



Klinikum rechts der Isar  
Technische Universität München



Verbundprojekt  
Klimawandel  
und Gesundheit

## Verbundprojekt „Klimawandel und Gesundheit“

### Schlussbericht zum Forschungsvorhaben

*Einfluss von extremen Witterungsereignissen im Klimawandel  
auf die menschliche Gesundheit*



finanziert durch  
Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Verbraucherschutz



und durch  
Bayerisches Staatsministerium für  
Gesundheit und Pflege



## Schlussbericht

**Projektname:** Einfluss von extremen Witterungsereignissen im Klimawandel auf die menschliche Gesundheit

**Akronym:** WIKLIGE

**Aktenzeichen:** 71a-U8729-2015/57-324

**Projektlaufzeit:** 01.07.2018 – 31.03.2021

**Projektleitung:** Prof. Dr. Annette Menzel  
Ökoklimatologie, TUM School of Life Sciences, TU München

**Projektantragsteller:**

Prof. Dr. Annette Menzel, Ökoklimatologie, TU München

Prof. Ph.D. Donna Ankerst, Biostatistik, TU München

PD Dr. Dominik Pförringer, Klinik und Poliklinik für Unfallchirurgie, TUM MRI

**Projektpartner:** Dr. Nicole Estrella, Ökoklimatologie, TUM

Dr. Hannes Petermeier, Biostatistik, TUM

**Projektbearbeitung:** Dr.-Ing. Wael Ghada, Ökoklimatologie, TUM (01.03.2020-31.03.2021)

Dipl.-Biol., M.Sc. Tobias Ottenheim, TUM (01.08.2018-31.12.2019)

M.Sc. Math. Matthias Neumair, TUM

2. Revision vom 16.12.2021

## Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	5
2	Zielsetzung und Hintergrund.....	6
3	Rettungsdienstesätze in München.....	10
3.1	Daten.....	11
3.1.1	IVENA – Transporte in Notaufnahmen der Münchener Krankenhäuser über die Integrierte Leitstelle.....	11
3.1.2	Umweltdaten und Kalendervariablen.....	12
3.2	Methoden.....	13
3.3	Ergebnisse.....	13
3.3.1	Tägliche Transporte in Notaufnahmen.....	13
3.3.2	Tägliche Transporte in Notaufnahmen nach Alter.....	15
3.3.3	Tägliche Aufnahmen nach Typ der Notaufnahme.....	16
3.4	Diskussion.....	17
4	Alpine Unfälle in Österreich.....	18
4.1	Daten.....	19
4.1.1	Österreichischer Bergrettungsdienst.....	19
4.1.2	Wetterdaten.....	19
4.2	Methoden.....	20
4.3	Ergebnisse.....	20
4.3.1	Überblick über die Todesfälle.....	20
4.3.2	Risiko für tödliche Unfälle bei den verschiedenen Aktivitäten.....	21
4.4	Diskussion.....	23
5	Mortalität, Verkehrsunfälle und Krankenhauseinweisungen in Bayern.....	23
5.1.1	Daten des Statistischen Landesamtes.....	24
5.1.2	UTCI Werte.....	24
5.2	Statistische Methoden.....	26
5.3	Ergebnisse.....	27
5.3.1	Saisonale UTCI-Effekte auf Mortalität, Morbidität und Verkehrsunfälle.....	27
5.3.2	Räumliche Variation der UTCI-Effekte im Sommer.....	28
5.3.3	Sonstige Einflussfaktoren.....	30
5.4	Diskussion.....	31
6	Darstellung des Nutzens im Rahmen der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie.....	32
7	Glossar.....	34

8	Literaturverzeichnis.....	35
9	Anlagen.....	38
9.1	Publikationen.....	38
9.1.1	Ghada W, Estrella N, Pfoerringer D, Kanz KG, Bogner-Flatz V, Ankerst DP, Menzel A (2021) Effects of weather, air pollution and Oktoberfest on ambulance-transported emergency department admissions in Munich. <i>STOTEN</i> 755 (2) 143772 (doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143772 open access).....	38
9.1.2	Neumair N, Estella N, Menzel A, Ankerst DP (2021) The influence of weather on fatal accidents in Austrian mountains. <i>Weather, Climate, and Society</i> (akzeptiert, in Druck). .....	38
9.1.3	Ghada W, Estrella N, Ankerst DP, Menzel A (2021) Universal thermal climate index associations with mortality, hospital admissions, and road accidents in Bavaria. <i>PLOS ONE</i> 16(11), e0259086 (doi: 10.1371/journal.pone.025908 open access). .....	38
9.2	Vorträge.....	38
10	Appendix.....	39

## 1 Zusammenfassung

Im Klimawandel werden Extremwetterereignisse häufiger und intensiver, gerade Hitze ist beim Zusammenspiel von Witterung und menschlicher Gesundheit ein entscheidender Faktor, der sich in Zukunft noch stärker manifestieren wird. Während im Zeitraum 1971-2000 durchschnittlich 4,1 Hitzetage pro Jahr in Bayern zu beobachten waren, so waren es 1999-2019 bereits 4,1 Tage mehr, in einem Szenario ohne Klimaschutz könnten es bis Ende dieses Jahrhunderts bis zu 36 Tage mehr sein (LfU Klimafaktenblätter, Stand Mai 2021).

Während sich bisherige Studien auf Krankenhauseinweisungen und Sterblichkeit konzentrierten, ist zum Wetter- / Witterungseinfluss auf Rettungsdiensteinsätze sowie Verkehrs- und Bergunfälle noch wenig bekannt. In diesem Projekt wurde deshalb erstmals der Einfluss des Universal Thermal Climate Index (UTCI) und weiterer meteorologischer Variablen an drei Datensätzen untersucht: (1) 575.725 Notaufnahmeeinweisungen in die Krankenhäuser der Stadt und des Landkreises München über das IVENA-System (2014-2018), (2) 3466 von der österreichischen Alpinpolizei registrierte tödliche Bergunfälle (2006-2018) sowie (3) 56 Millionen Krankenhauseinweisungen, 2,5 Millionen Todesfälle sowie 930.000 Verkehrsunfälle mit 1,7 Millionen Verletzten in Bayern (1995-2015). In der jeweiligen statistischen Modellierung (zumeist multiple lineare Regressionsmodelle mit Verzögerungseffekten), wurden demographische Einflüsse, etwa durch Alter, Geschlecht oder Krankheitsdiagnose, sowie saisonale und kalendarische Effekte einbezogen. Gerade letztere waren teilweise sehr ausgeprägt (z.B. Oktoberfest / Silvester bei Männern in der Notaufnahme, Wochenende bei Bergunfällen oder ein reduzierender Effekt von Ferien auf Verkehrsunfälle und Krankenhauseinweisungen in Bayern).

Die steuernden Umweltvariablen auf die IVENA Zahlen variierten zwischen Untergruppen, aber in nahezu alle Modelle gingen neben Kalendervariablen noch Luftschadstoffe, Wetterfaktoren (Lufttemperatur, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Bedeckung, absolute Luftfeuchte, Niederschlag, Sonnenscheinstunden, Wetterwarnungen) sowie Kombinationen aus diesen ein. Gerade im Frühjahr und Sommer ließen höhere Temperaturen die Zahlen ansteigen, allerdings nicht für die ältere Bevölkerung. Steigende Zahlen im Winter waren v.a. mit Minimumtemperaturen sowie Luftschadstoffen verbunden.

Bergunfälle in Österreich waren bei vielen Disziplinen am Wochenende erhöht, besonders im Winterhalbjahr. Besonders bei „schönem“ Wetter, d.h. warm und sonnig im Sommer sowie bei guter Schneelage im Winter, war die Wahrscheinlichkeit von tödlichen Unfällen erhöht. An sonnigen, trockenen und windstillen Tagen kommen an Wochenenden mehr (auch untrainierte) Besucher in die österreichischen Berge, was wahrscheinlich zu mehr Todesfällen führt, auch da die Aufmerksamkeit bei vermeintlich guten Bedingungen bekanntermaßen sinkt. Selbst die Zahl an Selbstmorden im Winter stieg mit der Temperatur an.

In Bayern fanden sich klare UTCI-Effekte in einem sofortigen Anstieg der Morbidität und einem noch stärkeren Anstieg der Mortalität im Sommer und einem verzögerten Rückgang im Herbst, Winter und Frühjahr. Die stärksten Effekte wurden bei Verkehrsunfällen gefunden, wo eine Erhöhung des UTCI zu einem sofortigen Rückgang im Winter, aber zu einem deutlichen Anstieg in den anderen Jahreszeiten führte.

Die Ergebnisse zeigen, dass nicht nur Hitze und thermische Belastung Einfluss auf Morbidität, Mortalität und Unfälle haben, sondern weitere meteorologische Faktoren die

Risiken zusätzlich erhöhen. So sollte bei der Verbesserung der Luftqualität nicht nur auf eine Verringerung der Ozonkonzentration im Sommer geachtet werden, sondern auch ganzjährig die NO- und PM10-Werte Beachtung finden. Insofern bestätigen unsere Untersuchungen, dass die in der bayerischen Klimaanpassungsstrategie (BayKLAS) genannten Anpassungsmaßnahmen, wie (Hitze-)Warnsysteme und entsprechende Präventionsmaßnahmen sowie Monitoring der Ozonwerte und Verringerung der Luftschadstoffe, der richtige Weg sind, die bayerische Bevölkerung zu schützen.

Die Ergebnisse zeigten aber auch, dass demographische Einflüsse (Alter, Geschlecht, Krankheitsdiagnose) sowie saisonale und kalendarische Effekte die Auswirkungen von Hitzestress maßgeblich modulieren. Es ist daher dringend zu empfehlen, dass in einem Folgeprojekt zusätzlich die täglichen absoluten Zahlen der entsprechenden untersuchten Gruppen (z.B. Anzahl der alpinen Touristen an bestimmten Tagen, Anzahl der Oktoberfestbesucher, gefahrene Kilometer auf bayerischen Straßen) in die Modellierung einbezogen werden können.

Wichtig für die Klimaanpassung im Gesundheitssektor Bayerns dürften die regionalen Unterschiede in den UTCI-Effekten sein sowie ihre Variationen mit demographischen Faktoren. Diese deutlichen Einflüsse der Witterung sowie ihrer raum-/zeitlichen Muster erfordern eine verbesserte Infrastrukturplanung und Ressourcenzuweisung im Gesundheitssektor. Diese Ergebnisse sollten auch in die entsprechenden allgemeinen Maßnahmen der BayKLAS, wie Schulungsinhalte des medizinischen Pflege- und Fachpersonals und Aufklärung der Bevölkerung, einfließen.

Zudem zeigen die Projektergebnisse, dass nicht nur die Metropolregionen Hitzestau in der Stadtplanung berücksichtigen sollten, sondern auch ländliche, nördliche Regionen in Bayern die zukünftig weiter ansteigende Hitzebelastung bei der Regionalplanung mitberücksichtigen sollten. Gerade die Mainregion, in der die Anzahl der Hitzetage bereits um 4.9 Tage zugenommen, könnte bei einem Szenario ohne Klimaschutz Ende dieses Jahrhunderts bis zu 45 zusätzliche Hitzetage verzeichnen (Klimafaktenblätter des LfU). Gerade in diesen Regionen sollten deshalb forciert und prioritär BayKLAS Maßnahmen zur Klimawandelgerechten Stadtentwicklung, Verbesserung der „blau-grünen“ Infrastruktur und Erhalt von Kaltluftkorridoren, umgesetzt werden.

## 2 Zielsetzung und Hintergrund

Der Zusammenhang zwischen Wetter, Witterung und menschlicher Gesundheit ist angesichts des Klimawandels und der häufiger auftretenden Extremwetterereignisse eine essentielle Fragestellung für das bayerische Gesundheitswesen und die Bayerische Klimaanpassungsstrategie. In dem Projekt sollten dabei die potentiellen direkten Effekte durch den Klimawandel, wie etwa Hitzewellen, die im Klimawandel in Häufigkeit und Intensität zunehmen, betrachtet werden. Indirekte Effekte über Veränderungen in der Tier- und Pflanzenwelt, etwa durch Änderungen bei Krankheitsvektoren oder Pollenemissionen, standen dagegen nicht im Fokus (siehe IPCC 2014 oder Rosenzweig et al. 2007). Die gesundheitlichen Auswirkungen von Wetter und Witterung können vielfältig sein, von reduziertem psychischem Wohlbefinden durch Stress und Traumata bis hin zu Verletzungen, Erkrankungen und Todesfällen (Zacharias 2012).

Gerade die folgende, nach Beantragung des Projektes veröffentlichte Literatur unterstreicht dessen Notwendigkeit und Aktualität: Basierend auf Daten aus 12 deutschen Städten zeigten Huber et al. (2020), dass die meiste Sterblichkeit durch Kälte und nicht durch Hitze verursacht wird. Dies ändert sich jedoch sobald die globalen Durchschnittstemperaturen um mehr als 3°C steigen, dann überwiegt die Sterblichkeit durch Hitzeeinwirkungen. Eine Übersichtsarbeit mit Schwerpunkt Deutschland zeigte, dass die Sterblichkeit gut durch die Wochenmitteltemperatur abgeschätzt werden kann und deshalb sprachen sich An der Heiden et al. (2019) für eine nationale Überwachung der Sterblichkeit aus. Insbesondere in Bayern wird ein Anstieg der Sterblichkeitsrate aufgrund des Klimawandels und der Bevölkerungsalterung erwartet (Rai et al. 2019), da gerade ältere Menschen, die oftmals auch zu wenig trinken, bei Hitze eine höhere (kardiovaskuläre) Sterblichkeit (Breitner et al. 2014 a, b) zeigen. Eine aktuelle globale Übersichtsarbeit identifizierte höhere hitzebedingte Gesundheitsrisiken für Kinder, alte Menschen, Übergewichtige, Personen, die physisch anstrengende, körperliche Aktivitäten ausüben sowie Untrainierte mit schlechter Fitness (Leyk et al. 2019). Höhere Temperaturen führten zu einem Anstieg von chirurgischen Wundinfektionen (Aghdassi et al. 2019) und Herzinfarkten (Chen et al. 2019) in Deutschland, was die Notwendigkeit unterstreicht, die Ziele des Pariser Klimaabkommens zu erfüllen. In Deutschland werden bei Hitzeereignissen mehr Krankenhauseinweisungen und Todesfälle beobachtet, und das Ausmaß wird durch weitere meteorologische Faktoren (bei extremer Hitze - Sonnenschein, hoher Ozongehalt und Verschmutzung sowie bei Kälte - Niederschlag und Windgeschwindigkeit) beeinflusst (Karlsson und Ziebarth 2018). Zusätzlich verursachten Föhnwinde eine Zunahme schwerer Verletzungen (Traumata) im Süden Bayerns (Greve et al. 2020). Es mangelt jedoch an umfassenden Studien, die sich mit den Auswirkungen mehrerer meteorologischer Variablen auf die bayerische Bevölkerung befassen.

Hitzewellen werden mit dem Klimawandel in Europa häufiger und heftiger werden und ihre (räumliche) Verteilung wird sich deutlich verändern (Basarin et al. 2020). Die gesamte polnisch-sächsische Grenzregion zeigt gemessen am Universal Thermal Climate Index (UTCI) eine Tendenz zu mehr Hitze- und weniger Kältestress (Miszuk 2021). Deshalb werden derartige meteorologische Indices für Warnsysteme empfohlen (Casanueva et al. 2019, Basarin et al. 2020), optimaler Weise sollten weitere wetter- und verschmutzungsbezogene Variablen einbezogen werden (Kingsley et al. 2016). Die neu publizierten Faktenblätter des bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU 2021) zeigen für Bayern und seine Regierungsbezirke, dass sich die Anzahl der Hitzetage (im Referenzzeitraum 1971-2000 4,1 Tage) in der Periode 1999-2019 bereits verdoppelt hat, weitere regional unterschiedliche, aber deutliche Anstiege sind, je nach Klimaschutzszenario zu erwarten.

Für Bayern wurden in diesem Projekt über die eigentlichen Hitzetage hinausgehend interpolierte Daten des UTCI erstellt, um die Auswirkungen der Hitzebelastung auf die Gesundheit zu untersuchen (Meilenstein 5).

Während sich die meisten Studien zum Einfluss des Klimawandels in unseren Regionen auf Hitzestressbedingte Krankenhauseinweisungen und Sterblichkeit konzentrieren, ist der Einfluss meteorologischer Variablen auf den Bedarf an medizinischen Notfalldiensten / Rettungseinsätzen sowie auf Verkehrsunfälle und Bergunfälle in den alpinen Regionen noch wenig bekannt. Ziel dieser Forschung ist es einen umfassenden Überblick über den Einfluss von klimawandelbedingten Extremen, vor allem der Hitzebelastung aber auch assoziierter Faktoren, auf die verschiedenen Aspekte der menschlichen Gesundheit in Bayern zu geben. Diese Literaturübersicht ist Teil von Meilenstein 1: Literaturrecherche.

Dieses Ziel gliedert sich in die drei Hauptthemen mit folgenden Unterzielen:

1) "Auswirkungen von Wetter, Luftverschmutzung und Oktoberfest auf die Einlieferungen in die Notaufnahme mit Rettungsdiensten in München, Deutschland" (Teil von Meilenstein 7: Analyse des Witterungseinflusses auf MRI Notfallaufnahmen und Unfallstatistiken, AP 7.1)

- die einflussreichsten kalendarischen Variablen, meteorologischen Bedingungen und Wetterwarnungen sowie Luftschadstoffe zu identifizieren, die mit täglichen Notfallaufnahmen in München assoziiert sind,

- aufzuzeigen, dass Umweltfaktoren die täglichen Notaufnahmen unabhängig von saisonalen und kalendarischen Einflüssen, wie Oktoberfest, steuern, aber mit Unterschieden nach Alter, Geschlecht und Art der Notaufnahme.

2) „Der Einfluss des Wetters auf tödliche Unfälle in österreichischen Bergen“ (Teil von Meilenstein 7: Analyse des Witterungseinflusses auf MRI Notfallaufnahmen und Unfallstatistiken, AP7.3)

- die einflussreichsten kalendarischen Variablen und meteorologischen Bedingungen zu identifizieren, die mit Bergunfällen in Österreich assoziiert sind,

- deren Effekte auf das Risiko von tödlichen Unfällen im Sommer- und Winterhalbjahr für verschiedene Bergsportdisziplinen zu quantifizieren.

3) "Universeller thermischer Klimaindex - Assoziationen mit Mortalität, Krankenhaus-einweisungen, und Verkehrsunfällen in Bayern" (Entspricht Meilenstein 6: Modellierung der regionalen Abhängigkeiten von menschlichem Hitzestress und Mortalität)

- die Änderungen in Mortalität, Morbidität und Verkehrsunfällen in Bayern nach Variationen des universellen thermischen Klimaindex (UTCI) vergleichend aufzuzeigen,

- die Variabilität dieses Einflusses mit Jahreszeiten, Alter, Geschlecht und Regionen innerhalb Bayerns darzustellen.

In den folgenden drei Kapiteln werden die Ergebnisse dieser Studien beschrieben.

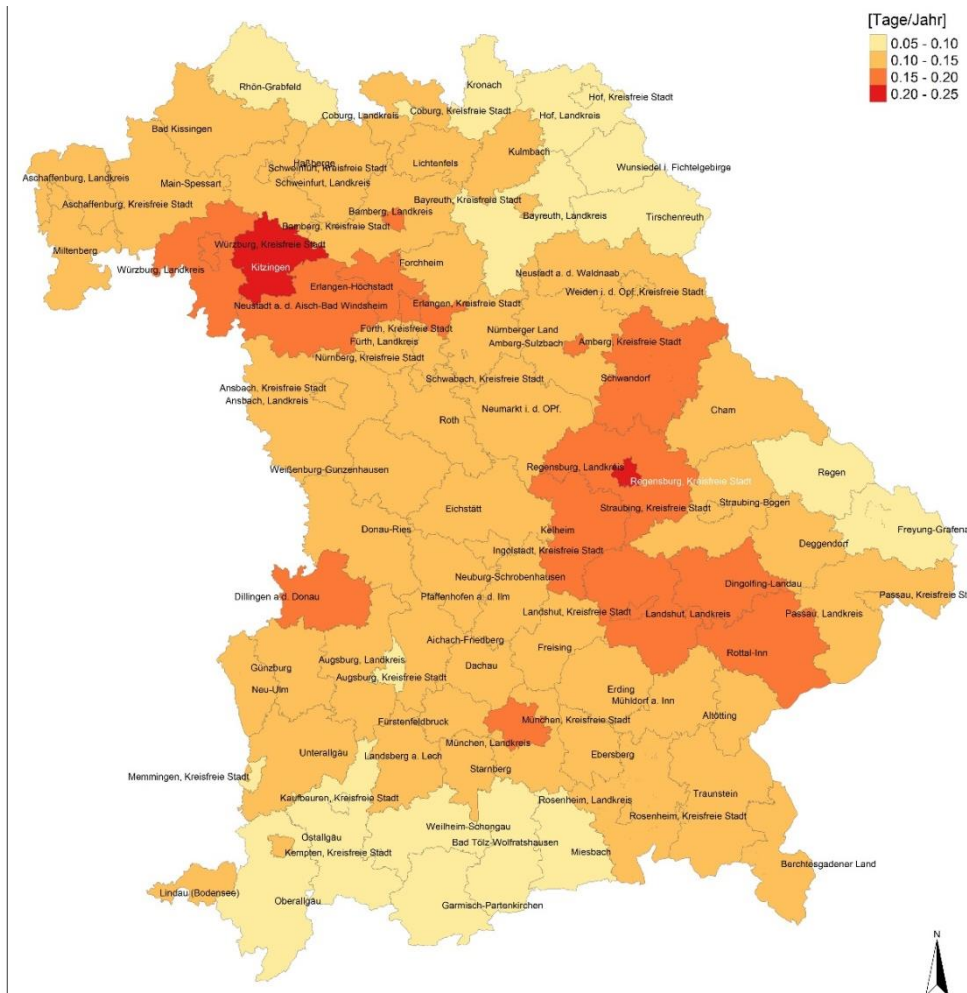
Bevor diese drei Hauptthemen bearbeitet werden konnten, wurden die benötigten Datensätze der identifizierten Einflussvariablen von Wetter und Witterung (Meilenstein 1) erstellt (Meilenstein 3). Die hierfür benötigten Daten stammen vom Deutschen Wetterdienst (DWD), wobei von 131 Stationen in Bayern Wetterdaten mit stündlicher Temperaturmessung vorlagen. Weitere stündliche Messgrößen sind Niederschlag, Luftdruck, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Grad der Bedeckung, direkte Sonnenstrahlung sowie diffuse Sonnenstrahlung.

Es existieren verschiedene Indizes, die die Hitze repräsentieren, so verwendet man oftmals die Anzahl von Tagen, an dem das Maximum der Lufttemperatur  $\geq 30$  °C beträgt (siehe Klimafaktenblätter des LfU). Früher verwendete man den Begriff ‚Tropentag‘ für diesen Index, heute spricht man von ‚Heißen Tagen‘. Im Zeitraum zwischen 1951 und 2018 kann man eine deutliche Zunahme von Heißen Tagen in ganz Bayern sehen (Abb. 2.1).

Allerdings spiegeln diese Werte die thermische Belastung eines Menschen nicht wider. Diese lässt sich besser durch den bereits eingeführten Universal Thermal Climate Index (UTCI, siehe Glossar) darstellen. Dieser Index ist allgemein anerkannt, da die thermische Belastung aus der Energiebilanz eines Menschen resultiert und nicht allein aus der



Lufttemperatur. Um den UTCI zu bestimmen, werden die Umgebungsvariablen Sonneneinstrahlung (angegeben durch die mittlere Strahlungstemperatur  $T_{mrt}$ ), relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur als Einflussgrößen berücksichtigt. Da nicht alle Messgrößen an allen Standorten vorhanden waren, konnte der UTCI nur für 44 Standorte berechnet werden. Anhand dieser Stationen wurde der UTCI dann für ganz Bayern interpoliert.



