pdf [30.05.2020]

WHO, World Health Organisation (2014), News release, 7 million premature deaths annually linked to air pollution, <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/> [30.05.2020]

WHO, World Health Organisation (2014), Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s. Geneva.

WHO, World Health Organisation (2016), Climate Change and Health, Fact Sheet, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs266/en/> [30.05.2020]

WHO, World Health Organisation (2017), Pressemitteilung, Ostrava, 13. Juni 2017 <http://www.euro.who.int/de/media-centre/sections/press-releases/2017/united-nations-agencies-urge-europes-action-on-1.4-million-annual-deaths-from-polluted-environments> [30.05.2020]

WHO, World Health Organisation (2018a), Heat and Health, Fact Sheet, <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-heat-and-health> [30.05.2020]

WHO, World Health Organisation (2018b), COP24 Special Report: Health and Climate Change, <https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1163696/retrieve> [30.05.2020]

WHO, World Health Organisation (2019), Health and Climate Change Survey Report.

Wild, C. P. (2005), Complementing the genome with an "exposome": the outstanding challenge of environmental exposure measurement in molecular epidemiology. *Cancer Epidemiology Biomarkers Prev.*, 14, 1847–1850.

Wild C.P. (2012), The exposome: from concept to utility. *Int J Epidemiol.*, 41(1), 24-32. doi:10.1093/ije/dyr236.

Zhang X. et al. (2014), Effects of moderate strength cold air exposure on blood pressure and biochemical indicators among cardiovascular and cerebrovascular patients. *Int J Environ Res Public Health*, 11(3), 2472–2487. doi:10.3390/ijerph110302472.

Zhang, Y., Seidel, D.J., Zhang, S. (2013), Trends in Planetary Boundary Layer Height over Europe. *J. Climate*, 26 (24), 10071–10076. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00108.1>

10 Anlagen

10.1 Publikationen

Mittelstädt, L., Erbertseder, T., Bittner, M. (2019), Das Bioklimatische Informationssystem BioClis – Ein Service der UFS – in: Wissenschaftliche Resultate der Umweltforschungsstation Schneefernhaus 2017/2018, S.70-74.

Erbertseder, T., Gilardi, L., Handschuh, J., Bittner, M. (2021), Das Bioklimatische Informationssystem BioClis – Ein Service der UFS – in: Wissenschaftliche Resultate der Umweltforschungsstation Schneefernhaus 2019/2020, im Druck.

10.2 Vorträge, Konferenzen

Erbertseder, T., Bittner, M., Mittelstädt, L., Traidl- Hoffmann, C., Hachinger, S., Frank, A. (2018), BioClis - a bioclimatic information system for Bavaria, VAO Symposium 2018, Grenoble.

Mittelstädt, L., Erbertseder, T., Baier, F., Bittner, M. (2018), Impact of Air Quality on Human Health in Germany: Variability of the Aggregate Risk, European Geosciences Union 2018, Wien.

Mittelstädt, L., Erbertseder, T., Baier, F., Bittner, M., Khorsandi, E. (2018), Umwelt und Gesundheit: Bestimmung des Gesundheitsrisikos aufgrund atmosphärischer Einflüsse, Vorstellung des Projekts am DLR vor Mitarbeitern des LfU, 10. Juli 2018, Augsburg.

Mittelstädt, L., Erbertseder, T., Traidl-Hoffmann, C., Hachinger, S., Baier, F., Bittner, M. (2018), BioClis - Bioklimatisches Informationssystem für Bayern, 1. Netzwerktreffen Verbundprojekt Klimawandel und Gesundheit, 22. Oktober 2018, München.

Erbertseder, T., Mittelstädt, L., Hachinger, S., Heller, H., Traidl-Hoffmann, C., Bittner, M. (2019), BioClis - Bioklimatisches Informationssystem Bayern: ein Service der UFS, 2. Netzwerktreffen Verbundprojekt Klimawandel und Gesundheit, 30. April 2019, München.

Erbertseder, T., Mittelstädt, L., Hachinger, S., Heller, H., Traidl-Hoffmann, C. und M. Bittner, 2019, BioClis - Bioklimatisches Informationssystem Bayern: ein Service der UFS, 3. Netzwerktreffen Verbundprojekt Klimawandel und Gesundheit, 11. Dezember 2019, München.

Erbertseder, T., Mittelstädt, L., Hachinger, S., Heller, H., Traidl-Hoffmann, C., Bittner, M. (2019), BioClis - Bioklimatisches Informationssystem Bayern: ein Service der UFS, BioClis Community Workshop, 25. November 2019, Augsburg.

Erbertseder, T., Gilardi, L., Mittelstädt, L., Goussev, O., Baier, F., Hachinger, S., Traidl-Hoffman, C., Bittner, M. (2020), Towards a Bioclimatic Information System for the Alps, VAO Symposium 2020, Bern.

Erbertseder, T., Gilardi, L., Mittelstädt, L., Bittner, M. (2020), On the aggregate health risk from air pollution in Germany. International Conference on Air Quality, Thessaloniki.

10.3 Poster

Mittelstädt, L., Erbertseder, T., Traidl-Hoffmann, C., Hachinger, S., Bittner, M., (2018), BioClis - Bioklimatisches Informationssystem, Fachtagung Klimawandel und Gesundheit, 12.07.2018, München.

10.4 Mittlere Erhöhung des Gesundheitsrisikos in Bayern von 2010 bis 2016 für verschiedene Gesundheitsendpunkte