**Abb. 2.1** Trend der Heißen Tage im Zeitraum 1951 – 2018 der Landkreise in Bayern (Erstellt mittels DWD-Daten)

Die Planung der Meilensteine 3, 5 und 8 sah vor, die Hitzebelastung auch für die nahe Zukunft (bis 2050) anhand verschiedener vom LfU ausgewählten und regionalisierten Klimaszenarien zu berechnen. Der ursprünglich anvisierte Zeitplan ließ sich aufgrund von Verzögerungen in der Datenbereitstellung durch das LfU nicht einhalten. Zudem lieferten die Daten der Klimamodelle nicht alle für die Berechnung des UTCI erforderlichen meteorologischen Parameter. Deshalb wurde versucht, zukünftige UTCI Daten über Approximationen zu erstellen. Allerdings waren diese Ergebnisse unzureichend, deshalb werden keine UTCI Werte für zukünftige Szenarien dargestellt.

Die thermische Hitzebelastung der Vergangenheit wurde als Tages (bzw. Halbtages) -maxima und -minima oder -mittel des Universal Thermal Climate Index (UTCI) approximiert. In Kapitel 5 wird der saisonale UTCI für Bayern in Abb. 5.1 dargestellt.

### 3 Rettungsdienstesätze in München

#### Kurzzusammenfassung

Der Klimawandel und das zunehmende Risiko extremer Wetterereignisse beeinflussen bekanntermaßen die menschliche Gesundheit. Die auch für Anpassungsmaßnahmen im Gesundheitswesen wichtige Fragestellung war daher, ob dies bereits zu beobachtbaren Veränderungen in der Notaufnahme (ED) und den Einsätzen des Rettungsdienstes (EMS) führt.

Deshalb sollte diese Fragestellung für die Landeshauptstadt München und die Region München untersucht werden, wo exzellente Daten vorlagen. Diese Studie konnte erfreulicherweise anhand der Daten des Interdisziplinären Versorgungsnachweises (IVENA) für den Großraum München und nicht nur, wie ursprünglich geplant, für die Notaufnahme des Klinikums München Rechts der Isar (MRI) durchgeführt werden, die im Rahmen von Meilenstein 2 und 4 anonymisiert bzw. akquiriert wurden. Die Vorteile waren ein größerer und vollständigerer Datensatz sowie Daten, die nicht durch eine maximale Aufnahmekapazität in einer Notaufnahme gekappt waren („censored data“ bei den MRI Daten<sup>1</sup>).

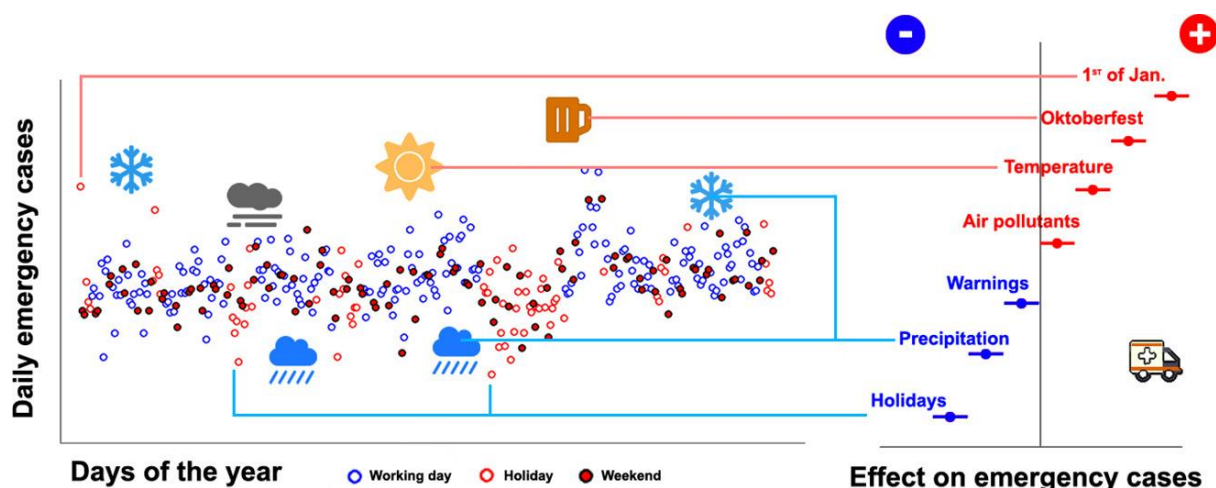
Unsere Hypothese war, dass die täglichen IVENA Fallzahlen von Umweltfaktoren beeinflusst werden und zwar in allen Jahreszeiten und über Kalendervariablen hinaus, wobei wir Unterschiede mit dem Patientenalter, Patientengeschlecht und Art des Notfalls annahmen.

Die verwendete Methode waren lineare Modelle zur Vorhersage der täglichen Notfallaufnahmen in Abhängigkeit von kalendarischen, meteorologischen und luftchemischen Variablen sowie Wetterwarnungen. Dabei wurden für meteorologische und luftchemische Variablen Verzögerungseffekte („lag effects“) von ein bis drei Tagen berücksichtigt.

Die graphische Zusammenfassung der Ergebnisse (Abb. 3.1) zeigt, wie sich die Zahl der täglichen Transporte mit dem Rettungsdienst in die Notaufnahmen der Münchener Krankenhäuser über das Beispielsjahr verändern und welche modellierten Effekte der Jahreswechsel und das Oktoberfest (starke Anstiege), Lufttemperatur und –verschmutzung (Anstiege), Wetterwarnungen und Niederschlag (Rückgänge) sowie Ferien (starke Rückgänge) haben. Insofern zeigt diese Studie klar die mit dem Klimawandel zusammenhängenden negativen Effekte von hohen Temperaturen und Luftschadstoffen auf, aber gleichzeitig wird die Bedeutung von weiteren Variablen, die die Anzahl und das Verhalten von Personen steuern, deutlich.

---

<sup>1</sup> Mit dem Datensatz des MRI wurden in Vorstudien entsprechende Analysen durchgeführt. Die Anzahl der Patienten am MRI wurde mit ausgewählten statistischen Modellen (Distributed Lag Linear and Non-Linear Model dlnm) analysiert und als Störgrößen wurden verschiedene Kovariablen berücksichtigt. Der UTCI wurde mit einem nicht linearen Lag-Feld modelliert. Dabei zeigte sich aber, dass UTCI Werte das Relative Risiko (RR) einer MRI Notfallaufnahme nur selten statistisch signifikant beeinflussten. Ein erhöhtes Risiko zeigte sich lediglich bei hohen UTCI Werten (>30°) und einer zeitlichen Verzögerung von bis zu einem Tag (sowie bei niedrigen UTCI Werten und 6 Tagen Zeitverzögerung). Wir führen dies auf die mögliche Kappung der Daten (maximale Kapazität in einer Klinik) zurück. Diese Probleme traten bei dem alternativ verwendeten IVENA Datensatz nicht auf.



**Abb. 3.1** Graphische Zusammenfassung der Studie Ghada et al. (2021) Effects of weather, air pollution and Oktoberfest on ambulance-transported emergency department admissions in Munich, Germany. STOTEN 755, 143772.

Die im folgenden präsentierten Ergebnisse wurde als Studie „*Effects of weather, air pollution and Oktoberfest on ambulance-transported emergency department admissions in Munich, Germany*“ von Wael Ghada, Nicole Estrella, Dominik Pfüringer, Karl-Georg Kanz, Viktoria Bogner-Flatz, Donna P. Ankerst und Annette Menzel bereits in der internationalen, begutachteten Zeitschrift „*Science of the Total Environment (STOTEN)*“ im Jahr 2021 veröffentlicht (siehe 9.1.1 oder <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720373034>) und sind das Ergebnis von Meilenstein 7 (AP 7.1) des Forschungsprojektes.

### 3.1 Daten

#### 3.1.1 IVENA – Transporte in Notaufnahmen der Münchener Krankenhäuser über die Integrierte Leitstelle

Die Analysen basierten auf 575.725 Notaufnahmeeinweisungen in die Krankenhäuser der Stadt und des Landkreises München über das IVENA-System für den Zeitraum 2014-2018. Der Interdisziplinäre Versorgungsnachweis (IVENA) ist ein webbasiertes Online-System, mit dem Krankenhäuser ihre aktuellen Versorgungskapazitäten den Disponenten der Integrierten Leitstelle (ILS) anzeigen, die dann die Rettungsfahrzeuge mit prähospitaler Notfallversorgung den aufnehmenden Krankenhäusern zuweisen. IVENA lenkt dabei die Aufnahmen und hilft, unnötige Fahrten zu reduzieren. Unsere Eingangsdaten, die täglichen Transporte in alle Notaufnahmen im Großraum München über das IVENA System, beinhalten deshalb keine Selbsteinweisungen sowie keine geplanten Transporte von Nicht-Notfällen. An Zusatzinformationen wurden Alter, Geschlecht des Patienten sowie die Erstdiagnose und ihre Zuordnung zu internistischer bzw. chirurgischer Notaufnahme (siehe Tabelle S2 der Veröffentlichung) verwendet. Die absoluten Zahlen der Notfallaufnahmen, auch für die einzelnen Kategorien, sowie die zugehörigen Prozentangaben sind in den Tabellen 1, S1 und S2 der Veröffentlichung zu finden. Im Durchschnitt waren pro Tag 315,3 Notfallaufnahmen (in der Veröffentlichung als „daily hospital ED admissions“ bezeichnet) zu verzeichnen, und zwar 127,6 Patienten älter als 70 Jahre, 26,4 Kinder und Jugendliche sowie 157,7 Erwachsene. Die täglichen ED Aufnahmen waren im Frühjahr geringer (307,8) und im Herbst (326,2) höher als der Jahresdurchschnitt. Das Geschlechterverhältnis war ausgeglichen, bei der Notaufnahme dominierte die internistische (178,2 im Vergleich zu

127,0 chirurgische). Abb. 3.2 zeigt die täglichen ED Aufnahmen über den Untersuchungszeitraum.

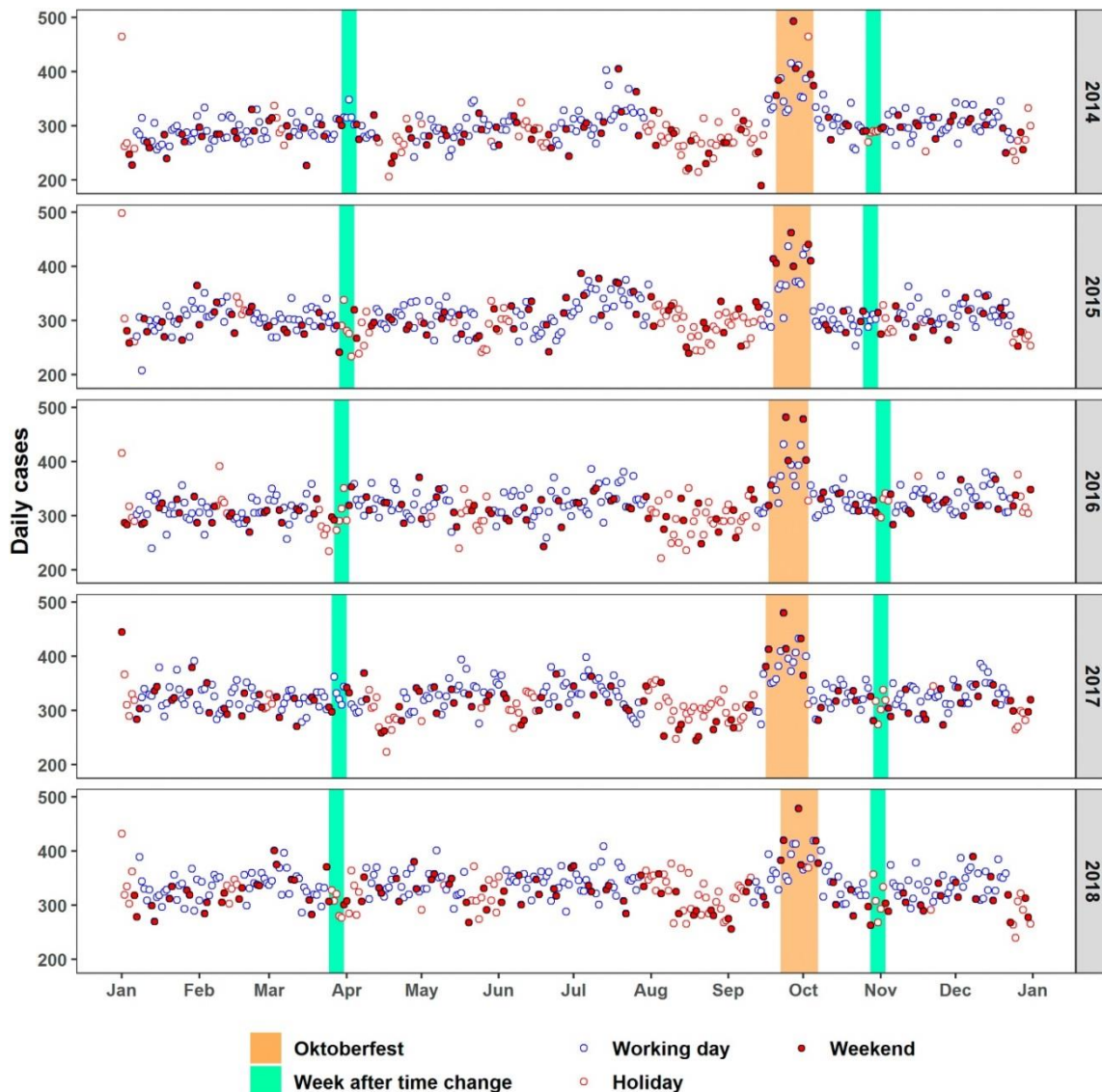


Abb. 3.2 Tägliche Notaufnahmehzahlen (IVENA) im Großraum München.

### 3.1.2 Umweltdaten und Kalendervariablen

Folgende Kalendervariablen wurden als erklärende Faktoren herangezogen: Jahr, Wochentag, Ferien (gesetzliche Feiertage und bayerische Schulferien), Tage des Oktoberfests, Silvester und Neujahr sowie die Arbeitstage in der Woche vor und nach der Zeitumstellung (um einen eventuellen „Jetlag“ Effekt zu berücksichtigen).

Als erklärende Umweltvariablen wurden Daten in stündlicher Auflösung ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) zur Luftverschmutzung (Feinstaub PM10, Ozon  $\text{O}_3$ , Stickstoffmonoxid NO und Stickstoffdioxid  $\text{NO}_2$ ) vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU, 2020) sowie stündliche meteorologische Daten (Lufttemperatur, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Bedeckung, absolute Luftfeuchte, Niederschlag, Sonnenscheinstunden sowie Wetterwarnungen) vom Deutschen Wetterdienst (DWD Station No. 3379 sowie CDC Climate Data Center, 2020) für München und den Zeitraum 2014-2018 bezogen und zu Tageswerten (Mittel, Minimum, Maximum, Summe) über einen Zeitraum von 1 bis 3 Tagen aggregiert. Der UTCI wurde aus Lufttemperatur,

Windgeschwindigkeit, relativer Feuchte und mittlerer Strahlungstemperatur (Bröde et al. 2012) berechnet, wobei letztere aus relativer Feuchte und Himmelsbedeckung approximiert wurde (siehe Lindauer et al. 2017). Mittlere Tageswerte für alle Variablen und Jahreszeiten und ihre Korrelationsmatrix finden sich in Tabellen 2 und 3 sowie Abb. 2 des Papers.

## 3.2 Methoden

Tägliche Notfallaufnahmen wurden mit linearen Modellen vorhergesagt und zwar in Abhängigkeit von kalendarischen, meteorologischen und luftchemischen Variablen sowie Wetterwarnungen. Dabei wurden für meteorologische und luftchemische Variablen Verzögerungseffekte („lag effects“) von ein bis drei Tagen berücksichtigt. Alle möglichen 222 Prädiktorvariablen sind in Tabelle S3 aufgelistet (s. Appendix), die in einem zweistufigen Verfahren (Schritt 1 Auswahl der Variablen für 2014-2017 mit dem Bayes'schen Informationskriterium (BIC), Schritt 2 Kreuzvalidierung am Jahr 2018) auf ein optimales Set minimiert wurden. Insgesamt wurden 32 Modelle für vier Jahreszeiten in Kombination mit den Untergruppen nach Alter, Geschlecht und chirurgische versus internistische Abteilung berechnet. Die Modelldiagnose wies auf keine statistischen Probleme (wie Autokorrelation der Residuen, Abweichung von der Normalverteilung, Multikollinearität) hin, die Modellgüte lag bei bis zu  $R^2$  0,71. Für jeden Modellfaktor in der Darstellung der Ergebnisse (Kapitel 3.3) gibt die zugehörige Zahl die Veränderung der täglichen ED-Aufnahmen pro eine Einheit der entsprechenden Variablen an.

## 3.3 Ergebnisse

Alle Analysen zeigen, dass neben den wichtigen kalenderbezogenen Variablen Umweltfaktoren die tägliche Zahl der Notaufnahmen über einen Zeitraum von fünf Jahren im Großraum München signifikant steuern.

Von den 32 Modellen stützen sich 10 auf Wetter- und Luftschadstofffaktoren, 15 auf Wetter- und 6 auf Luftschadstofffaktoren. Nur ein Modell basiert ausschließlich auf kalenderbezogenen Variablen. Die Effekte der verschiedenen Variablen variieren mit Jahreszeit, Alter und Geschlecht der Patienten und Notaufnahmeart (siehe Abb. 3.3 und 3.4). Insofern unterstreichen die Ergebnisse unseres Projektes, dass man die Effekte von Klimawandelfaktoren auf einzelne Gesundheitsfaktoren nicht isoliert betrachten sollte, sondern immer alle auch Personengruppen spezifische und kalenderbezogene Einflussvariablen mitdiskutieren muss. Gerade diese können dann im Anschluss wertvolle Hinweise bezüglich spezifischeren Klimaanpassungsstrategien liefern.

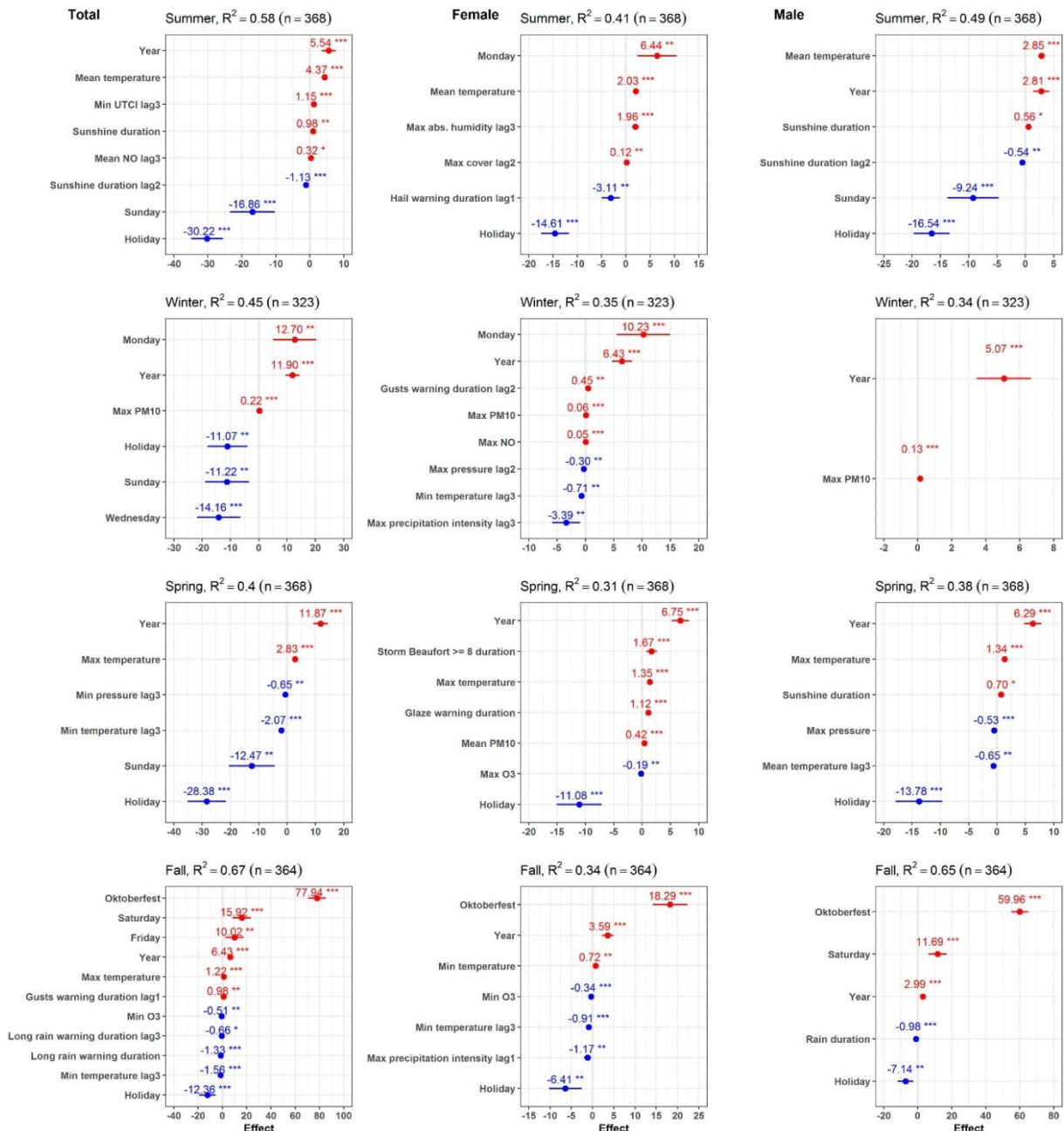
### 3.3.1 Tägliche Transporte in Notaufnahmen

Kalendervariable: Die täglichen ED-Aufnahmen stiegen im Zeitraum 2014-2018 um 5,5, 6,4, 11,9 und 11,87 Patienten pro Jahr (Sommer, Herbst, Winter bzw. Frühjahr) an (Abb. 3.3). Sie waren während des dreiwöchigen Oktoberfestes außergewöhnlich hoch (+77,9), besonders freitags (+10,0) / samstags (+15,9) und bei Männern. In allen Jahreszeiten waren die Zahlen in den Ferien niedriger, besonders im Frühjahr (-28,4) und Sommer (-30,2). Sonntags waren die ED-Zahlen niedriger (Frühjahr -12,5 / Sommer -16,9 / Winter -11,2), montags im Winter höher (+12,7).

Wetterfaktoren: Verschiedene Wettermerkmale beeinflussten die täglichen ED-Aufnahmen in allen Jahreszeiten außer im Winter. In den wärmeren Jahreszeiten waren die Aufnahmen signifikant mit höheren Temperaturen (z.B. +4,4 im Sommer Mitteltemperatur, +2,8 im

Frühling für Maximumtemperatur), UTCI und Sonnenscheinstunden (+1) verbunden, mit bis zu 3 Tagen Verzögerung waren auch reduzierende Effekte zu verzeichnen (z.B. -2,1 im Frühling für Minimumtemperatur). Ungünstige Wetterbedingungen in nicht-sommerlichen Jahreszeiten waren entweder mit steigenden ED-Aufnahmen (bei Sturm) oder mit sinkenden Aufnahmen (z.B. -1,3) bei lang anhaltenden Regenfällen im Herbst, Wetterwarnungen) verbunden.

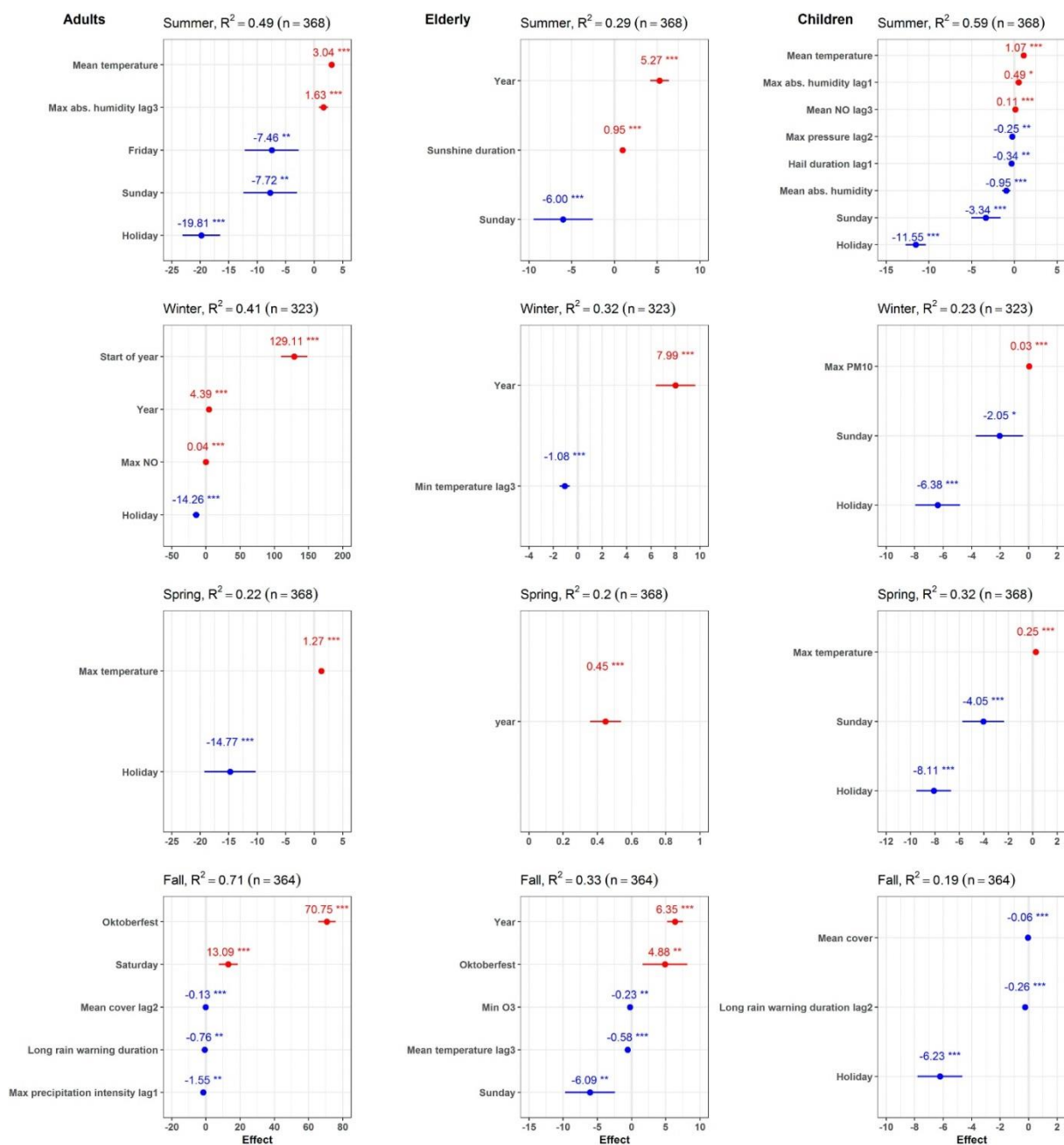
Luftschadstoffe: Meistens, aber nicht ausschließlich im Winter, waren steigende ED-Aufnahmen mit höheren NO- und PM10-Konzentrationen verbunden (siehe Abb. 3.3 für Details).



**Abb. 3.3** Veränderung der Anzahl der täglichen ED-Aufnahmen = Effect (gesamt, weiblich, männlich), die mit einem Anstieg des jeweiligen Faktors (2014-2018) um eine Einheit verbunden ist (Bei Temperaturen z.B. +1°C, Oktoberfest nein=0, ja =1). Balkenlängen geben Konfidenzintervalle an, Signifikanzniveaus \* p<.05, \*\* p<.01, \*\*\* p<.001, blau markiert abnehmende, rot zunehmende ED-Aufnahmen.

### 3.3.2 Tägliche Transporte in Notaufnahmen nach Alter

Kalendervariablen: Bei älteren Patienten stiegen die ED-Aufnahmen um 5-8 pro Jahr außer im Frühjahr (+0,5), bei Erwachsenen nur im Winter (+4,4), bei Kindern gab es keinen signifikanten Trend. Das Oktoberfest beeinflusste die Anzahl der erwachsenen (+70,8) und älteren Patienten (+6,4). Der Jahreswechsel war mit einem enormen Anstieg der Zahl der erwachsenen Patienten verbunden (+129,1), hatte aber keinen Einfluss auf Kinder und ältere Menschen. An Feiertagen und Ferien waren die ED-Aufnahmen für Kinder und erwachsene Patienten niedriger. In vielen Fällen war Sonntag der Wochentag mit weniger Patienten in der Notaufnahme, z.B. -6,1 weniger Erwachsene im Sommer. Alle Effekte sind in Abb. 3.4 dargestellt.



**Abb. 3.4** Veränderung der Anzahl der tägl. ED-Aufnahmen (Erwachsene, Ältere, Kinder), die mit einem Anstieg des jeweiligen Faktors (2014-2018) um eine Einheit verbunden ist. Balkenlängen geben Konfidenzintervalle an, Signifikanzniveaus \* p<.05, \*\* p<.01, \*\*\* p<.001.

Wetterfaktoren: Im Herbst sank die Anzahl der ED-Patienten, oftmals mit Verzögerung, nach „landläufig schlechtem“ Wetter, wie maximale Niederschlagsintensität, Bewölkung oder Warnungen vor Dauerregen (Erwachsene, Kinder). Die Zahl der älteren ED-Patienten in Herbst und Winter sank mit dreitägiger Verzögerung mit der mittleren / minimalen Temperatur. Es gab dagegen keinen Einfluss des Wetters auf die Anzahl der EDs bei Erwachsenen und Kindern im Winter. Im Frühling hatte nur die aktuelle Tagesmaximumtemperatur einen positiven Einfluss auf die Anzahl der erwachsenen Patienten (+1,3) und Kinder (+0,3). Im Sommer stieg die Anzahl der älteren Patienten mit der Sonnenscheindauer, die der Erwachsenen (+3,0) und der Kinder (+1,1) mit der Temperatur.

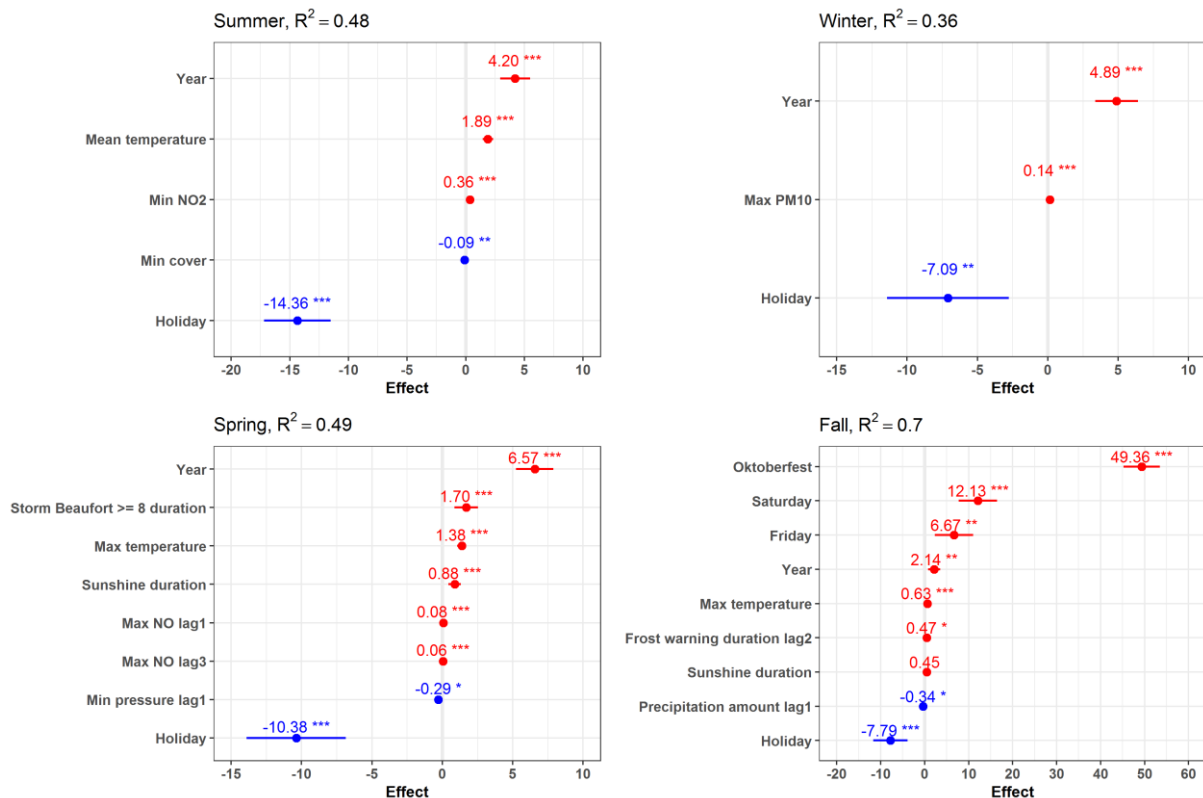
Luftschadstoffe: Der Einfluss der Schadstoffe auf die Anzahl der Patienten war geringer, wenn jede Altersgruppe einzeln betrachtet wurde. O<sub>3</sub>-Konzentrationen hatten einen negativen Effekt auf die Anzahl der älteren Patienten im Herbst, höhere NO-Konzentrationen im Winter einen positiven auf die ED- Anzahl der Erwachsenen. Die ED-Zahl bei Erwachsenen und Kindern stieg mit höheren maximalen PM10-Konzentrationen im Winter und verzögert mit NO-Konzentrationen im Sommer.

### 3.3.3 Tägliche Aufnahmen nach Typ der Notaufnahme

Zusätzlich wurden getrennt für die internistischen und chirurgischen Notaufnahmen die täglichen ED Fälle über IVENA in den vier Jahreszeiten in Abhängigkeit von Kalendervariablen sowie Wetter- und Luftschadstofffaktoren modelliert. Hier zeigte sich, dass die Zahl der chirurgischen Notfälle im Sommer mit der Durchschnittstemperatur stieg. Die Dauer von Gewittern, die Höchsttemperatur und die Sonnenscheindauer führten zu einem Anstieg der chirurgischen Fälle im Frühjahr, während die Niederschlagsmenge am Vortag einen leichten abnehmenden Effekt aufwies (Abb. 3.5).

Auch internistische Fälle stiegen im Sommer bei einer höheren Durchschnittstemperatur an, zusätzlich führte höhere Luftfeuchte und die mittlere Bewölkung mit einer Verzögerung von drei bzw. zwei Tagen zu einem leichten Anstieg der ED Fälle.





**Abb. 3.5** Veränderung der Anzahl der tägl. ED-Aufnahmen in der Abteilung Chirurgie, die mit einem Anstieg des jeweiligen Faktors (2014-2018) um eine Einheit verbunden ist. Balkenlängen geben Konfidenzintervalle an, Signifikanzniveaus \* p<.05, \*\* p<.01, \*\*\* p<.001.

### 3.4 Diskussion

Die Ergebnisse dieser Studie bestätigen den Zusammenhang zwischen wärmeren Durchschnitts- und Maximaltemperaturen im Frühjahr und Sommer für fast alle untersuchten Untergruppen (Alter, Geschlecht und chirurgische versus internistische Abteilung). Die Auswirkungen lagen zwischen ~1 bis ~4 zusätzlichen ED Fällen pro °C, so dass große Abweichungen in diesen Jahreszeiten (z.B. +7°C während der Hitzewelle im Juli 2015) zu einem Anstieg von über 25 Fällen führen können. Obwohl andere Studien oft auf einen Zusammenhang zwischen Hitze und einem Anstieg der Fälle bei älteren Personengruppen hinweisen, zeigte sich dieser Effekt erstaunlicherweise nicht in München. Vielleicht liegt das an geeigneten Hitzewarnsystemen in Verbindung mit einem hohen Lebensstandard und einer guten ärztlichen Versorgung. In allen anderen Untergruppen zeigte sich jedoch eine starke Auswirkung von Hitzestress im Frühjahr und Sommer, die hauptsächlich durch die reine Temperaturvariablen und nicht durch den UTCI bestimmt wurde.

Wichtig für Planungen im Rahmen der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie (BayKLAS) ist, dass das Zusammenspiel von verschiedenen Faktoren zu komplexen und kombinierten Faktoren führt, die je nach Jahreszeit, Geschlecht, Alter und Notfall variieren. Deshalb könnten personengruppenspezifische Maßnahmen den Erfolg erhöhen.

Insgesamt deutet das Gesamtmuster aber darauf hin, dass mit dem fortschreitenden Klimawandel, der durch mehr heiße Tage und eine größere Variabilität der Niederschläge sowie Dürreperioden gekennzeichnet ist, die Zahl der täglichen Notfalleinsätze weiter steigen könnte. Besondere Aufmerksamkeit sollte auch den Konzentrationen der Luftschadstoffe NO- und PM10 im Winter gewidmet werden, um eine höhere Morbidität zu verhindern, die

möglicherweise Rettungseinsätze erforderlich macht. Eine realistische Vorhersage der Einsätze des Rettungsdienstes, die neben den kalendarischen Faktoren auch das Wetter und insbesondere im Winter die Luftschadstoffe berücksichtigt, sollten deshalb sowohl im Schwerpunkt Wetterereignisse und nicht-infektiöse Krankheiten als auch bei den Allgemeinen Maßnahmen im Bereich Gesundheit berücksichtigt werden.

## 4 Alpine Unfälle in Österreich

### Kurzzusammenfassung

Der Klimawandel und das damit zunehmende Risiko extremer Wetterereignisse beeinflussen die menschliche Gesundheit auch über Unfälle, insbesondere gibt es Hinweise bezüglich von Unfällen in der Land- und Forstwirtschaft sowie alpinen Unfällen. Aufgrund der neuen Datenschutzregelung und Personalwechsel war es nicht wie ursprünglich geplant möglich, Unfalldaten der bayerischen Bergwacht und der SVLFG Berufsgenossenschaft zu erhalten. Als alternative Datenquelle konnten - mit LfU und LGL abgestimmt - Daten zu Bergunfällen in Österreich erworben werden, um ein Modell des Wettereinflusses auf Alpinunfälle zu entwickeln (Teil von Meilenstein 4). Unsere Hypothese war, dass die täglichen Unfallzahlen sowohl im Sommer- als auch im Winterhalbjahr von Kalendervariablen und Wetterparametern (z.B. Niederschlag, Sonnenschein) beeinflusst werden.

Die Studie „*The influence of weather on fatal accidents in Austrian mountains*“ von Matthias Neumair, Nicole Estrella, Annette Menzel und Donna P. Ankerst ist das Ergebnis von Meilenstein 7, AP 7.2 und wurde bei der internationalen, begutachteten Zeitschrift *Weather, Climate, and Society* angenommen und ist online veröffentlicht.

Die Studie zeigt zusammenfassend, dass das wärmere Temperaturen und andere Veränderungen im Wetter, direkt und / oder indirekt durch die Besucherzahlen moduliert, einen Einfluss auf tödliche Unfälle in allen Jahreszeiten hat. Es kommt zu steigenden Zahlen bei sonnigem, warmem und trockenem Wetter, besonders an Wochenenden, und zu sinkenden Zahlen bei Schneemangel im Winter (Abb. 4.1).



**Abb. 4.1** Graphische Zusammenfassung der Studie Neumair et al. (2021) *The influence of weather on fatal accidents in Austrian mountains*. (© Fritzi Menzel).

## 4.1 Daten

### 4.1.1 Österreichischer Bergrettungsdienst

Der Untersuchung liegen 3466 von der Alpinpolizei registrierte tödliche Bergunfälle im Zeitraum November 2006 bis Oktober 2018 zugrunde, die vom Österreichischen Kuratorium für Alpine Sicherheit für alle Bundesländer Österreichs außer Burgenland und Wien zur Verfügung gestellt wurden. Es sind Bundesland, Ort bzw. Gemeinde, und Längen- und Breitengrad sowie Datum, Uhrzeit und Anzahl der Beteiligten vermerkt sowie einige Textangaben zu Licht- und Wetterbedingungen. Wenn keine Lagekoordinaten vorlagen, wurde das Zentrum der jeweiligen Gemeinde als Lage approximiert (siehe Abb. 4.2). Der Auswertung lagen 3285 Unfälle zugrunde, da z.T. geographische Informationen fehlten und Flugunfälle, Unfälle in Höhlen und Liftunfälle ausgeschlossen wurden. Insgesamt wurden 1817 Unfälle im Sommer- und 1468 im Winterhalbjahr untersucht.

### 4.1.2 Wetterdaten

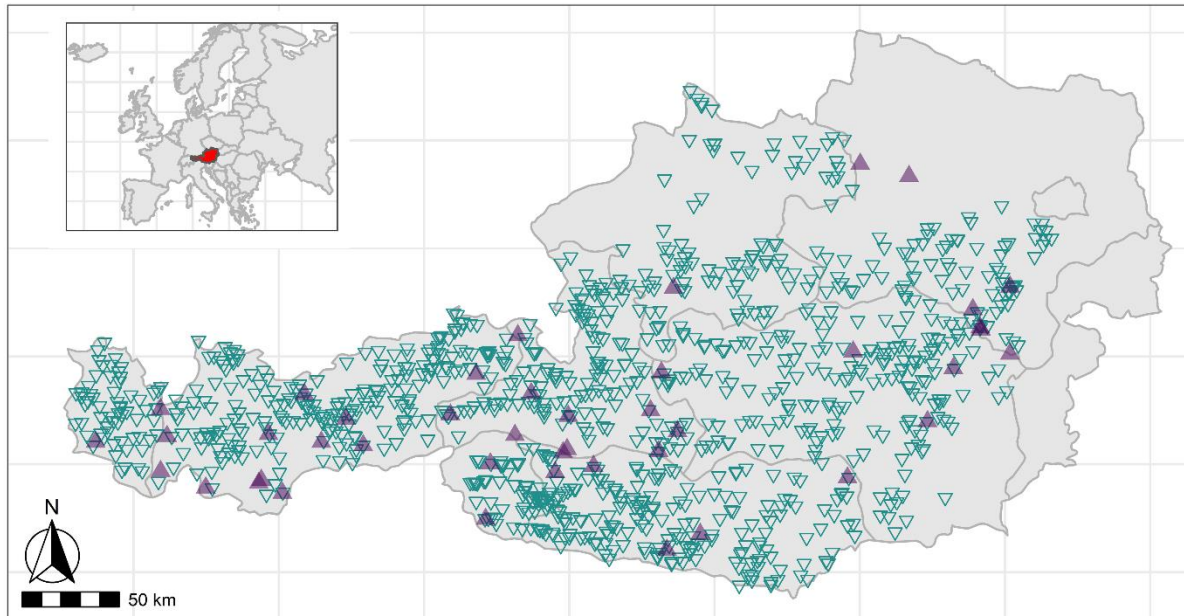
Von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) wurden die Daten von 43 Klimastationen oberhalb von 900 m ü. NN für den Untersuchungszeitraum erworben. Der Schwellenwert von  $\geq 900$  m wurde gewählt, um die für Bergsportaktivitäten typischen Regionen im Zuständigkeitsbereich der Alpenpolizei widerzuspiegeln. Um Jahres- und Standortabhängigkeiten von kontinuierlichen Wettervariablen auszuschließen, wurden Anomalien als Abweichungen von Durchschnittswerten berechnet (WMO 2017). Die hier verwendeten meteorologischen Variablen sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

**Tabelle. 4.1** Beschreibung der meteorologischen Variablen der 43 Klimastationen von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG).

Meteorologische Variable	Zeit (avg = Mittel)	Einheit / Kategorie
10,5	max, min, avg, 7am, 2pm, 7pm	°C
Luftdruck	avg, 7am, 2pm, 7pm	hPa
Relative Luftfeuchte	avg, 7am, 2pm, 7pm	%
Globalstrahlung	total (Tageswert)	kWh/m <sup>2</sup>
Niederschlag	7am, 7pm, total (Tagessumme)	mm
Niederschlagsart	7am, 7pm, total (Tagessumme)	z.B. Regen, Schnee, Hagel
Windgeschwindigkeit	7am, 2pm, 7pm	Beaufort, m/s
Windrichtung	7am, 2pm, 7pm	1/32, 32=N, 16=S
Maximale Windgeschwindigkeit	0am – 12pm	m/s
Zeitpunkt der maximalen Windgeschwindigkeit	0am – 12pm	hh:mm
Bewölkung / Bedeckungsgrad	avg, 7am, 2pm, 7pm	1/10 Bedeckung
Schneehöhe	7am	cm
Schneeart	7am	Keine Schneedecke, Schneereste /Flecken, durchbrochene Schneedecke, geschlossene Schneedecke
Neuschneehöhe	total (Gesamt)	cm

Da es keine Höheninformationen zu den Unfalldaten gab, wurden Anomalien (Abweichungen von einem Mittelwert für den entsprechenden Tag berechnet, siehe WMO 2017), um lokale

Unterschiede zwischen dem Unfallort und der Wetterstation zu berücksichtigen. Alle Unfalldaten wurden der nächstgelegenen Wetterstation mit den entsprechenden Witterungsvariablen zugeordnet. Es wurden alternativ auch andere Optionen getestet, die Unfälle Wetterstationen und ihren Daten zuzuordnen. Alle Methoden resultierten aber in vergleichbaren Odds Ratios und p-Werten.



**Abb. 4.2** Gemeinden / Lage von 3285 tödlichen Bergsportunfällen im Zeitraum November 2006 bis Oktober 2018 in Österreich. Violette Dreiecke zeigen Standorte von 43 ZAMG-Klimastationen, offene grüne Dreiecke kennzeichnen die analysierten Todesfälle auf dem Koordinatenpunkt der zugehörigen Gemeinde.

## 4.2 Methoden

Da nur an weniger als 2 % der Tage mindestens ein Todesfall auftrat, wurden die Analysen mit aggregierten Daten durchgeführt (Tag mit Todesfällen / Tag ohne Todesfälle) und zwar gepoolt für beide Halbjahre (Sommer 1.5.-31.10. / Winter 1.11.-30.4.) und getrennt nach ausgeübten Disziplinen.

Zeitliche Trends wurden mit linearen Regressionen bzw. Regressionsmodellen (siehe Glossar) untersucht. Die Wettervariablen an Tagen mit / ohne Todesfälle wurde anhand von t-Tests und Chi-Quadrat-Tests nach Pearson verglichen. Mit multivariablen logistischen Regressionsanalysen wurden die unabhängigen Wettereffekte auf die Todesfälle untersucht, mit dem Akaike-Informationskriterium (AIC) wurde dabei das beste Einzelmerkmal jeder Gruppe von meteorologischen Variablen ausgewählt (z. B. bei der Temperatur aus Tagesmittelwert, Minimum, Maximum oder Messungen um 7 Uhr, 14 Uhr und 19 Uhr) und dann in einem zweiten Schritt zusätzlich zum Faktor Wochenende die meteorologischen Prädiktorvariablen mit dem Bayes'schen Informationskriterium (BIC) ausgewählt.

## 4.3 Ergebnisse

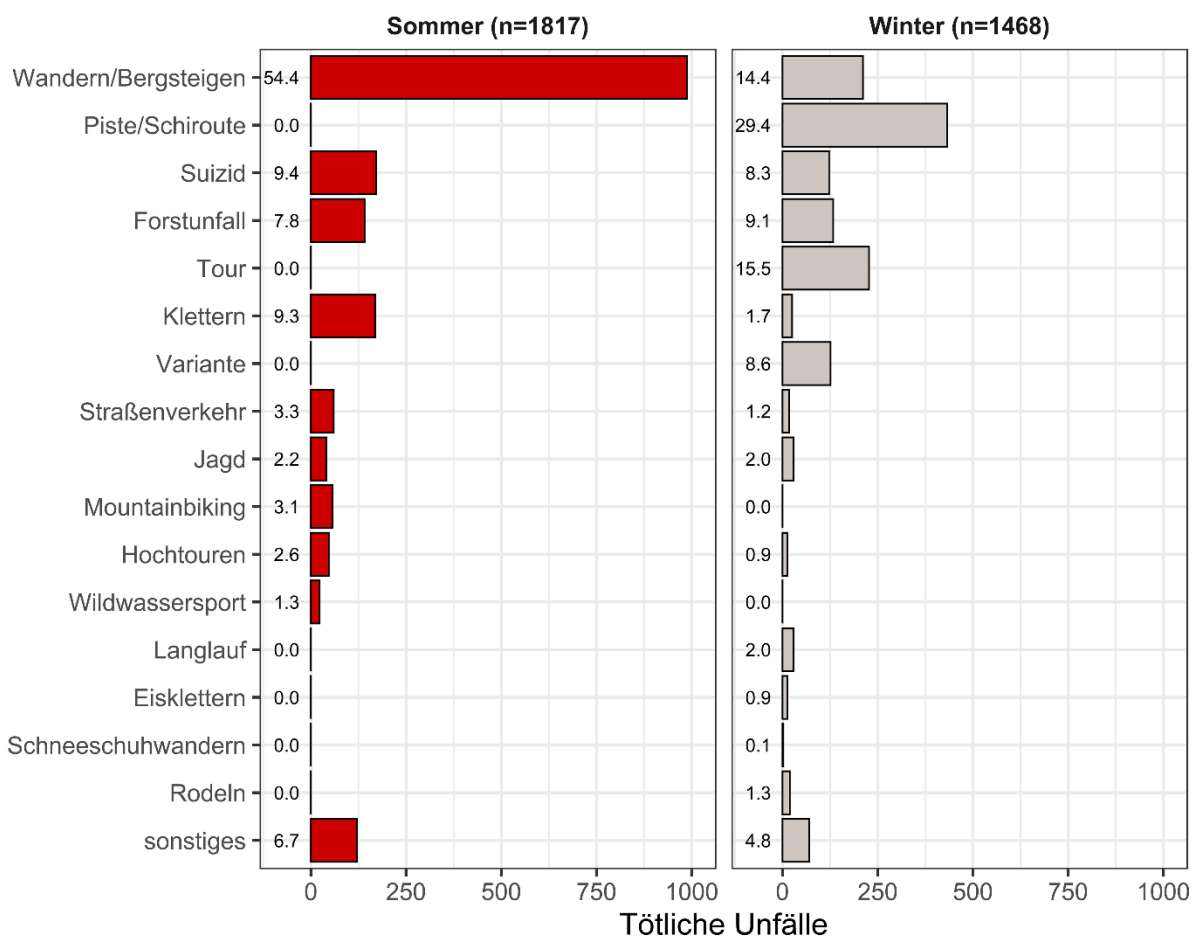
### 4.3.1 Überblick über die Todesfälle

Die Merkmale der 3285 tödlichen Alpinunfälle, die von der österreichischen Alpinpolizei für den Zeitraum von November 2006 bis Oktober 2018 gemeldet wurden und auf einen Zusammenhang mit den Wettervariablen untersucht wurden, sind in Abbildung 4.3 zusammengefasst. Mehr tödliche Unfälle ereigneten sich im Sommer (55,3 % von 3285) im

Vergleich zum Winter (44,7 %). Die meisten tödlichen Unfälle ereigneten sich im Sommer beim Bergsteigen, d. h. beim Wandern und Trekking (54,4 % von 1817) und im Winter beim Skifahren (29,4 % von 1468).

Zwei Ursachen für tödliche Unfälle, die sowohl im Sommer als auch im Winter häufig vorkamen, waren Selbstmorde, die 9,4 % bzw. 8,3 % aller tödlichen Unfälle in der jeweiligen Jahreszeit ausmachten, und Unfälle bei der Forstarbeit mit 7,8 % bzw. 9,1 %.

Die Gesamtzahl der Todesfälle bzw. der häufigsten Todesfallarten veränderte sich im Untersuchungszeitraum nicht signifikant.



**Abb. 4.3** Verteilung von tödlichen Unfällen nach Disziplin und Jahreszeit zwischen dem 1. November 2006 und 31. Oktober 2018 in absolute Zahlen und Prozentwerten.

#### 4.3.2 Wahrscheinlichkeit für tödliche Unfälle bei den verschiedenen Aktivitäten

Die Multivariablenanalyse ergab, dass es signifikante Assoziationen zwischen tödlichen Unfällen und verschiedenen Wettervariablen gab. Die wichtigsten sind Bewölkung, Schneeart, Globalstrahlung, Niederschlag, Temperatur und Luftfeuchtigkeit (Tabelle 4.2). Statistisch signifikante Wochenend-Effekte, die die Wahrscheinlichkeit tödlicher Unfälle erhöhen, wurden für viele der spezifischen Disziplinen festgestellt. Bei der Berechnung der Größenordnungen der Auswirkungen der spezifischen Wettervariablen wurden solche Effekte herausgerechnet (d.h. bereinigt).

Die Auswirkungen der Bewölkung verringerten die Wahrscheinlichkeit tödlicher Unfälle sowohl im Winter als auch im Sommer. Im Einzelnen verringerte eine 10 %ige Zunahme der

Bewölkung die Wahrscheinlichkeit tödlicher Unfälle beim Bergsteigen um 5 %, beim Klettern um 10 %, bei anderen Sommersportarten um 9 % und beim Skifahren im Winter um 7 %.

Während Schneefall die Wahrscheinlichkeit tödlicher Unfälle im Sommer reduzierte, erhöhte er deren Wahrscheinlichkeit im Winter deutlich. Insbesondere beim Bergsteigen im Sommer reduzierte sich die Wahrscheinlichkeit von tödlichen Unfällen für die Schneearten Flecken um 55%, durchbrochen um 64% und geschlossen um 80% im Vergleich zur Referenz ohne Schnee. Im Gegensatz dazu vervierfachte sich fast die Wahrscheinlichkeit für tödliche Unfälle beim Skifahren im Winter bei geschlossener Schneedecke. Beim Skifahren abseits der Pisten im Winter (=Variante) nahm die Wahrscheinlichkeit für tödliche Unfälle für die Schneearten Flecken, durchbrochen und geschlossen im Vergleich zu keinem Schnee um das 2,4, 2,3 und 7,4-fache zu.

Bei einem Anstieg der Globalstrahlung um 1 kWh/m<sup>2</sup> erhöhte sich die Wahrscheinlichkeit von tödlichen Unfällen beim Bergsteigen im Sommer und bei Touren im Winter um 11% bzw. 28%. Eine Zunahme pro 1 mm Niederschlag wurde nur im Sommer mit tödlichen Unfällen beim Klettern in Verbindung gebracht, Wahrscheinlichkeit sank um 15%. Die Temperatur hatte sowohl im Sommer als auch im Winter einen Einfluss, bei einem Temperaturanstieg um 1°C stieg die Wahrscheinlichkeit für tödliche Unfälle beim Mountainbiking und Selbstmord um 13% bzw. 8%. Die relative Luftfeuchtigkeit bei einem Anstieg von 1% schließlich reduzierte die Zahl der tödlichen Unfälle beim Bergsteigen im Winter nur geringfügig um 2%

**Tabelle 4.2** Ergebnisse des multivariablen logistischen Regressionsmodells zur Vorhersage von tödlichen Unfällen auf der Basis meteorologischer Variablen für verschiedene Bergsportdisziplinen im Sommer und Winter

Meteorologische Variable	Odds Ratio	95% Konfidenz interval	p-Wert
<b>Sommer</b>			
<b>Wandern/Bergsteigen (n=965) (n=96514:00)</b>			
Bewölkung (Mittel) (pro 1/10)	0.95	0.92 – 0.97	<0.0001
Schneedecke, Vergleich=keine			<0.0001
- Flecken	0.45	0.24 – 0.76	
- durchbrochen	0.36	0.17 – 0.65	
- geschlossen	0.20	0.10 – 0.34	
Globalstrahlung (pro 1 kWh/m <sup>2</sup> )	1.11	1.06 – 1.16	<0.0001
Wochenende	1.45	1.27-1.65	<0.0001
<b>Klettern (n=169)</b>			
Niederschlag 7:00 (pro 1 mm)	0.85	0.78-0.93	<0.0001
Bewölkung (Mittel) (pro 1/10)	0.90	0.86-0.94	<0.0001
<b>Mountainbiking (n=57)</b>			
Lufttemperatur 19:00 (pro 1°C)	1.13	1.05-1.21	<0.0005
<b>Hochtouren (n=47)</b>			
Wochenende	2.85	1.60-5.09	<0.0004
<b>Wildwassersport (n=23)</b>			
Wochenende	4.70	2.04-11.67	<0.0002
<b>Sonstige (n=121)</b>			
Bewölkung 14:00 (pro 1/10)	0.91	0.86-0.96	<0.0003
<b>Winter</b>			
<b>Wandern/Bergsteigen (n=210) (n=96514:00)</b>			
Rel. Feuchte 14:00 (pro 1 %)	0.98	0.98 – 0.99	<0.0001
Wochenende	1.69	1.28-2.23	<0.0002
<b>Piste/Schiroute (n=428)</b>			
Bewölkung 14:00 (pro 1/10)	0.93	0.90 – 0.95	0.0001
Schneedecke, Vergleich=keine			<0.0001
- Flecken	1.88	1.09-3.13	
- durchbrochen	2.52	1.60 – 3.92	

- geschlossen	3.69	2.74 – 5.10	
Wochenende	1.45	1.19 – 1.77	<0.0002
<b>Suizid (n=121)</b>			
Lufttemperatur 7:00 (pro 1°C)	1.08	1.04 - 1.13	<0.0001
<b>Tour (n=225)</b>			
Globalstrahlung (pro 1 kWh/m <sup>2</sup> )	1.28	1.12 – 1.46	<0.0004
Wochenende	2.08	1.60 – 2.70	<0.0001
<b>Variante (n=124)</b>			
Schneedecke, Vergleich=keine			<0.0001
- Flecken	2.42	0.63 – 8.01	
- durchbrochen	2.33	0.69 – 7.31	
- geschlossen	7.39	3.71 – 17.50	

Nicht signifikant / zu wenig Fälle:

Forstunfälle, Straßenverkehr, Jagd, Langlauf, Eisklettern, Schneeschuhwandern, Rodeln

Das Model basiert auf der Anzahl der Tage mit tödlichen Unfällen, gegeben durch n.

## 4.4 Diskussion

Diese Studie zeigt, dass ein signifikanter Zusammenhang zwischen tödlichen Unfällen und bestimmten meteorologischen Variablen besteht und bestätigt dadurch Studien, die in anderen Regionen (z.B. Frankreich, Soulé et al. 2017) durchgeführt wurden.

An sonnigen und trockenen Tage kommen an Wochenenden mehr Besucher in die österreichischen Berge, was wahrscheinlich zu mehr Todesfällen führt. Aufgrund fehlender Daten zu den Besucherzahlen für die Region und Disziplin war es nicht möglich, die Veränderungen von Risikoraten pro Besucher abzuschätzen. Daher müssen die hier aufgeführten meteorologischen Effekte als kumulativ zu den wetterabhängigen Besucherzahlen sowie den wetterabhängigen Gefahrenquoten und dem Besucherverhalten gesehen werden. Denn bei schönem Wetter schwindet der Respekt vor den Bergen (Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit). Diese Wetterabhängigkeit der Todesfälle (und höchstwahrscheinlich auch der Unfälle) (Unguryanu et al. 2020) zeigt die dringende Notwendigkeit einer besseren Prävention auch in dieser Hinsicht. So sollte die alpine Wettervorhersage nicht nur Bergsteiger vor Gewitter oder frontalen Temperaturstürzen warnen, sondern auch Empfehlungen an die immer zahlreicher werdenden Freizeitbesucher in den Bergen geben, sich bei guten (und oftmals zu guten) Wetterbedingungen ebenso vorsichtig zu verhalten.

## 5 Mortalität, Verkehrsunfälle und Krankenhauseinweisungen in Bayern

### Kurzzusammenfassung

Hitzestress erhöht nicht nur die allgemeine Mortalität, sondern hat möglicherweise auch Auswirkungen auf die Anzahl von Krankenhauseinweisungen und Verkehrsunfällen. Derartige Effekte könnten durch häufigere und intensivere extreme Wetterbedingungen als Folge des Klimawandels in Zukunft noch verschärft werden. Hitzestress wird in neueren Studien vorzugsweise durch thermische Indizes, wie z.B. den Universellen Thermischen Klimaindex (UTCI), der mehrere Wetterkomponenten integriert, wiedergegeben. In dieser

Analyse haben wir deshalb für den Zeitraum 1995 bis 2015 den saisonalen und räumlichen Zusammenhang zwischen UTCI und Mortalität in Bayern verglichen mit der Assoziation zwischen UTCI und Krankenhauseinweisungen sowie Verkehrsunfällen (2002 – 2015).

Die Ergebnisse zeigen für 56 Millionen Krankenhauseinweisungen und 2,5 Millionen Todesfälle einen ansteigenden und bei ca. 930.000 Verkehrsunfällen und 1,7 Millionen verletzten Personen dagegen einen abnehmenden Trend über den untersuchten Zeitraum. Die Auswirkungen des UTCI waren bei allen drei untersuchten Datensätzen deutlich.

Die Studie „*Universal Thermal Climate Index associations with mortality, hospital admissions, and road accidents in Bavaria*“ von Wael Ghada, Nicole Estrella, Donna P. Ankerst und Annette Menzel ist bereits in der internationalen, begutachteten Zeitschrift PLOS ONE veröffentlicht worden. Diese Ergebnisse sind Teil von Meilenstein 6.

### 5.1.1 Daten des Statistischen Landesamtes

Daten zu Krankenhauseinweisungen und Sterbefällen für den Zeitraum 1995-2015 sowie zu Verkehrsunfällen für 2002-2015 in Bayern konnten anonymisiert von den Forschungsdatenzentren des Statistischen Bundesamtes und der Statistischen Landesämter bezogen und ausschließlich vor Ort an den entsprechenden Arbeitsplätzen analysiert werden. Angaben zu Krankenhauseinweisungen und zur Sterblichkeit umfassten Datum, Alter, Geschlecht und ICD-10-Code, während Verkehrsunfalldaten die Anzahl der an den einzelnen Unfällen beteiligten Personen enthielten. Insgesamt wurden 56.028.368 Krankenhauseinweisungen, 2.557.651 Sterbefälle und 930.861 Verkehrsunfälle mit 1.753.980 verletzten Personen für die Ebenen Bayern, Regierungsbezirke sowie Landkreise aggregiert (siehe Tabelle 5.1 und Abbildung 5.1). Es sind theoretisch Überschneidungen in den drei Datensätzen denkbar, diese Fälle sind allerdings nicht zu identifizieren. Für die Analyse wurden die Krankenhauseinweisungen nach Geschlecht, Alter (Kind: <18, Erwachsener: 18-70, Senioren: >70), Diagnosen (Herz, Lunge, extern z.B. äußere Einflüsse wie Sturz) und Tod aufgeschlüsselt, ähnlich auch die Sterbefälle nach Geschlecht, Alter und Diagnosen.

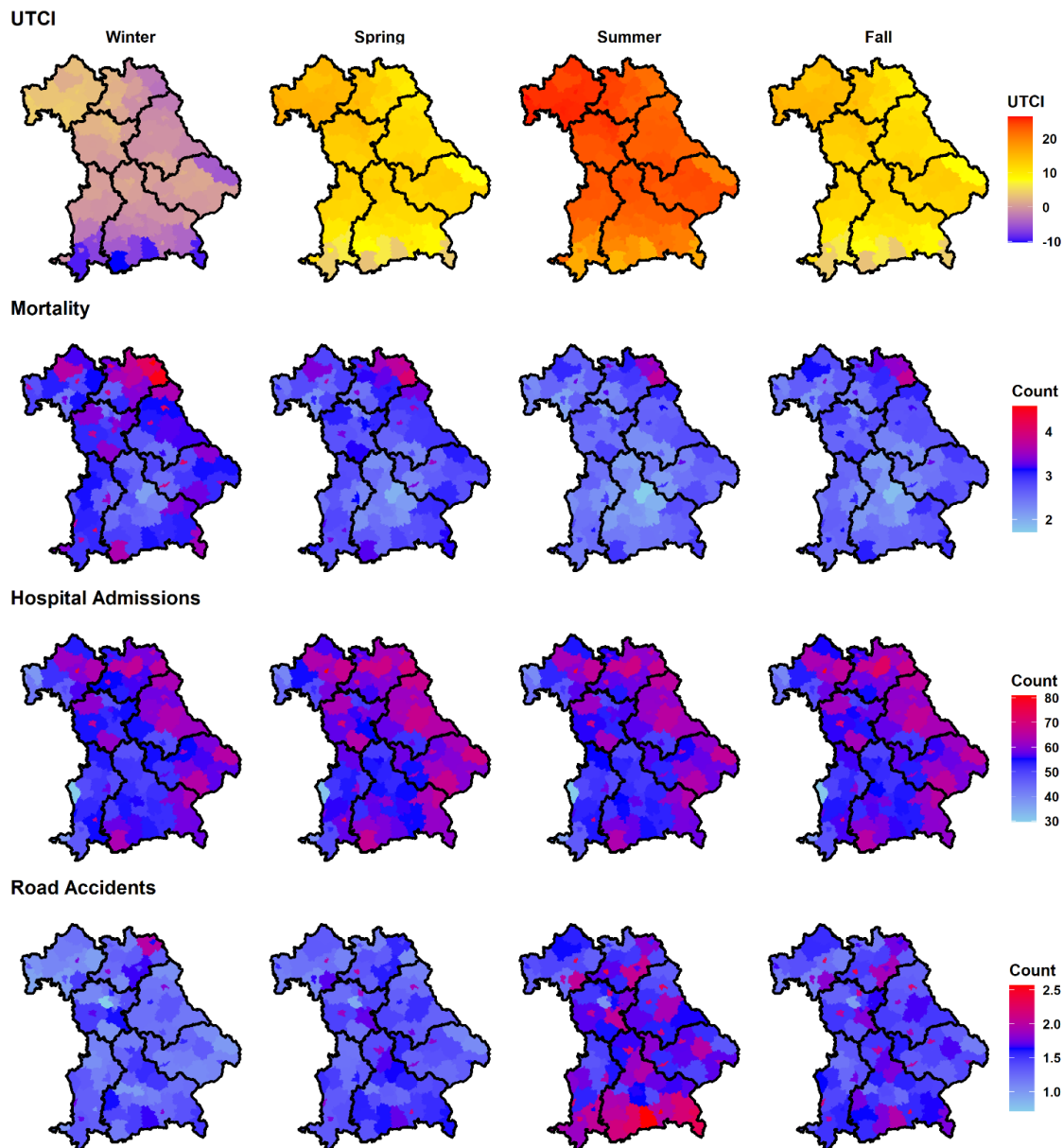
### 5.1.2 UTCI Werte

Für die Berechnung des UTCI werden die meteorologischen Größen Sonneneinstrahlung, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur benötigt, die in Form von stündlichen Messungen für 44 Stationen zwischen 1995-2015 in ganz Bayern vom Deutschen Wetterdienst (DWD) bezogen wurden. Für die UTCI Berechnung verwendeten wir die empfohlenen Näherungswerte für Topografie und Struktur des Geländes sowie Aktivitäten und Kleidung der Menschen in dem physiologischen Modell (Bröde et al. 2012). Stündliche UTCI-Werte an einzelnen Stationen wurden durch polynomiale Regressionsfunktionen der 6. Ordnung approximiert. Tägliche Gitter mit 200 m Auflösung wurden dann basierend auf den täglichen gemittelten UTCI Werten mit sogenannten Laplace-Approximationsmodellen (INLA) erstellt (siehe Zwischenbericht). Aus dieser Analyse wurden die täglichen UTCI-Mittelwerte für Bayern, jeden Regierungsbezirk und jeden Landkreis extrahiert (Abb. 5.1).



**Table 5.1** Gesamte und durchschnittliche tägliche Anzahl von Todesfällen, Krankenhauseinweisungen und Verkehrsunfällen in Bayern nach Jahreszeit sowie nach Untergruppen und Regierungsbezirken. Sd: Standardabweichung.

Variable	Gesamtzahl		Mittlere tägliche Anzahl							
			Winter	Sd	Frühjahr	Sd	Sommer	Sd	Herbst	Sd
<b>Krankenhauseinweisungen (1995-2015)</b>										
<b>Gesamt</b>	<b>56028368</b>	<b>100</b>	<b>7019.1</b>	3143.5	<b>7501.8</b>	2878.6	<b>7301.6</b>	2578.8	<b>7392.4</b>	2670.6
<b>Untergruppen</b>										
Frauen	30062529	53.7	3752.2	1629.1	4040.4	1496.5	3903.9	1327.6	3978.9	1383
Männer	25965546	46.3	3266.9	1523.0	3461.4	1389.9	3397.7	1258.3	3413.4	1296.4
Erwachsene	32776409	58.5	4151.2	1955.4	4360.8	1801.3	4242.9	1571.5	4336.8	1676.2
Kinder	6092564	10.9	764.8	237.3	828.1	219.7	821.0	207.1	762.5	187.2
Senioren	17158985	30.6	2103.1	1055.2	2312.9	966.2	2237.7	895.8	2293	914.9
Herz	1961849	3.5	248.3	487.9	268.9	510.5	244.2	464.0	261.7	499.9
Lunge	809849	1.4	117.3	230.7	115.6	224.8	91.8	178.4	97.8	188.9
Externes	1407912	2.5	171.8	320.1	182.9	332	197.6	357.9	181.7	331.9
Todesfälle	1187800	2.1	156.4	51.7	161.3	38.1	149.6	33.9	152.2	33.3
<b>Regierungsbezirke</b>										
Niederbayern	5168521	9.2	649.4	273.6	692.1	244.8	675.9	218.0	677.6	226.8
Oberbayern	19737933	35.2	2468.2	1144.1	2643.7	1062.3	2568.7	957.0	2611.3	983.7
Oberfranken	4789391	8.5	599.8	268.2	638.1	244.4	626.2	219.3	633.2	228.4
Oberpfalz	5127236	9.2	639.4	285.7	686.2	261.8	673.0	235.5	674.8	242.0
Schwaben	7174579	12.8	910.1	386.0	961.2	347.0	928.4	310.5	941.5	322.3
Unterfranken	6179137	11.0	772.5	358.2	826.4	329.9	806.0	297.4	817.1	308.1
Mittelfranken	7851571	14.0	979.6	442.0	1054.1	403.4	1023.4	359.5	1037	373.3
<b>Todesfälle (1995-2015)</b>										
<b>Gesamt</b>	<b>2557651</b>	<b>100</b>	<b>363.1</b>	33.9	<b>339.4</b>	33.6	<b>310.8</b>	26.3	<b>320.9</b>	24.4
<b>Untergruppen</b>										
Frauen	1356942	53.1	194.6	21.5	180.8	21.1	163.3	16.4	169.2	15.6
Männer	1200709	46.9	168.5	17.7	158.6	17.8	147.5	15.6	151.7	15.0
Erwachsene	964843	37.7	132.6	17.1	127.1	15.9	121.3	15.2	122.3	14.5
Kinder	16039	0.6	2.1	1.6	2.1	1.6	2.1	1.5	2.0	1.5
Senioren	1576769	61.6	228.4	29.6	210.1	30.1	187.5	23.9	196.6	23.3
Herz	1151134	45.0	167.2	21.7	154.4	19.4	136	15.5	143.0	16.6
Lunge	171227	6.7	27.5	8.2	24.2	7.6	18.3	4.9	19.3	5.3
Externes	101565	4.0	12.7	4.0	13.2	4.2	13.9	4.5	13.0	3.8
<b>Regierungsbezirke</b>										
Niederbayern	250326	9.8	35.4	6.8	33.1	6.3	30.6	6.0	31.5	6.0
Oberbayern	799492	31.3	113.9	13.6	105.6	13.3	96.9	11.5	100.7	11.4
Oberfranken	261829	10.2	37.0	6.9	34.9	6.6	32.0	5.9	32.8	5.8
Oberpfalz	229686	9.0	32.5	6.3	30.6	6.2	28.0	5.7	28.7	5.6
Schwaben	370202	14.5	52.9	8.2	49.2	8.2	44.6	7.1	46.4	7.2
Unterfranken	276525	10.8	39.2	7.3	36.7	7.0	33.6	6.4	34.8	6.3
Mittelfranken	369591	14.5	52.3	8.5	49.3	8.3	45.2	7.6	46.1	7.5
<b>Verkehrsunfälle (2002-2015)</b>										
<b>Unfälle</b>	<b>930861</b>	<b>100</b>	<b>152.4</b>	54.1	<b>174.1</b>	48.8	<b>213.0</b>	42.5	<b>188.1</b>	46.2
<b>Verletzte</b>	<b>1753980</b>	<b>100</b>	<b>286.4</b>	103.5	<b>330.2</b>	98.6	<b>395.3</b>	89.5	<b>359.3</b>	95.0



**Abb. 5.1** Die obere Reihe stellt für jeden Bezirk den durchschnittlichen UTCI-Wert für die entsprechende Jahreszeit während des Studienzeitraums (1995-2015) dar. Die Anzahl der täglichen Fälle pro 100.000 Einwohner ist ein Durchschnittswert für die Sterblichkeit (zweite Reihe) und die Krankenhauseinweisungen (dritte Reihe) im Zeitraum 1995-2015. Die untere Reihe zeigt die tägliche Zahl der Straßenverkehrsunfälle pro 100 000 Einwohner, gemittelt über den Zeitraum 2002-2015.

## 5.2 Statistische Methoden

Multiple lineare Regressionen wurden verwendet, um tägliche Todesfälle und Krankenhauseinweisungen sowie Verkehrsunfälle ( $E(Y)$ ) mit räumlich interpolierten durchschnittlichen UTCI-Werten für denselben Tag und (bis zu 14 Tage) verzögert in der Form von

$$E(Y) = \alpha + \beta_y * y + \beta_H * H + \sum_{d=Monday}^{Saturday} \beta_d * d + \sum_{lag=0}^{lag=14} \beta_{UTCI_{lag}} * UTCI_{lag},$$

zu modellieren, wobei  $\alpha$  der Y-Achsenabschnitt,  $y$  das Jahr,  $\beta_y$  die Änderung in  $E(Y)$  pro Jahr,  $H$  ein Indikator mit dem Wert 1 für Feiertage und 0 für Nicht-Feiertage,  $\beta_H$  die Differenz

in der Anzahl zwischen Feiertagen und Nicht-Feiertagen,  $d$  der Wochentag,  $\beta_d$  die Differenz zwischen Tag  $d$  und dem Referenztag,  $UTCI_{lag}$  der UTCI an den verzögerten Tagen zuvor und  $\beta_{(UTCI_{lag})}$  die Änderung in der Anzahl für eine Einheit Anstieg in UTCI darstellt. Referenz-tage waren Freitag für Krankenhauseinweisungen, Donnerstag für Verkehrsunfälle und Mittwoch für Mortalität.

Die Modelle wurden getrennt für die vier Jahreszeiten, für Alters-, Geschlechts- und Diagnoseuntergruppen sowie für Bayern, die sieben Regierungsbezirke (Niederbayern / NB, Oberbayern / OB, Oberfranken / OF, Oberpfalz / OPf, Schwaben / Sch, Unterfranken / UF, Mittelfranken / MF) und 96 Landkreise berechnet. Damit ergaben sich 84 Modelle für Bayern, 588 für die Bezirke und 8064 für die Landkreise. Da die täglichen Fallzahlen und UTCI zwischen Landkreisen, Bezirken, Untergruppen und Jahreszeiten (siehe Abb. 5.1) variierten, wurden diese zunächst durch Subtraktion der Mittelwerte und anschließende Division durch die jeweiligen Standardabweichungen (sd) standardisiert. Bei der Interpretation der Effekte muss daher die jeweilige Standardabweichung als Einheit der Veränderung herangezogen werden. Zum Beispiel bedeutet ein  $\beta_{UTCI}$ -Wert von 0,1, dass ein UTCI Anstieg um eine Standardabweichung innerhalb einer bestimmten Jahreszeit und Region mit einem Anstieg der täglichen Fallzahl der Zielgruppe von 10% ihrer Standardabweichung verbunden ist. Prädiktoren für jedes Modell wurden durch Minimierung des Bayes'schen Informationskriteriums (BIC) ausgewählt. Alle Berechnungen wurden mit dem Softwarepaket R (Version 4.0.3) durchgeführt und alle Vergleiche wurden mit einem zweiseitigen Signifikanzniveau von 0,05 getestet.

## 5.3 Ergebnisse

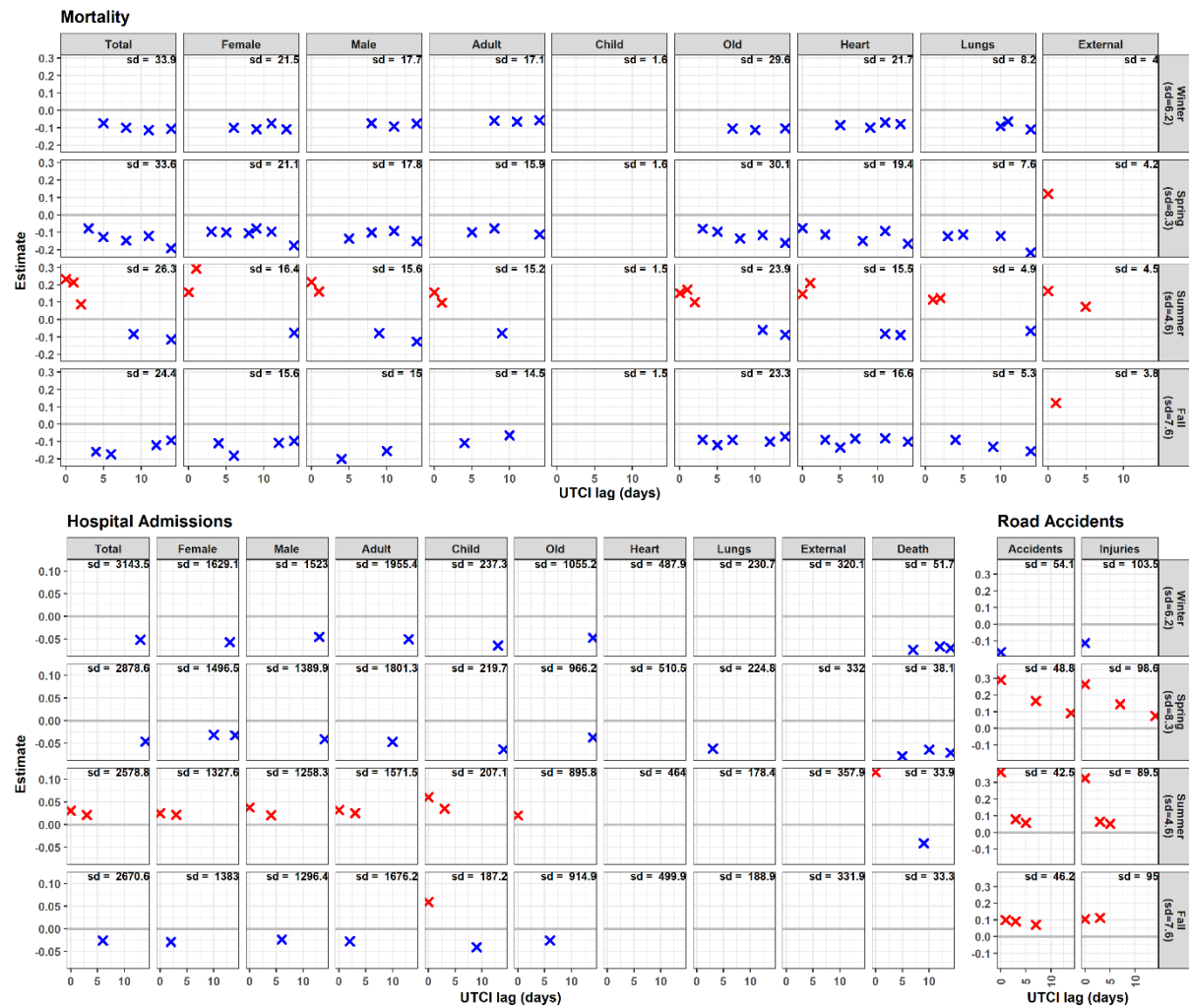
### 5.3.1 Saisonale UTCI-Effekte auf Mortalität, Morbidität und Verkehrsunfälle

Im Sommer stieg die tägliche Anzahl von Sterbefällen, Krankenhauseinweisungen und Verkehrsunfällen mit dem UTCI durchwegs an (Abb. 5.2). Die unmittelbaren UTCI-Effekte (lag 0) unterschieden sich jedoch erheblich: Die täglichen Krankenhauseinweisungen stiegen um  $\sim +0,04$  sd pro  $4,6^\circ\text{C}$  UTCI, die Sterblichkeit um  $\sim 0,20$  sd und die Verkehrsunfälle sogar um  $\sim +0,40$  sd. Auch innerhalb der Krankenhauseinweisungen fanden sich höhere Effekte bei „Tod“ ( $0,12$  sd) als bei der Gesamtzahl der Einweisungen ( $0,04$  sd). In einigen anderen Fällen wurden verstärkende UTCI-Effekte auch für andere Jahreszeiten abgeleitet, nämlich für Verkehrsunfälle im Frühjahr und Herbst, Kinderkrankenhauseinweisungen im Herbst sowie Sterblichkeit aufgrund externer Ursachen im Frühjahr und Herbst. Auch hier waren die UTCI-Effekte im Frühjahr bei Verkehrsunfällen größer als bei externer Sterblichkeit.

Im Sommer stieg die Mortalität bis zu drei Tage nach dem UTCI Anstieg an, aber in der zweiten Woche gab es dann meist einen Rückgang. In den anderen Jahreszeiten wurde dagegen kein unmittelbarer Effekt festgestellt, sondern die Mortalität nahm in Zeitraum drei Tage bis zu zwei Wochen nach UTCI-Anstieg ab.

Höhere UTCI-Werte verursachten einen sofortigen bis drei Tage verzögerten Anstieg der täglichen Krankenhauseinweisungen im Sommer, aber einen Rückgang nach einer Woche im Herbst und nach zwei Wochen im Winter und Frühling.

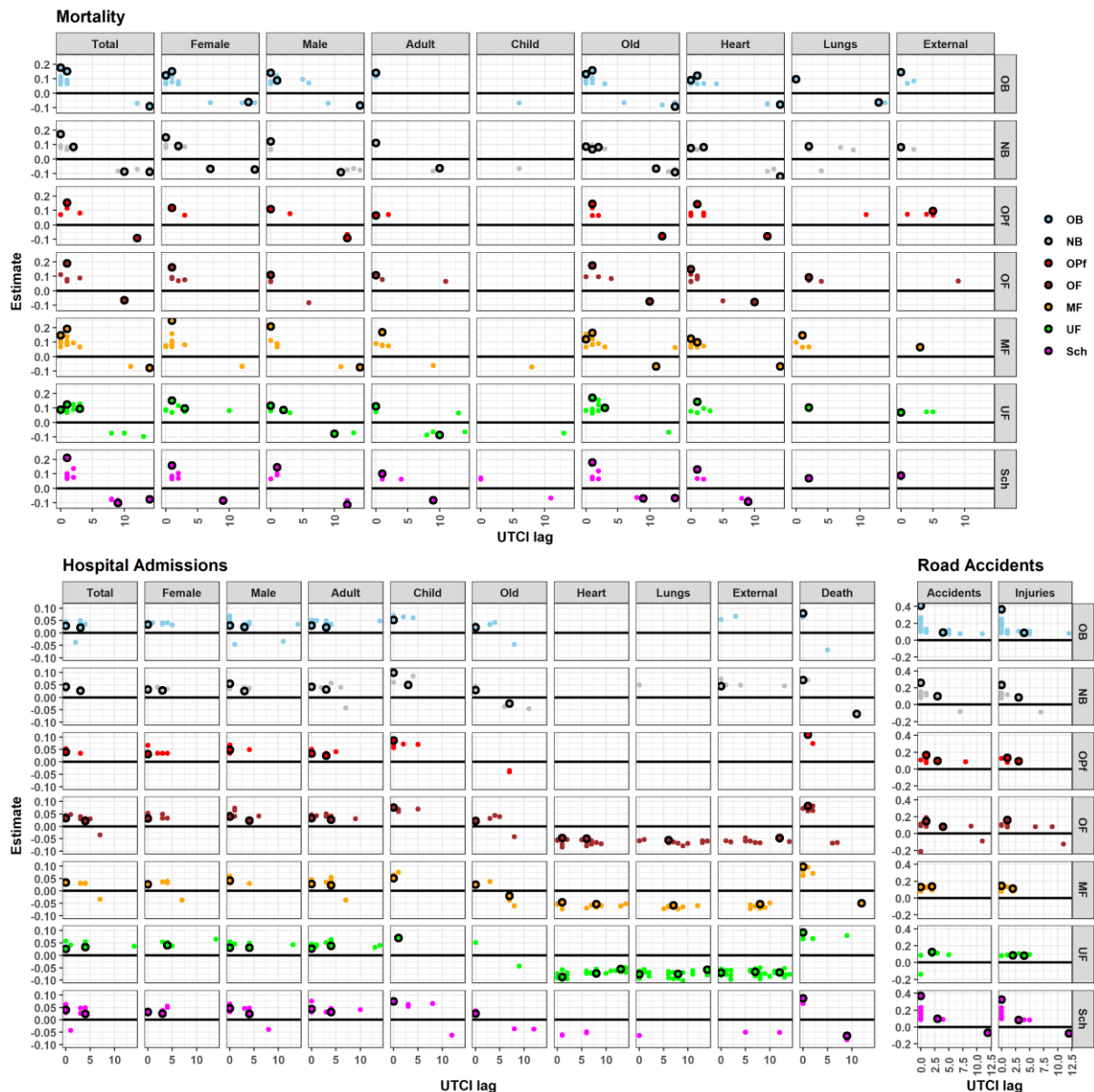
Im Winter war eine Erhöhung des UTCI mit einer sofortigen Reduktion von Verkehrsunfällen verbunden. In den anderen Jahreszeiten dagegen stiegen Verkehrsunfällen mit UTCI an, sehr stark und unmittelbar im Frühjahr und Sommer und nahmen im Laufe der Zeit bis zu einer Woche im Sommer und Herbst und bis zu zwei Wochen im Frühjahr ab.



**Abb. 5.2** UTCI-Effekte. UTCI-Effekte bei täglichen Fällen von Sterblichkeit, Krankenhauseinweisungen und Verkehrsunfällen für jede Untergruppe und Jahreszeit in Bayern. Die horizontale Achse stellt Zeitverzögerung in Tagen dar und die vertikale Achse den geschätzten Effekt (positiv – rot, negativ - blau). Kreuze fehlen, wenn der UTCI-Effekt im entsprechenden Modell nicht signifikant war. Die Effektschätzungen werden relativ zur Standardabweichung der Fälle innerhalb der entsprechenden Untergruppe (in der oberen rechten Ecke jedes Panels) angegeben, wenn sich der UTCI um eine Standardabweichung seines täglichen Wertes für die entsprechende Jahreszeit ändert. Die Zahlen in den grauen Feldern auf der rechten Seite sind die Standardabweichungen des UTCI für jede Jahreszeit in Bayern. Rechenbeispiel: Für den Winter beträgt der UTCI sd 6,2°C, der sd der Krankenhauseinweisungen 3143,5, und der geschätzte UTCI-Effekt -0,0513. Dies bedeutet, dass die täglichen Krankenhauseinweisungen in Bayern um  $-0,0513 \cdot 3143,5 = 161$  abnehmen, wenn der Wert des UTCI um 6,2°C steigt.

### 5.3.2 Räumliche Variation der UTCI-Effekte im Sommer

Für alle vier Jahreszeiten wurde untersucht, wie sich die UTCI-Effekte auf Morbidität, Mortalität und Verkehrsunfällen zwischen den Regierungsbezirken und Landkreisen in Bayern unterscheiden. Exemplarisch soll hier nur auf die Ergebnisse für den Sommer näher eingegangen werden (Abb. 5.3).



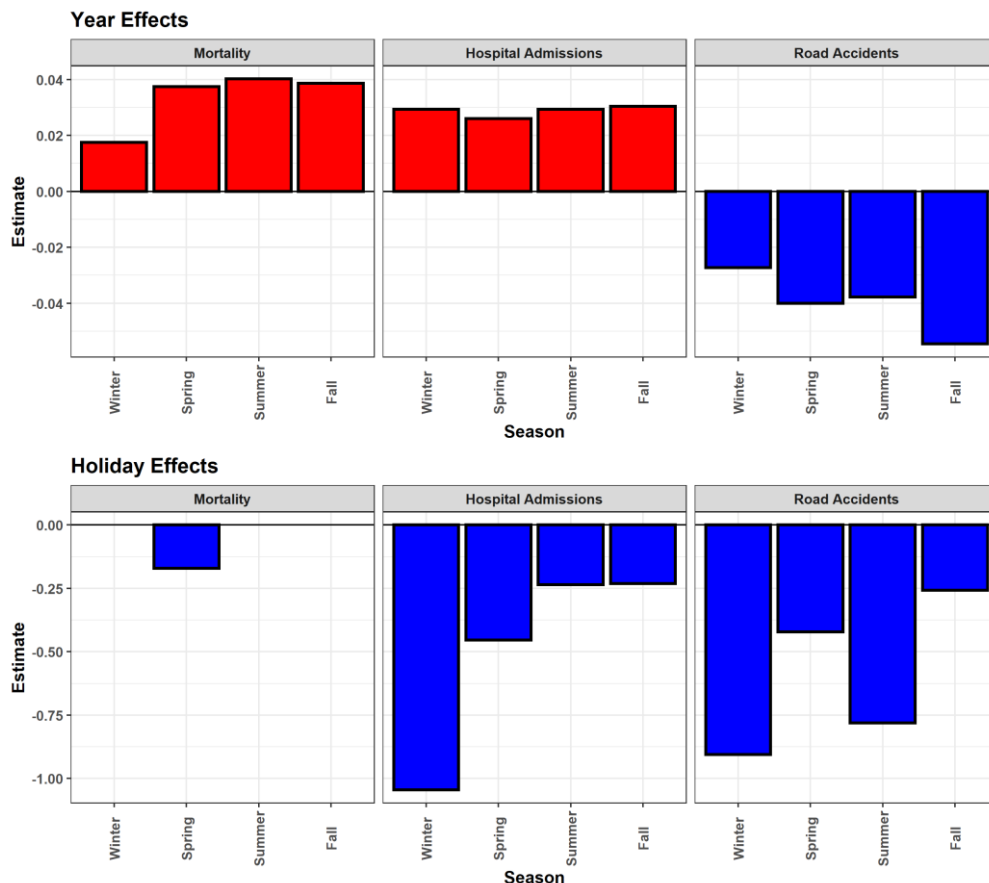
**Abb. 5.3** UTCI-Effekte. UTCI-Effekte im Sommer bei täglichen Fällen von Sterblichkeit, Krankenhauseinweisungen und Verkehrsunfällen für jede Untergruppe und Landkreis in Bayern. Die horizontale Achse stellt Zeitverzögerung in Tagen dar und die vertikale Achse den geschätzten Effekt. Dieser wird im Verhältnis zu den Standardabweichungen der täglichen Fallzahlen innerhalb der entsprechenden Untergruppe ausgedrückt, wenn sich UTCI um eine Standardabweichung seines Tageswertes ändert. Die schwarzen Kreise stellen diese Effekte für jeden Regierungsbezirk dar, die farbigen Punkte für die entsprechenden Landkreise. Das Fehlen von Punkten zeigt an, dass der UTCI-Effekt für eine bestimmte Verzögerung im entsprechenden Modell nicht signifikant war.

Die Mortalität stieg im Sommer mit dem UTCI vor allem in Unter- und Mittelfranken, dem relativ wärmeren nordwestlichen Teil Bayerns, an, wo mehr Landkreise signifikante UTCI-Effekte zeigten (Abb. 5.3). Auffallend ist, dass Krankenhauseinweisungen aufgrund von Herz, Lunge und externen Ursachen in ganz Franken 1 bis 14 Tage verzögert mit höherem UTCI abnehmen (!). Für alle anderen Regionen wurde jedoch kein Effekt festgestellt, mit Ausnahme von Niederbayern, wo die Einweisungen aufgrund äußerer Verletzungen positiv mit der UTCI-Änderung korrelierten. Zusätzlich nahmen die Todesfälle unter den Krankenhauseinweisungen in der zweiten Woche nach UTCI Anstieg in Niederbayern, Mittelfranken und Schwaben ab. Verkehrsunfälle nahmen mit höherem UTCI im Sommer in Oberbayern

und Schwaben, den beiden wichtigsten touristischen Regionen mit Alpenvorland und Alpenregion, stark zu.

### 5.3.3 Sonstige Einflussfaktoren

Die täglichen Krankenhauseinweisungen und die Sterblichkeit nahmen im Untersuchungszeitraum 1995-2015 bayernweit zu, während die täglichen Verkehrsunfälle abnahmen (Abb. 5.4). Beispielsweise nahmen die täglichen Krankenhauseinweisungen um 75 bzw. 92,2 zusätzliche Fälle pro Jahr zu und zwar in ähnlicher Weise über alle Bezirke und Landkreise hinweg.



**Abb. 5.4** Jahres- und Feiertagseffekte. Signifikante Jahres- und Feiertagseffekte auf die tägliche Sterblichkeit, die Krankenhauseinweisungen und die Verkehrsunfälle für jede Jahreszeit, ausgedrückt als Anteil an der Standardabweichung der jeweiligen täglichen Fallzahl innerhalb Bayerns. Rechenbeispiel: Für die Krankenhauseinweisungen im Winter beträgt der sd 3143,5 (siehe Tabelle 5.1), und der Jahreseffekt für Bayern ist 0,02933. Dies bedeutet eine Zunahme der täglichen Krankenhauseinweisungen um  $0,02933 \cdot 3143,5 = 92,2$  pro Jahr.

Die Gesamtzahl der täglichen Todesfälle in Bayern stieg dagegen nicht konsistent über die Bezirke und für die Untergruppen an. Bemerkenswert ist, dass der zunehmende Trend der Sterblichkeit im Winter am geringsten war. Während die Sterblichkeit bei älteren Menschen und bei Lungenerkrankungen zunahm, nahm sie bei Erwachsenen, Kindern, Herzerkrankungen und externen Erkrankungen ab. Die täglichen Verkehrsunfälle und die daraus resultierenden Verletzungen nahmen in allen Jahreszeiten ab, wobei der stärkste Rückgang im Herbst und der geringste im Winter zu verzeichnen war.

In den Ferien reduzierte sich die Anzahl der Krankenhauseinweisungen und Verkehrsunfälle signifikant (Abb. 5.4). Die täglichen Krankenhauseinweisungen gingen vor allem in den Winterferien zurück (-105% sd), gefolgt von Frühjahr (-45% sd) sowie Sommer und Herbst (-

23% sd). Krankenhauseinweisungen bei Kinder gingen insbesondere in den Sommerferien zurück (-42%), weniger im Frühjahr (-28%) und im Herbst (-9%). Lediglich in den Frühjahrsferien war eine marginale Reduktion der Sterblichkeit zu beobachten. Die Anzahl der täglichen Verkehrsunfälle dagegen gingen während der Ferien um 90 %, 78 %, 42 % und 25 % der jeweiligen Tages-sd im Winter, Sommer, Frühjahr und Herbst zurück.

Daneben wurden in allen Modellen noch die Wochentageeffekte einbezogen. Hier zeigte sich, dass die Krankenhauseinweisungen montags am höchsten waren und bis freitags abnahmen, während samstags und sonntags die wenigsten Fälle zu verzeichnen waren. Die Sterblichkeit in Bayern war generell an den Wochenenden, insbesondere an Sonntagen, reduziert. Verkehrsunfälle nahmen in allen Jahreszeiten freitags und im Winter montags zu. An Sonntagen, gefolgt von Samstagen, gab es die wenigsten Unfälle.

Die Ergebnisse zeigen für 56 Millionen Krankenhauseinweisungen und 2,5 Millionen Todesfälle einen ansteigenden und bei ca. 930.000 Verkehrsunfällen und 1,7 Millionen verletzten Personen dagegen einen abnehmenden Trend über den untersuchten Zeitraum. Die Auswirkungen des UTCI waren bei allen drei untersuchten Datensätzen deutlich: Erhöhter UTCI führte zu einem sofortigen (1-2 Tage) Anstieg der Morbidität und einem noch stärkeren Anstieg der Mortalität im Sommer und zu einem verzögerten (bis zu 14 Tage) Rückgang im Herbst, Winter und Frühjahr. Die stärksten UTCI-Effekte wurden bei Verkehrsunfällen gefunden, wo eine Erhöhung des UTCI zu einem sofortigen Rückgang der täglichen Straßenverkehrsunfälle im Winter, aber zu einem deutlichen Anstieg in allen anderen Jahreszeiten führte. Unterschiede in den UTCI-Effekten wurden z.B. zwischen den wärmeren Regionen Frankens (mehr Landkreise mit hitzestressbedingter Sterblichkeit, aber abnehmende Krankenhauseinweisungen für Lunge, Herz und externe Gründe bei sommerlichem Hitzestress), den touristischen Regionen in Oberbayern und Schwaben (unmittelbarer erhöhender UTCI-Effekt auf Verkehrsunfälle im Sommer) und den kälteren Regionen in den Alpen und Südostbayerns (steigende Krankenhauseinweisungen für Lunge, Herz und externe Gründe im Winter) beobachtet. Landkreise mit einem hohen Anteil an älteren Menschen wiesen höhere Morbidität und Mortalität, insbesondere im Winter, auf.

## 5.4 Diskussion

Diese Studie bestätigt, dass Krankenhauseinweisungen, Sterblichkeit und Verkehrsunfälle eindeutig mit UTCI-Änderungen in Zusammenhang stehen, wobei die Größenordnung der unmittelbaren Auswirkungen im Sommer in dieser Reihenfolge zunimmt. In folgenden Studien sollten deshalb Vergleiche zwischen Vorhersagemodellen, die thermische Indizes, insbesondere UTCI, und die Temperatur verwenden, durchgeführt werden. Im Winter könnte der Einfluss des Niederschlags den Einfluss des UTCI überlagern, dies wurde hier nicht untersucht, sollte aber in Zukunft berücksichtigt werden. In den USA beeinflusst Niederschlag die Krankenhauseinweisungen nachweislich (Bobb et al. 2017), zudem erhöht Niederschlag die Verkehrsunfälle weltweit (Theofilatos & Yannis 2014). Insbesondere in München wirkten sich die Niederschläge negativ auf die Besuche in der Notaufnahme im Herbst aus, und die Anzahl der Patientinnen war negativ mit Hagelwarnungen und der maximalen Niederschlagsintensität korreliert (s. Kap 3).

Leider lagen keine weiteren Informationen über Freizeitverhalten und Verkehrsaufkommen vor. Man kann aber vermutlich davon ausgehen, dass vor allem in touristischen Hotspots ein Teil der Verkehrsunfälle sowie Krankenhauseinweisungen durch ein erhöhtes

Besucheraufkommen bei schönem Wetter verursacht wird. Insofern bestätigen sich hier auch die Ergebnisse aus der Analyse der alpinen Unfalldaten (siehe Kapitel 4).

Insgesamt verdeutlichen diese Ergebnisse jedoch einmal mehr die dringende Notwendigkeit von Anpassungen an den Klimawandel und Maßnahmen zu seiner Eindämmung sowohl im lokalen als auch im regionalen Kontext. So sollten in der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie (BayKLAS) diese Aspekte berücksichtigt bzw. weitere Studien veranlasst werden, um die Handlungsempfehlungen entsprechend spezifizieren zu können.

## 6 Darstellung des Nutzens im Rahmen der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie

Der Zusammenhang zwischen Wetter, Witterung und menschlicher Gesundheit ist angesichts des Klimawandels und der häufiger auftretenden Extremwetterperioden eine essentielle Fragestellung für die Bayerische Klimaanpassungsstrategie und das Handlungsfeld "Gesundheitsvorsorge". Insofern sollten die Projektergebnisse in entsprechenden Veranstaltungen der zuständigen Landesämter, wie im Workshop Kommunale Hitzeaktionspläne am 7. Oktober 2021, vorgestellt werden, in denen gerade Hitzeereignisse, die aufgrund des Klimawandels immer häufiger auftreten und zu verschiedenen gesundheitlichen Belastungen führen können, im Zentrum stehen.

Im Projekt *Einfluss von extremen Witterungsereignissen im Klimawandel auf die menschliche Gesundheit* wurde deshalb der Effekt von Witterungsstressfaktoren, v.a. Hitzestress aber auch anderer Faktoren, nicht nur auf Krankenhauseinweisungen und Mortalität, sondern erstmals auch auf den Bedarf an medizinischen Notfalldiensten / Rettungseinsätzen sowie auf Verkehrs- und Bergunfällen untersucht. Neu war dabei die Verwendung des UTCI, der eine optimale Bewertung der thermischen Bedingungen des Menschen erlaubt.

Im Klimaprogramm 2020 und in der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie sind zum Schutz der Bevölkerung beispielsweise bereits folgende Handlungs- und Anpassungsmaßnahmen vorgesehen (siehe „Zitate“ aus LfU Webseite abgerufen am 13.09.2021), die basierend auf den Ergebnissen des vorliegenden Projektes wie folgt bestätigt bzw. konkretisiert werden müssten:

- „Frühwarnsysteme müssen eingerichtet bzw. verbessert werden, um konkrete Warnungen und Verhaltensregeln bei Hitze, Pollenflug, Luftbelastung, hohe Ozon- und UV-Werte auszugeben“. (entspricht BayKLAS WK\_01, WK\_03, WK\_07 und WK\_08)

Die Analysen von Witterungseffekten anhand des UTCI (Studie 1 IVENA München sowie 3 Bayern) brachte sehr gute Ergebnisse. Es sollte deshalb intensiv geprüft werden, inwieweit der UTCI in das Hitzewarnsystem integriert werden könnte. In der Übergangszeit sollte unbedingt darauf geachtet werden, dass vor hohen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit im Sommer gewarnt wird, denn diese erhöhten nachweislich die Einlieferungen in Notaufnahmen in München. Inwieweit die Risikogruppen die bisherigen Radio- und Medienwarnungen wahrnehmen und berücksichtigen, sollte überprüft werden. Zudem sollte in weiteren Studien auch der Faktor Niederschlag, der den UTCI-Einfluss auf Verkehrsunfälle (vielleicht auch Bergunfälle) modifizieren könnte, unbedingt berücksichtigt werden. In der Studie 1 (IVENA München) zeigte sich ein schwacher Effekt der Zeitumstellung auf



Sommerzeit im Frühjahr auf die Anzahl der Rettungsdienst-Einsätze / Notaufnahmen. Dies sollte in Folgestudien z.B. für ganz Bayern noch einmal im Detail angesehen werden.

- „Eine verstärkte Aufklärung der Bevölkerung und des medizinischen Personals zu neuen gesundheitlichen Gefahren ist notwendig.“ (entspricht BayKLAS AG\_01 und AG\_02)

Studien 1 und 3 zeigten, dass Witterungseffekte mit Demographiefaktoren, Krankheitsdiagnosen und Wohnorten der Bevölkerung variierten. Hier ist natürlich die Gruppe der Senioren zu nennen, die auch in unseren Untersuchungen als besonders gefährdet identifiziert wurde, allerdings nicht bei jedem Gesundheitsindikator. So nahmen die IVENA Notaufnahmeeinweisungen bei hohen Temperaturen in Frühjahr und Sommer signifikant zu, nicht aber für die ältere Bevölkerung. Neu ist der ausgeprägte UTCI-Effekt auf eine erhöhte Anzahl von Unfällen im Sommer, besonders in touristischen Gebieten und Städten, wo mit dem Hinweis auf ein steigendes Risiko bei höherem Hitzestress gezielt, auch unter Touristen, gewarnt werden sollte. Ein besonderes Augenmerk sollte auch auf erste Hinweise zu regionalen Unterschieden gelegt werden, mehr Forschungsbedarf ist aber hier nötig. Gerade die Krankenhauseinweisungen in den östlichen Teilen Bayerns waren auffallend hoch. In Gebieten mit höherer UTCI-Variabilität sollte die Bevölkerung laut Literatur eigentlich weniger von Wetterextremen betroffen sein. Dies zeigte sich eventuell bereits bei den Unterschieden zwischen Unter- und Mittelfranken versus Niederbayern und Oberpfalz. Gerade dort, wo die Hitze- bzw. Kälteextreme deutlicher ausfallen sollten, schien die Bevölkerung besser angepasst. Kommunale Strategien sind somit unerlässlich und sollten spezifiziert werden.

- „Erweiterung der Schulungsinhalte des medizinischen Pflege- und Fachpersonals im Zusammenhang mit zunehmenden gesundheitlichen Belastungen (...) Ausweitung der Hitzetage (entspricht BayKLAS AG\_01)

Unsere Studie 1 anhand der IVENA Daten für München zeigte deutlich, dass zusätzlich zu den üblichen kalendarischen Faktoren saisonale Wetter- und Luftschadstofffaktoren und deren Wechselwirkungen mit der Patientendemografie in eine rechtzeitige und bessere Allokation von Ressourcen im Gesundheitssystem einbezogen werden müssen. Nicht nur die Hitzebelastung, sondern die Interaktion von verschiedenen Faktoren spielt eine wichtige Rolle und sollte zukünftig gesondert untersucht und beachtet werden. Die erzielten Ergebnisse deuten darauf hin, dass künftig mit optimierten Ressourcenplanungsmodellen unter Einbeziehung von Umweltvariablen die tägliche Zuteilung von Ressourcen und Personal von EMS-Einsätzen auf Krankenhaus- und Stadtebene verbessern werden kann.

- „Die Bevölkerung kann viele Gefahren für die Gesundheit durch vernünftiges und angepasstes Verhalten vermeiden oder abmildern.“

Bei fast allen Fragestellungen zeigte sich ein starker Einfluss von Kalendervariablen auf die untersuchten Gesundheitsfaktoren, in Studie 1 v.a. das Oktoberfest sowie Neujahr wie auch Wochentageeffekte, in Studie 2 v.a. der Faktor Wochenende auf alle Bergaktivitäten in Österreich und in Studie 3 die Faktoren Wochentag und Ferien. Dies zeigt deutlich, dass das Verhalten der Bevölkerung entscheidend zur Gefährdung beiträgt. Das Phänomen lässt sich gut an den Alpinunfällen beschreiben: Sonnige und trockene Tage an Wochenenden locken mehr Menschen in die österreichischen Berge, was höchstwahrscheinlich zu mehr Todesfällen führt. Aufgrund fehlender Daten zu den Besucherzahlen pro Region und Disziplin sind die hier gezeigten Wettereffekte als kumulativ für die wetterabhängigen Besucherzahlen sowie die wetterabhängigen Gefährdungsraten und das Besucherverhalten

zu betrachten. Ein ähnlicher Effekt war auch bei den Notaufnahmen über das IVENA System in München zu verzeichnen, bei landläufig „schlechtem“ Wetter im Herbst gingen die Zahlen zurück. Diese Wetterabhängigkeit der Todesfälle (und höchstwahrscheinlich auch der Unfälle) zeigt die dringende Notwendigkeit einer besseren Prävention und Aufklärung der Bevölkerung in dieser Hinsicht. „Nicht die Berge sind gefährlicher (...), die Leute haben bei schönem Wetter viel weniger Respekt vor den Bergen“, so eine Schlussfolgerung des Rettungschefs beim Schweizer Alpenverein. Ganz ähnlich ist auch der Effekt des UTCI auf Verkehrsunfälle zu sehen, der sogar doppelt so hoch war wie für die Gesamtsterblichkeit. Bei schönem Wetter im Frühjahr bis in den Herbst stiegen die Zahlen deutlich an. Damit sollten Monitoring und Warnsysteme in BayKLAS zusätzlich angepasste Verhaltensweisen empfehlen.

Alle in diesem Projekt analysierten Datensätze zeigen einen engen Zusammenhang zwischen Hitzebelastung und zum Teil auch weiteren Wetter- und Witterungsfaktoren. Aufgrund von organisatorischen Schwierigkeiten (Bearbeiterwechsel und CORONA bedingte Schließung der Arbeitsräume am FDZ von März bis Juli 2020 und anschließend reduzierter Zugang durch Überlastung der Räume) konnten nicht alle Datensätze mit den gleichen Parametern analysiert werden. Regionale Ergebnisse für Bayern konnten nur für die Hitzebelastung (UTCI) zu Krankenhauseinweisungen, Todesfällen und Verkehrsunfällen analysiert werden, weitere Parameter konnten nicht mehr mit diesen Datensätzen verknüpft werden. Da aber die Ergebnisse der Notfallaufnahmen von München auch Niederschlag, Luftverschmutzung und Temperaturen als signifikante Einflussfaktoren nachweisen konnte, sollten diese Faktoren in zukünftigen Studien mit weiteren Wetter- und Umweltfaktoren analysiert werden.

Auch die Todesfälle der Österreichischen Alpen weisen einen Wetterzusammenhang auf, der deutlich über die reinen Temperaturen hinausgeht.

Somit kann davon ausgegangen werden, dass einerseits die Gesundheitsgefährdung durch Hitze ansteigt, andererseits aber ein weiteres Augenmerk auf die Interaktionen zwischen verschiedenen Umweltfaktoren berücksichtigt werden sollten. Zusätzlich spielt das Freizeitverhalten und die Demographie eine wichtige Rolle, die sich unabhängig von Klimawandel entwickelt, aber gleichzeitig Chancen aufzeigt, dessen Auswirkungen spezifisch durch flankierende Maßnahmen abzumildern.

## 7 Glossar

BIC	Bayes'sches Informationskriterium, Kriterium zur Modellauswahl nach der Idee von Ockham, das ein Modell nicht unnötig komplex sein soll
DWD	Deutscher Wetterdienst
ED	Emergency department (Notfallaufnahme)
EMS	Emergency medical services (Einsätze des Rettungsdienstes)
ILS	Integrierte Leitstelle
IVENA	Interdisziplinärer Versorgungsnachweis (webbasierte Anwendung, mit der sich die Träger der präklinischen und klinischen Patientenversorgung jederzeit in

	Echtzeit über die aktuelle Behandlungs- und Versorgungsmöglichkeiten der Krankenhäuser informieren können)
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LGL	Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit
MRI	Klinikums München Rechts der Isar
Odds Ratio	quantifiziert die Stärke eines Zusammenhangs, d.h. die Odds Ratio macht eine Aussage darüber, inwieweit das Vorhandensein bzw. Nichtvorhandensein eines Merkmals A mit dem Vorhandensein bzw. Nichtvorhandensein eines weiteren Merkmals B zusammenhängt. Die Odds Ratio ist damit ein Maß der Effektstärke und beschreibt die Stärke des Zusammenhangs bzw. die Unabhängigkeit zweier binärer Variablen.
Regressionsmodell:	Klasse von statistischen Modellen, bei denen der Einfluss von einer oder mehreren Kovariablen ( $x_1, \dots, x_n$ ) auf eine Zielvariable ( $y$ ) durch eine Funktion ( $f$ ) unter Berücksichtigung eines unbekanntes Fehlers ( $e$ ) dargestellt wird ( $y = f(x_1, \dots, x_n) + e$ ). Die Funktion wird so angepasst, dass sie den mittleren quadratischen Abstand zwischen dem Graphen der Funktion und den gegebenen Werten minimiert. Im Falle einer Einflussvariable wird die Zielvariable ( $y$ ) gegen die Einflussvariable ( $x_1$ ) in einem passenden Koordinatensystem aufgetragen, dann wird ein Graph eingezeichnet, der zu allen eingezeichneten Punkten den kleinsten quadrierten Abstand hat und gleichzeitig seiner Funktion entspricht, z.B. im Falle eines linearen Modells handelt es sich um eine Gerade.
StMGP	Bayerisches Staatsministerium für Gesundheit und Pflege
StMUV	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
UTCI	Universal Thermal Climate Index (Universelle Thermische Klimaindex 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) (Bröde et al. 2012)

## 8 Literaturverzeichnis

Aghdassi S J S, Schwab F, Hoffmann P and Gastmeier P 2019 The Association of Climatic Factors with Rates of Surgical Site Infections: 17 Years' Data From Hospital Infection Surveillance Deutsches Arzteblatt international 116 529–36

An der Heiden M, Muthers S, Niemann H, Buchholz U, Grabenhenrich L and Matzarakis A 2019 Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015 Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz 62 571–579

Basarin B, Lukić T and Matzarakis A 2020 Review of Biometeorology of Heatwaves and Warm Extremes in Europe Atmosphere 11 1276

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LFU) 2021 Klima-Faktenblätter für Bayern.  
<https://www.lfu.bayern.de/klima/klimawandel/klimafaktenblaetter/index.htm>. Abgerufen am 2. August 2021.

Bobb JF, Ho KKL, Yeh RW, Harrington L, Zai A, Liao KP, et al. 2017 Time-Course of Cause-Specific Hospital Admissions During Snowstorms: An Analysis of Electronic Medical Records From Major Hospitals in Boston, Massachusetts. *Am J Epidemiol.*; 185:283–94.

Breitner S, Wolf K, Devlin R B, Diaz-Sanchez D, Peters A and Schneider A 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 *The Science of the Total Environment* 485-486 49–61

Breitner S, Wolf K, Peters A and Schneider A 2014b Short-term effects of air temperature on cause-specific cardiovascular mortality in Bavaria, Germany *Heart (British Cardiac Society)* 100 1272–80

Bröde P, Fiala D, Błażejczyk K, Holmér I, Jendritzky G, Kampmann B et al. 2012 Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI) *Int J Biometeorol* 56 (3) 481–494

Casanueva A, Burgstall A, Kotlarski S, Messeri A, Morabito M, Flouris A D, Nybo L, Spirig C and Schwierz C 2019 Overview of Existing Heat-Health Warning Systems in Europe *International journal of environmental research and public health* 16

Chen K, Breitner S, Wolf K, Rai M, Meisinger C, Heier M, Kuch B, Peters A and Schneider A 2019 Projection of Temperature-Related Myocardial Infarction in Augsburg, Germany: Moving on From the Paris Agreement on Climate Change *Deutsches Arzteblatt international* 116 521–7

Greve F, Kanz K-G, Zyskowski M, Matthey F von, Biberthaler P, Muthers S, Matzarakis A, Lefering R and Huber-Wagner S 2020 The influence of foehn winds on the incidence of severe injuries in southern Bavaria - an analysis of the TraumaRegister DGU® *BMC musculoskeletal disorders* 21 568

Huber V, Krummenauer L, Peña-Ortiz C, Lange S, Gasparrini A, Vicedo-Cabrera A M, Garcia-Herrera R and Frieler K 2020 Temperature-related excess mortality in German cities at 2 °C and higher degrees of global warming *Environmental Research* 186 109447

Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit. Slope rules. [Cited 2021 April 20]. Available from: <https://www.alpinesicherheit.at/de/Pisten-Ordnungs-Entwurf/>

Karlsson M and Ziebarth N R 2018 Population health effects and health-related costs of extreme temperatures: Comprehensive evidence from Germany *Journal of Environmental Economics and Management* 91 93–117

Kingsley S L, Eliot M N, Gold J, Vanderslice R R and Wellenius G A 2016 Current and Projected Heat-Related Morbidity and Mortality in Rhode Island *Environmental health perspectives* 124 460–7

Leyk D, Hoitz J, Becker C, Glitz K J, Nestler K and Piekarski C 2019 Health Risks and Interventions in Exertional Heat Stress *Deutsches Arzteblatt international* 116 537–44

- Lindauer M, Schmid HP, Grote R, Steinbrecher R, Maude, M, Wolpert B. 2017 A simple new model for incoming solar radiation dependent only on screen-level relative humidity J Appl Meteor Climatol 56 (7) 1817–1825
- Miszuk B 2021 Multi-Annual Changes in Heat Stress Occurrence and Its Circulation Conditions in the Polish–Saxon Border Region Atmosphere 12 163
- Rai M, Breitner S, Wolf K, Peters A, Schneider A and Chen K 2019 Impact of climate and population change on temperature-related mortality burden in Bavaria, Germany Environ. Res. Lett. 14 124080
- Rosenzweig C, G Casassa, DJ Karoly, A Imeson, C Liu, A Menzel, S Rawlins, TL Root, B Seguin, P Tryjanowski 2007 Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 79-131
- Soulé B, Lefèvre B, Boutroy E. 2017 The dangerousness of mountain recreation: A quantitative overview of fatal and non-fatal accidents in France. Eur J Sport Sci. 2017;17(7):931-939
- Theofilatos A, Yannis G. 2014 A review of the effect of traffic and weather characteristics on road safety. Accid Anal Prev.; 72:244–56.
- Unguryanu TN, Grijbovski AM, Trovik TA, Ytterstad B, Kudryavtsev AV 2020 Weather Conditions and Outdoor Fall Injuries in Northwestern Russia. Int J Environ Res Public Health; 17(17):6096
- WMO 2017 WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals, assessed Nov. 13, 392 2021, [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=4453](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4453)
- Zacharias S 2012 Literaturstudie zum Einfluss des Wetters auf die menschliche Gesundheit. Bericht zum Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes UFOPLAN 3711 61 238

## 9 Anlagen

### 9.1 Publikationen

- 9.1.1 Ghada W, Estrella N, Pfoerringer D, Kanz KG, Bogner-Flatz V, Ankerst DP, Menzel A (2021) Effects of weather, air pollution and Oktoberfest on ambulance-transported emergency department admissions in Munich. *STOTEN* 755 (2) 143772 ([doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143772](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143772) [open access](#)).
- 9.1.2 Neumair N, Estella N, Menzel A, Ankerst DP (2021) The influence of weather on fatal accidents in Austrian mountains. *Weather, Climate, and Society* ([doi: 10.1175/WCAS-D-21-0082.1](https://doi.org/10.1175/WCAS-D-21-0082.1)).
- 9.1.3 Ghada W, Estrella N, Ankerst DP, Menzel A (2021) Universal thermal climate index associations with mortality, hospital admissions, and road accidents in Bavaria. *PLOS ONE* 16(11), e0259086 ([doi: 10.1371/journal.pone.0259086](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259086) [open access](#)).

### 9.2 Vorträge

Der Projektfortschritt wurde jeweils bei den Netzwerktreffen des Verbundprojekts Klimawandel und Gesundheit (VGK) als auch den Treffen mit der Koordinierungsstelle von T. Ottenheim sowie Prof. Dr. A. Menzel vorgestellt. Teilergebnisse wurden auch in allgemeinen Vorträgen zum Klimawandel und seinen Auswirkungen in Bayern regelmäßig von Prof. Menzel erwähnt.

## **10 Appendix**



## Effects of weather, air pollution and Oktoberfest on ambulance-transported emergency department admissions in Munich, Germany



Wael Ghada<sup>a,\*</sup>, Nicole Estrella<sup>a</sup>, Dominik Pfoerringer<sup>b</sup>, Karl-Georg Kanz<sup>b,c</sup>, Viktoria Bogner-Flatz<sup>c,f</sup>, Donna P. Ankerst<sup>a,d</sup>, Annette Menzel<sup>a,e</sup>

<sup>a</sup> TUM School of Life Sciences, Technical University of Munich, Freising, Germany

<sup>b</sup> Klinik und Poliklinik für Unfallchirurgie, Klinikum rechts der Isar, Technical University of Munich, Munich, Germany

<sup>c</sup> Emergency Medical Services Authority, Munich, Germany

<sup>d</sup> Department of Mathematics, Technical University of Munich, Garching, Germany

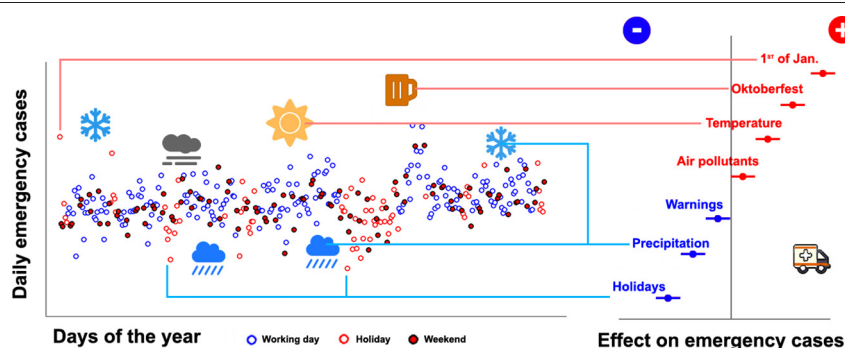
<sup>e</sup> Institute for Advanced Study, Technical University of Munich, Garching, Germany

<sup>f</sup> Department of General, Trauma and Reconstructive Surgery, Ludwig Maximilians University Hospital Munich, Munich, Germany

### HIGHLIGHTS

- Medical emergencies peak in Oktoberfest and New Year's Day in the Greater Munich Area.
- Daily ED numbers are modelled by calendar, environmental, and weather warning variables.
- The influence of weather and air pollution differs by season, patients' sex and age.
- Timely allocation of healthcare resources should consider calendar dates, weather and air quality.

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 17 August 2020

Received in revised form 16 October 2020

Accepted 3 November 2020

Available online 14 November 2020

Editor: Pavlos Kassomenos

#### Keywords:

Temperature

Weather

Pollution

Emergency medical services

Emergency department

### ABSTRACT

**Background:** Climate change and increasing risks of extreme weather events affect human health and lead to changes in the emergency department (ED) admissions and the emergency medical services (EMS) operations. For a better allocation of resources in the healthcare system, it is essential to predict ED numbers based on environmental variables. This publication aims to quantify weather, air pollution and calendar-related effects on daily ED admissions.

**Methods:** Analyses were based on 575,725 admissions from the web-based IVENA system recording all patients in the greater Munich area with pre-hospital emergency care in ambulance operations during 2014–2018. Linear models were used to identify statistically significant associations between daily ED admissions and calendar, meteorological and pollution factors, allowing for lag effects of one to three days. Separate analyses were performed for seasons, with additional subset analyses by sex, age and surgical versus internal department.

**Results:** ED admissions were exceptionally high during the three-week Oktoberfest, particularly for males and on the weekends, as well as during the New Year holiday. Admissions significantly increased during the years of study, decreased in spring and summer holidays, and were lower on Sundays while higher on Mondays. In the warmer seasons, admissions were significantly associated with higher temperature, adjusting for the effects of sunshine and humidity in all age groups except for the elderly. Adverse weather conditions in non-summer seasons were either linked to increasing ED admissions (from storms, gust) or decreasing them from rain. Mostly,

\* Corresponding author at: Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising, Germany.

E-mail address: [ghada@wzw.tum.de](mailto:ghada@wzw.tum.de) (W. Ghada).



but not exclusively, in winter, increasing ED admissions were associated with colder minimum temperatures as well as with higher NO and PM<sub>10</sub> concentrations.

**Conclusions:** In addition to standard calendar-related factors, incorporating seasonal weather, air pollutant and interactions with patient demographics into resource planning models can improve the daily allocation of resources and staff of EMS operations at hospital and city levels.

© 2020 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Background

Overcrowding at hospital emergency departments (ED) delays care times, worsens patient conditions, and consequently leads to higher mortality rates (Salway et al., 2017). Therefore, hospital managers and emergency medical service (EMS) associations aim to reduce related risks due to overcrowding through improved allocation of resources and staff. This requires improved ED visit prediction and understanding of reasons behind visit fluctuation (Marcilio et al., 2013), such as by consideration of subgroups of patients (Pfoerringer et al., 2018).

ED visits are commonly predicted by a combination of factors related to calendar, weather, and air pollution. Most models of ED visits account for calendar-related variables, such as day of week, month, year, and holiday (Wargon et al., 2010; Boyle et al., 2012; Bolt and Sparks, 2013; Marcilio et al., 2013; Jilani et al., 2019; McAllan et al., 2019; Duwalage et al., 2020). Special holidays, such as New Year's Eve, Christmas and Boxing Day, have been shown to be associated with a higher number of ED visits (Duwalage et al., 2020). Although the role of seasons is not clear, for example see (Marcilio et al., 2013; Castner et al., 2016) versus (McAllan et al., 2019), accounting for long term and seasonal patterns facilitates the detection of short term associations between the ED visits and other environmental conditions of interest (Bhaskaran et al., 2013). However, the effect of calendar variables can be inhomogeneous even within the same city (Wargon et al., 2010). Special attention should be paid to epidemic periods (Wargon et al., 2018), and allergy seasons (Erbas et al., 2012) which may overrule seasonal patterns.

A multitude of weather-related variables has been tested for their influence on ED visits with temperature as the most common. Higher maximum temperatures and heat waves lead to more ED visits (Duwalage et al., 2020) and increase mortality rates, especially among the elderly (Schaffer et al., 2012). The effect of heat appears to be spatially variable within the same city (Hondula and Barnett, 2014). It also varies with the targeted patient group (Vaneckova and Bambrick, 2013). Nonetheless, temperature and other meteorological variables, such as precipitation, wind, humidity and insolation, may fail to improve ED visit prediction despite having a significant influence (Calegari et al., 2016), especially for long-term forecasts (Wargon et al., 2009).

High concentrations of ambient air pollutants, such as PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>, increase asthma ED visits globally (Anenberg et al., 2018), especially in urban areas where air pollution sources are abundant (Achakulwisut et al., 2019). The pollution effect on ED visits is higher for children (Ostro et al., 2009) and women (Luginaah et al., 2005). Fine particles have an immediate effect on cardiovascular diseases, and a delayed effect for respiratory diseases (Kim et al., 2012).

The majority of ED visit models proposed in the literature is limited to calendar-related predictors, most likely to simplify practical implementation and use at hospitals. Environmental factors are highly correlated and vary with seasons, bringing challenges of high-dimensionality and multi-collinearity into modeling. However, environmental factors have statistically significant influences on ED visits which should be incorporated rather than disregarded out of inconvenience. Recent climate change has been reported to exhibit manifold direct and ecosystem-mediated impacts on human health, and research to quantify its ultimate impact is ongoing (Smith et al., 2014). Whereas mortality and morbidity related to heat waves and pollutants have been

widely studied in Europe (Hertel et al., 2009; Gabriel and Endlicher, 2011; Breitner et al., 2014; Lowe et al., 2015), less information has been conveyed concerning hospital admissions (Ferrari et al., 2012; Shiue et al., 2016). Wang and Lin (2014) reported that ED admissions are most suitable to analyze weather effects, and thus in the long run climate change impacts on specific illnesses and accidents of all kinds. Therefore, projections of climate change mandate the increased need for optimized ED management and resource allocation via comprehensive models incorporating weather and pollution-related variables as drivers (Kingsley et al., 2016).

Towards this end, we collected and analyzed five years of EMS vehicle operations in Munich, Germany to identify the most influential calendar-related variables, meteorological conditions, weather warnings, as well as ambient air pollutants associated with daily ED admissions. We hypothesized that environmental factors influenced daily ED admissions independently from seasonal and calendar impacts, with differences according to age, sex, and ED type.

## 2. Data and methods

### 2.1. EMS data

EMS admissions to hospitals in the city and the county district of Munich were provided by the Munich Emergency Services Authority for the period 2014 to 2018. Data were collected through the Interdisciplinary Medical Care Capacity Management System ('Interdisziplinärer Versorgungsnachweis' IVENA), an online web-based system for hospitals to display their current healthcare capacities to the dispatchers of the EMS Command Centre ('Integrierte Leitstelle' ILS) who assign emergency rescue vehicles (first responders, ambulances and helicopters) to receptive hospitals. IVENA guides and directs admissions and aims to reduce unnecessary journeys. The daily ED admissions in this paper do not include the walk in patients. Planned transportations of non-emergency cases were also excluded.

The 5-year daily data comprised 575,725 entries, including day and time of the emergency call, age and sex of each patient as well as initial diagnosis. The list of initial diagnoses and the assigned departments are provided in the supplementary Table S2. In addition to total daily ED admissions, subgroups related to age, sex and assigned department were performed; see Table 1. One week in April 2014, which exhibited an unrealistically small number of patients due to reporting error, was excluded from the analysis (see Fig. 1).

As explanatory calendar variables, we used year, day of the week, public and Bavarian school holidays (Bavarian Ministry of education, 2020) as well as the days of Munich Oktoberfest (16 to 18 days from mid-September till beginning of October). We also considered New Year's Eve and New Year, and the working days of the week following the start or the end of the daylight saving time.

### 2.2. Environmental data

We obtained data on ambient air pollution as hourly concentrations ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) of particulate matter (PM) with an aerodynamic diameter  $< 10 \mu\text{m}$  (PM<sub>10</sub>), ozone (O<sub>3</sub>), nitrogen monoxide (NO), and nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) (Bavarian State Office for environment, 2020). We downloaded hourly meteorological data from the Climate Data Center of the German Meteorological Service (DWD)

**Table 1**  
Average daily hospital ED admissions through IVENA system (2014–2018) by season as well as by subgroups of patients.

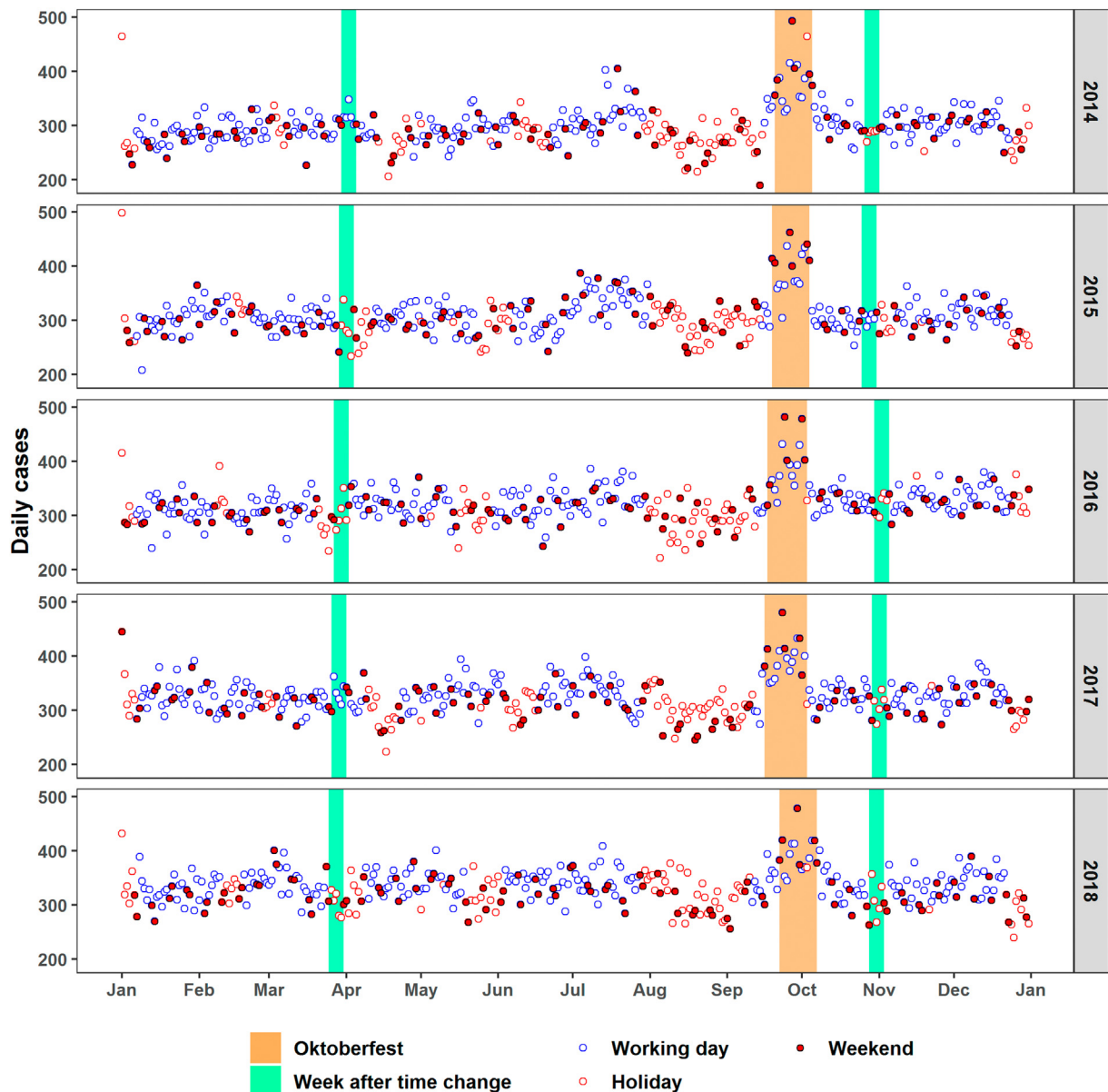
		All periods	Winter	Spring	Summer	Fall
Average daily number of admissions <sup>a</sup>		315.3	313.7	307.8	313.5	326.2
By age	Elderly >70	127.6	134.9	125.6	122.3	127.8
	Adults 18–70	157.7	149.4	152.1	161.3	167.8
	Children <18	26.4	25.6	26.7	26.5	26.8
By sex	Female	156.5	159.3	153.0	155.2	158.7
	Male	156.6	152.1	152.8	156.1	165.2
By assigned department <sup>b</sup>	Surgery	127.0	119.4	123.2	131.0	134.6
	Internal	178.2	184.4	174.9	172.3	181.4

<sup>a</sup> The total number of admissions and the percentages within each category are provided in Table S1.

<sup>b</sup> The numbers of cases within each category are provided in Table S2.

(Deutscher Wetterdienst, 2020) for the years 2014 to 2018 and the weather station #3379 in Munich. We calculated the universal thermal climate index (UTCI) based on air temperature, wind speed, relative air humidity and mean radiant temperature (Bröde et al., 2012). Since the direct and diffuse radiation were not available, we

used relative air humidity and the cloud cover to estimate the mean radiant temperature (Matzarakis et al., 2007; Lindauer et al., 2017). Missing values in the meteorological data were identified in less than 4.5% of the period of interest. The missing values were imputed using k-nearest neighbor (k = 5).



**Fig. 1.** Daily ED admissions through the IVENA system in the Greater Munich Area (2014–2018).

**Table 2**  
Daily mean concentrations of ambient air pollutants and meteorological factors, Munich, Germany (2014–2018).

	Total period		Winter		Spring		Summer		Fall	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Temperature (°C)	10.89	7.61	2.55	4.14	10.55	5.25	19.71	3.61	10.60	5.18
UTCI (°C)	12.92	10.09	2.33	6.97	12.66	7.66	23.50	4.15	12.96	7.72
Pressure* (hPa)	955.73	7.18	956.02	9.81	953.93	7.20	956.10	3.95	956.90	6.23
* Station height 515 m a.s.l										
Wind (m sec <sup>-1</sup> )	2.74	1.15	2.93	1.45	2.93	1.07	2.58	0.69	2.51	1.18
Cloud cover (%)	66.86	30.05	76.40	26.44	64.11	30.87	57.36	29.99	69.80	29.42
Absolute humidity (g m <sup>-3</sup> )	7.47	2.92	4.59	1.10	6.51	1.98	10.88	1.82	7.83	2.18
Precipitation amount (mm)	2.47	5.59	1.83	3.68	2.29	4.87	3.40	7.20	2.36	5.86
Precipitation duration (hours)	2.75	4.36	3.09	4.38	2.77	4.50	2.44	3.78	2.70	4.72
Sunshine duration (hours)	5.10	4.53	2.58	2.99	5.90	4.54	7.88	4.68	3.97	3.79
PM <sub>10</sub> (µg m <sup>-3</sup> )	20.67	15.52	24.10	26.97	21.05	11.04	17.83	6.10	19.75	8.12
O <sub>3</sub> (µg m <sup>-3</sup> )	41.96	22.43	26.68	17.15	52.30	15.59	62.02	15.88	26.39	15.47
NO (µg m <sup>-3</sup> )	36.66	24.55	49.02	34.18	29.94	14.70	24.37	9.51	43.64	23.59
NO <sub>2</sub> (µg m <sup>-3</sup> )	42.57	12.36	46.54	15.51	42.59	11.99	39.71	9.70	41.49	10.51

We aggregated all hourly values into daily values using the mean, minimum, maximum, duration, and summation when appropriate. In order to study lag effects, we also aggregated these factors for one-, two-, and three-days. A summary of the meteorological and ambient pollution data is provided in Table 2. The correlation matrix of the main environmental variables is provided in Fig. 2, and for each season in Fig. S4.

DWD provided hourly weather warnings announced in Munich during the same period. The durations of these warnings in hours were considered as possible explanatory variables; see Table 3.

2.3. Statistical methods

Normal linear models were used to predict daily ED admissions, with the quantity linearly dependent upon calendar and meteorological

variables, pollution concentrations, weather conditions and warnings. Lag effects of meteorological and pollution variables from one to three days were all considered as potential predictors in the models. A complete enumeration of the 222 predictor features is provided in Supplementary Table S2. Optimal selection of the final set of predictors to include in models was performed in two steps. The first step included minimization of the Bayesian Criterion (BIC) for models fit to data spanning the four meteorological years from January 2014 to November 2017. The second step comprised cross-validation minimizing the Root-Mean-Square-Error (RMSE) from candidate models constructed from the first step and evaluated on data from the meteorological year 2018 (December 2017–November 2018) as the test set.

Separate prediction model analyses were performed for the meteorological seasons (DJF winter, MAM spring, JJA summer, SON fall), with additional subset analyses for the elderly (70 year +), adults

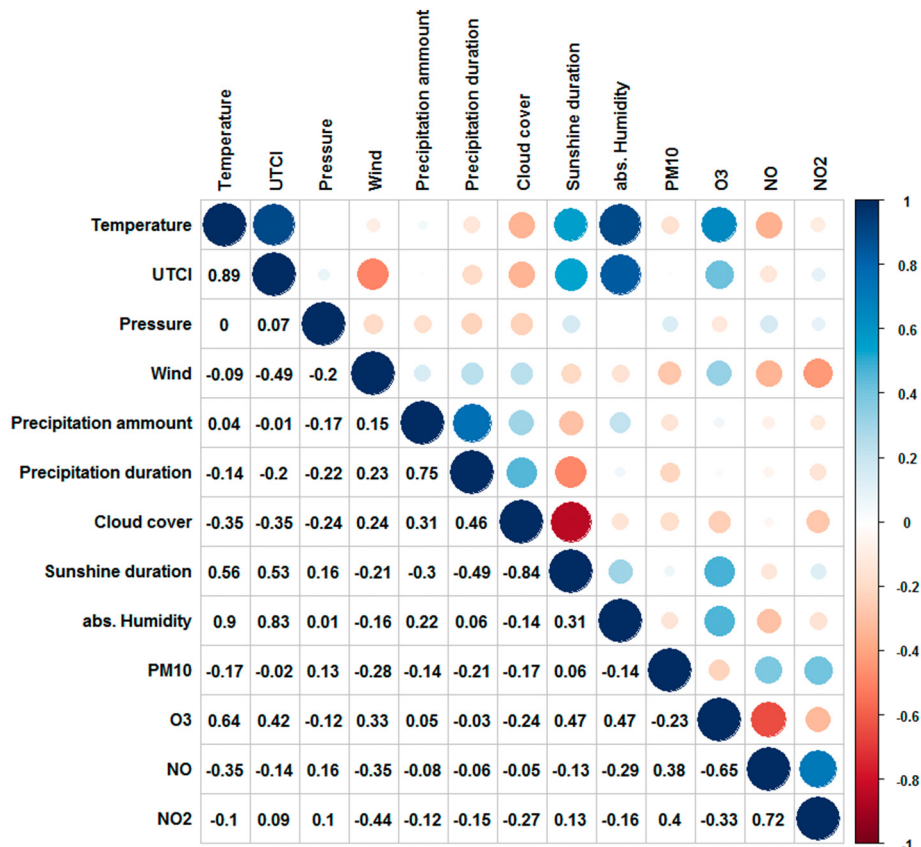


Fig. 2. Correlations between the main environmental variables.

**Table 3**  
Number of days<sup>a</sup> with special weather conditions and warnings, Munich, Germany (2014–2018).

		Total period	Winter	Spring	Summer	Fall	
Conditions	Snow	99	63	15	9	12	
	Fog	414	128	48	41	197	
	Thunderstorm	156	5	41	98	12	
	Storm Beaufort $\geq 6$	196	79	47	33	37	
	Storm Beaufort $\geq 8$	10	5	2	0	3	
	Glaze/clear ice	10	9	0	0	1	
	Rime	112	56	47	0	9	
	Hail	8	0	2	6	0	
	Rain	859	220	213	229	197	
	Warnings	Frost	565	363	128	0	74
		Thunderstorm	328	12	84	198	34
		Slipperiness	336	246	53	0	37
		Snow	164	112	33	0	19
Fog		171	68	8	2	93	
Gusts		282	110	58	51	63	
Heavy rain		60	0	6	42	12	
Long lasting rain		62	2	15	21	24	
Hail		23	0	2	18	3	

<sup>a</sup> These include any day when the condition/warning was observed/issued for at least 1 h.

(18–70 year), children, females, males, surgical and internal cases. This comprises a total of 32 models which are presented in terms of the change in total daily ED admissions associated with a unit increase in each of the associated factors. For example, an increase in the mean temperature by 1 °C causes an increase of the total daily ED admissions in summer by 4.37 (see Fig. 3).

Model diagnostics revealed no autocorrelation in the residuals so that independent normal errors could be assumed. Similar checks revealed that the Poisson distribution as regularly used for counts did not improve the goodness-of-fit, ostensibly due to large sample sizes fulfilling the Normal distribution approximation. The variance inflation factor values were mostly below 2 indicating low multicollinearity in the final models.

All computations were performed in the R statistical software package (version 3.5.1) and all comparisons were made at the two-sided 0.05 level of significance.

### 3. Results

#### 3.1. Daily total ED admissions

Daily numbers of ED admissions increased linearly over the time period of the study, 2014–2018, on average by 5.5, 6.4, 11.9 and 11.87 per year for summer, fall, winter and spring, respectively (Fig. 3). They declined on Sundays in winter, spring and summer (−11.2, −12.5 and −16.9, respectively), on Wednesdays in winter (−14.2), and increased on Mondays (+12.7) in winter as well as on Saturdays (+15.9) and Fridays (+10) in fall. The Oktoberfest was associated with a sharp increase of 77.9 more patients per day in the fall, while the time changes in the fall and spring did not result in statistically significant changes in visits after adjustment for other factors. On the other hand, public holidays and school vacations in all seasons were associated with smaller patient numbers (spring −28.4, summer −30.2, fall −12.3 and winter −11.7).

Higher levels of select single air pollutants increased ED daily admissions in winter, fall and summer, but not in the spring. Specifically, in winter a unit-increase in the current day maximum PM<sub>10</sub> was associated with 0.2 more daily visits, in fall a unit-increase in the current day minimum O<sub>3</sub> concentration was associated with a 0.5 increase in ED admissions, and in summer a unit-increase in mean NO concentration over the last three days was associated with 0.3 more daily visits.

Multiple weather features impacted daily ED admissions for all seasons, except winter. In summer, ED daily admissions increased significantly with mean temperature (+4.4), minimum UTCI of the previous

three days (+1.2) and current day hours of sunshine (+1), but decreased (−1.1) with more sunshine at a lag of two days prior to the current day. Maximum current day temperature increased ED admissions in both spring (+2.8) and fall (+1.2), while minimum temperature three days prior decreased ED admissions in those two seasons by −2.1 and −1.6, respectively. Apart from a small and marginally significant negative effect of three-day lagged minimum pressure in spring (−0.7), no other weather factor was chosen by the feature selection process for association to daily ED admissions. However, warning hours for long rainfall on the current day (−1.3) as well as three days prior (−0.7) reduced ED admissions in fall, and duration of wind gust warnings one day prior increased daily ED admissions by 1 visit.

#### 3.2. Number of ED admissions by sex

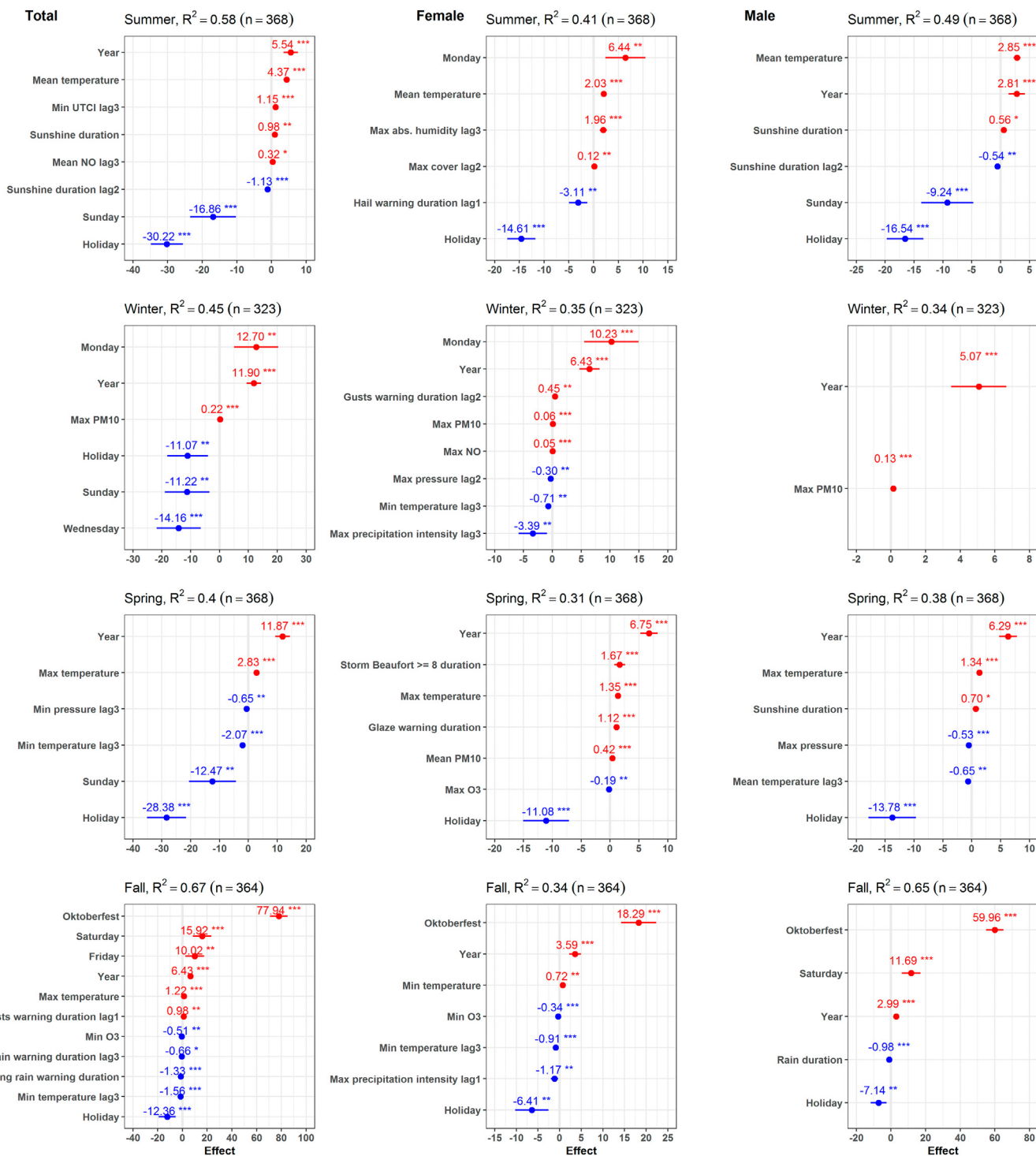
Oktoberfest resulted in an average three-fold increase in ED admissions for males compared to females (+60 vs +18.3, respectively, Fig. 3). The influence of weekday on the number of male patients was limited to summer Sundays (−9.2) and fall Saturdays (+11.7), perhaps linked to Oktoberfest activities. For females, a weekday effect occurred only on Mondays during winter (+10.2) and summer (+6.4). The trend with year was similar for males and females in all seasons except for summer, where a positive effect was shown for males (+2.8) but not for females. In spring, summer and fall, the effect of holidays on ED admissions was slightly higher for males compared to females, but no influence on both was detected in winter.

Only a few weather conditions influenced the number of male patients delivered to the ED, with none in winter, and only duration of rain in fall. In summer, the number of male daily ED admissions increased with mean temperature (+2.85) and was slightly affected by duration of sunshine two days prior. Similarly, higher maximum temperatures in spring increased the number of male ED admissions (+1.3), as did hours of sunshine, while the three-day lagged temperature mean and maximum pressure had negative effects. More weather variables affected the number of female patients, and these covered all seasons. In summer, female ED admissions were associated with mean temperature (+2.0) and absolute humidity (+2.0), in spring with duration of strong storms (+1.7), maximum temperature and frost warning duration, in winter with two days lagged wind gust warnings, and in fall with minimum temperature. Fewer female patients were delivered to EDs with hail warning duration on the previous day (−3.1) in summer, with three-day lag of maximum precipitation intensity (−3.4) and three-day lag minimum temperature during winter, and with one-day lag maximum precipitation intensity (−1.2) and three-day lag minimum temperature and in fall.

The influence of pollutants on ED numbers of males was limited to PM<sub>10</sub> in winter. In females, significant influences were detected for mean PM<sub>10</sub> and maximum O<sub>3</sub> in spring, minimum O<sub>3</sub> in fall, and maximum PM<sub>10</sub> and maximum NO in winter. However, the respective estimated influences were small.

#### 3.3. Number of ED admissions by age

The number of ED admissions of older patients increased by 5–8 per year depending on the season, except for spring (+0.5) (Fig. 4). For adults such a trend was observed only in winter (+4.4), but not for children. The Oktoberfest had a large influence on the number of adult patients (+70.8), a small influence on older people (+6.4), and no influence on children (see also Figs. S1, S2). New Year's Day was associated with an enormous increase in the number of adult patients (+129.1), but had no effect on children and elderly people (see also Fig. S3). Other holidays similarly had no effect on the number of elderly patients, but were linked to fewer child patients in all seasons and fewer adult patients in all seasons except for fall. On Sundays in the ED, there were fewer elderly patients in summer and fall, fewer children patients in spring, summer and winter, and fewer adults in summer. There were

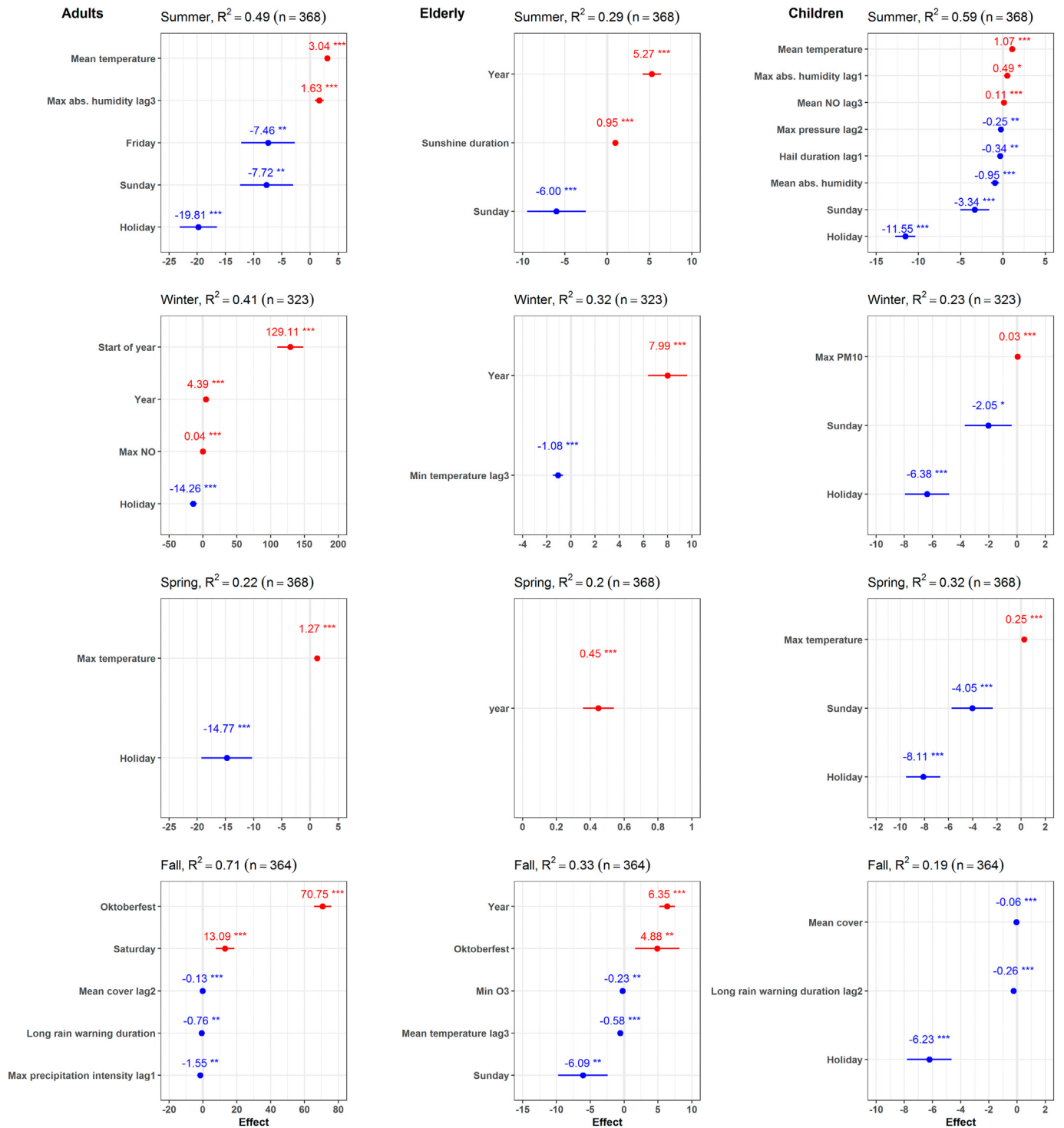


**Fig. 3.** Change in the number of daily ED admissions (Total, Female, and Male) associated with a unit increase in the respective factor in Munich (2014–2018) by season. Dots and bar lengths indicate estimates and confidence intervals. Star numbers indicate significance levels: \*  $P < .05$ , \*\*  $P < .01$ , \*\*\*  $P < .001$ . The associated R-squared value for each season is presented above the panel. For exact definitions of the predictor variables see Supplementary Table 3.

more adult patients only on Saturdays in fall and fewer patients on Fridays in summer.

The number of ED patients in fall decreased with one-day lag maximum precipitation, two-day lag cloud cover, and warnings of long rain for adult patients, two-day lag duration of long rain warnings for child patients, and three-day lag mean temperature for elderly people. Weather influence was not shown for adult and children ED numbers in winter. However, fewer elderly patients were delivered to EDs with higher three-day lag minimum temperature in winter.

For spring, only the current day maximum temperature had a positive influence on the number of adult (+1.3) and child patients (+0.3), whereas no climatic effect was observed for elderly in this season. During summer, the only weather factor that affected the number of elderly patients was hours of sunshine duration, with a marginal increase of one elderly ED delivery per 1 h increase in sunshine duration. For adults, current day temperature mean was the most influential factor (+3.0), followed by the three-day lag absolute humidity (1.6). For children, a positive effect of mean temperature (+1.1) and a negative



**Fig. 4.** Change in the number of daily ED admissions (Adults, Elderly, and Children) associated with a unit increase in the respective factor in Munich (2014–2018) by season. Dots and bar lengths indicate estimates and confidence intervals. Star numbers indicate significance levels \*:  $P < .05$ , \*\*:  $P < .01$ , \*\*\*:  $P < .001$ . The associated R-squared value for each season is presented above the panel. For exact definitions of the predictor variables see Supplementary Table 3.

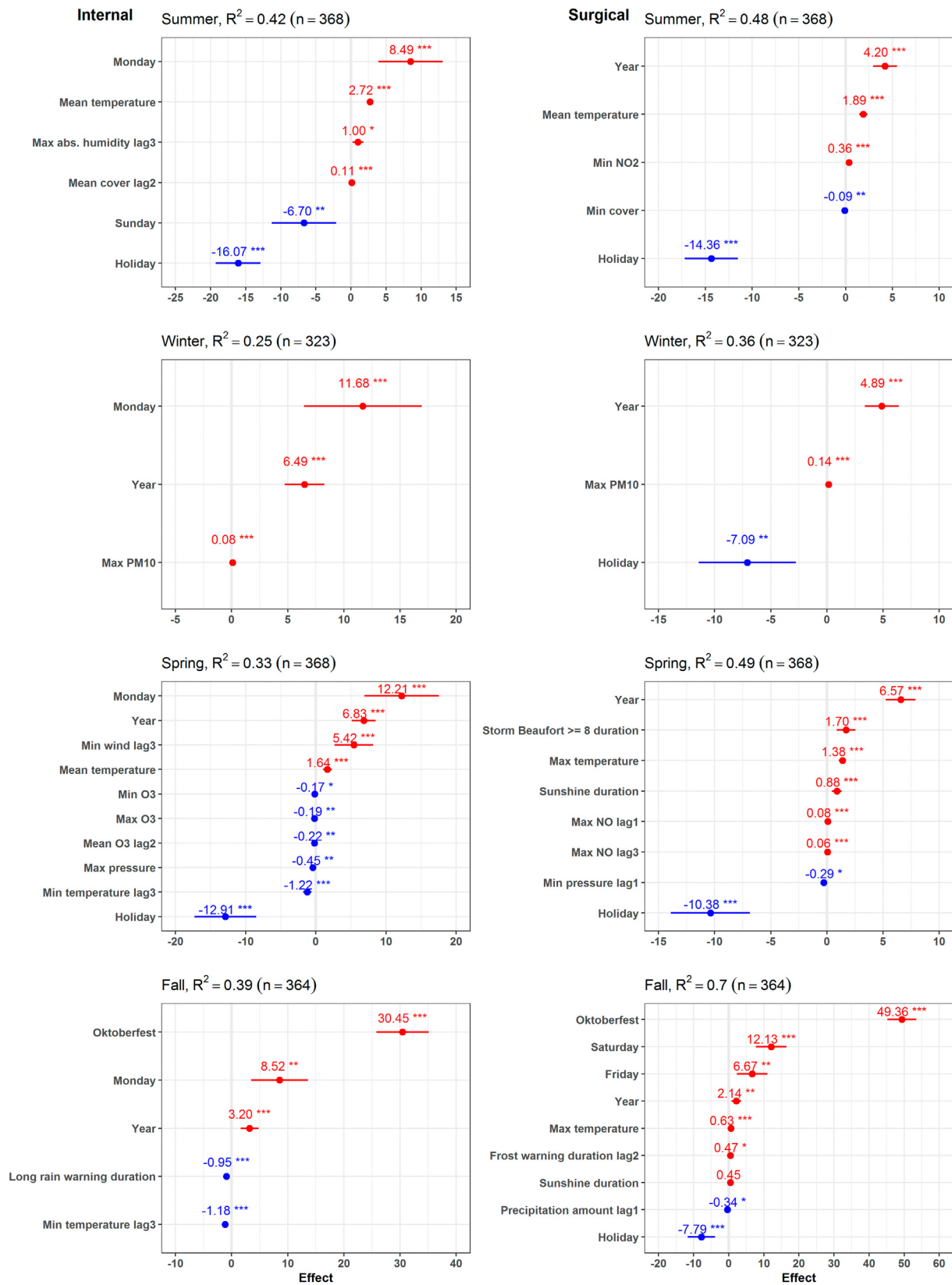
effect of mean absolute humidity were detected ( $-1.0$ ). To a lesser extent, summer ED admissions of children were affected by the lag values of maximum absolute humidity, maximum pressure, and duration of hailstorms.

The influence of pollutants on the number of patients was small when each age group was considered individually. Minimum  $O_3$  concentrations had a negative effect on the elderly patients' numbers in fall, higher maximum NO concentrations in winter were linked to more adult patients. As for child patients, adult ED numbers increased

with higher maximum concentrations of  $PM_{10}$  in winter, and with higher three-day lag mean NO concentrations in summer.

### 3.4. Number of ED admissions by department

Oktoberfest had a larger influence on ED admissions for surgical (+49.4) than internal cases (+30.5) (Fig. 5). Holidays presented fewer surgical cases in all seasons, but fewer internal cases only in spring and summer. Surgical case numbers were higher on Fridays



**Fig. 5.** Change in the number of daily ED admissions (Internal and Surgical) associated with a unit increase in the respective factor in Munich (2014–2018) by season. Dots and bar lengths indicate estimates and confidence intervals. Star numbers indicate significance levels: \*,  $P < .05$ ; \*\*,  $P < .01$ ; \*\*\*,  $P < .001$ . The associated R-squared value for each season is presented above the panel. For exact definitions of the predictor variables see Supplementary Table 3.

and Saturdays, but only in the fall. Internal cases were higher on Mondays for all seasons, while lower on Sundays in summer.

No climatic effect on the number of surgical cases was recorded in winter. However, the number of surgical ED cases in summer increased with mean temperature. Duration of storms, maximum temperature and sunshine duration had a positive influence on the number of surgical cases during spring. In fall, more surgical ED admissions were associated with higher maximum temperatures, while precipitation amount on the previous day had a negative marginal effect.

Similarly, no influence of weather-related factors on internal cases in winter was found. More internal cases in summer were associated with higher mean temperature (+2.7), higher three-day lag maximum humidity (+1), and two-day lag mean cloud cover (+0.1). In spring, more internal cases were found with higher values of the three-day lag minimum wind speed (+5.4) and higher mean temperatures (+1.6), whereas less occurred with the three-day lag minimum temperature (-1.2) and maximum pressure. Internal cases decreased in fall with the three-day lag minimum temperature (-1.2) and duration of long rain warnings (-0.1).

The influence of air pollutants was minimal on both internal and surgical cases. The surgical cases increased with higher concentrations of NO<sub>2</sub> in summer, PM<sub>10</sub> in winter, and lagged NO in spring. More internal cases were associated with lower O<sub>3</sub> concentrations in spring and higher PM<sub>10</sub> concentrations in winter.

#### 4. Discussion

Analyses of 5-year ED admissions for the greater Munich area supported the hypothesis that, in addition to calendar-related variables that had consistently strong effects, environmental factors also influenced daily ED numbers, although these effects varied with age, sex, and ED type. A considerable proportion of variance in ED numbers was explained by the analyses predictors ( $R^2$  up to 0.71). One out of 32 subgroup models uniquely relied on calendar-related variables, but 6 additionally relied on air pollutants (mostly in winter), 15 on weather factors and 10 on both weather and pollutant factors.

##### 4.1. The influence of calendar-related variables

Public holidays and school vacations consistently had a strong negative effect on ED numbers except among the elderly. Citizens over 70 years of age are generally retired in Germany, and their activities should therefore be independent of working days, unless they are involved through other working family members. However, the city of Munich relies heavily on public transportation, cycling and walking, with shops closed on Sundays, so the elderly are not immune to weather impacts on working days. Effects of holidays on ED numbers have been previously reported across various destinations across the globe with varying directions of impact. ED numbers were lower during holidays for low income populations in New York (Castner et al., 2016), and for Sao Paulo (Marcilio et al., 2013), but higher in Australia (McAllan et al., 2019). It proved to be more useful to model effects of specific holidays individually (Duwalage et al., 2020). In this study, fewer ED admissions were made on holidays (except New Year's Eve) in all seasons, but effect sizes were larger in spring and summer compared to fall and winter. This could be due to departure of families with children during the two-week spring and early summer school holidays, as well as the summer vacation, which typically witnesses a loss of 10% of German urban populations. Results here showed that in spring and summer, children had approximately 1/6 of the adult patient numbers, but nearly 1/2 of the adult ED holiday effect.

The Oktoberfest is an extraordinary event in the city of Munich and for its healthcare system. In 2019, the official Oktoberfest website estimated the total number of visitors within three weeks at 6.3 million, most of whom were men (Oktoberfest.de, 2020). 7.3 million l of beer were consumed in 2019. Data indicated an outstanding additional

number of daily patients within this period (+78), especially among males (+60) and adults (+71). Similarly to the results found in this study, previous studies indicated that during the Oktoberfest, males in their twenties had the highest risk of landing in the ED (Binner et al., 2008). The Oktoberfest effect observed in this study was high for internal and disproportionately high for surgical cases. It was three times lower for females, much lower for the elderly, and nonexistent for children, an order most likely related to alcohol consumption habits. ED's throughout Bavaria prepare for the annual anticipated burden during the Oktoberfest.

On the day after New Year's Eve a high number of emergencies can be expected, particularly due to alcohol intoxication (Scholliers et al., 2019), injuries caused by fireworks (Serra López et al., 2020) and the deterioration of air quality after their use (Grevén et al., 2019; Singh and Srivastava, 2020). In Munich, there was a strong effect on ED numbers only for the adult group (+129). However, additional patient numbers admitted on January 1st has been decreasing every year (see Fig. 1).

Year by year, ED admissions in Munich increased on average, especially in winter and spring. This effect was observed in all seasons in both the elderly as well as surgical cases, but in patients under 18 years of age, in none of the seasons. We assume that this is related to the low fertility rate in Germany, which has not exceeded a maximum of 1.6 in the last two decades (The World Bank Group, 2020), and the short span of five years of study.

Weekends had fewer ED visits compared to working days, as reported in the literature, especially for Monday (Calegari et al., 2016; Carvalho-Silva et al., 2018). In Australia, however, both Sundays and Mondays showed a 10% higher number of ED visits (Duwalage et al., 2020), which underlines the importance of addressing individual weekdays separately. Interestingly, there were more female and internal cases at Munich EDs on Mondays in summer and winter. On the other hand, there were fewer patients on Sundays, especially in summer and for internal cases.

Despite the reported increase in traffic accidents and suicide cases in Germany in the week after the daylight savings time change in spring (Lindenberger et al., 2019) and the increase in accidents due to insufficient sleep on the first Monday after the spring time change (Coren, 1996), such an effect was not observed on the number of ED admissions after adjusting for the meteorological and pollutant effects.

##### 4.2. The influence of environmental variables

Temperature variability within each season is expected to influence morbidity and mortality rates under climate change scenarios, and this effect should already manifest in summer with higher mean temperatures (Malig et al., 2019; Klug et al., 2020). In this study of the greater Munich area, higher mean and maximum temperatures in spring and summer were associated with more ED admissions in almost all sex, age, and department subgroups. The effect size varied between ~1 to ~4 additional ED patients per °C, so that with more pronounced temperature anomalies in these seasons (e.g. +7 °C for the 2015 summer heatwave at the beginning of July) the effect could easily exceed +25. Various medical reasons are listed in the literature: Older people are admitted for diabetes and internal reasons, adults for fluid-electrolyte imbalances, and children for asthma and intestinal infections (Winquist et al., 2016). It is reported that the effect is higher in men than in females, and in rural than in urban areas (Lippmann et al., 2013). In the Netherlands, however, no such sex difference was found (van Loenhout et al., 2018). Most strikingly, no heat-related effect was shown for the elderly group in Munich. This could indicate appropriate heat warning systems in combination with a high standard of living. But in all other subgroups there was a strong effect of heat stress in spring and summer, which was mainly indicated by pure temperature variables rather than UTCI. For the city of Frankfurt (Germany), a high excess morbidity during the summer heat wave of 2015 was noted, leading to a ~200% increase in EMS operations due to heat-related



disorders (Steul et al., 2019). If, as in our study a larger subgroup of internal cases is considered, this relative increase should be lower (~10%).

In addition to temperature, other weather variables that promote heat stress also had an effect on the number of ED visits in spring, summer and fall. Longer periods of sunshine and less cloud cover increased the total number of ED visits predominantly in summer. Sunshine duration may cause cardiac arrest, especially in early summer (Onozuka and Hagihara, 2017). Humidity is an important factor for the apparent temperature (Min et al., 2019), which reflects human discomfort on hot and humid days. The main source of body cooling on warm days is the evaporation of sweat, which is hindered when the air is almost saturated. The current study identified this effect of humidity in summer to increase ED numbers in females, children, adults and internal cases with effect sizes between 1 and 2 per  $\text{g m}^{-3}$  water vapor.

On the other hand, higher morbidity in winter is associated with lower minimum temperatures (Klug et al., 2020). In Munich, lower lagged minimum temperatures were associated with more ED visits by elderly and females in winter and more internal and total visits in the transitional seasons (effect sizes of  $-1$  to  $-2$  per  $^{\circ}\text{C}$ ). This lagged effect could be explained by colds and influenza, where at-risk patients were admitted to ED only a few days after recording cold minimum temperatures. It is known that women (Zhou et al., 2014) and older people (Baumgartner et al., 2008; Chen et al., 2019) are more susceptible to cold weather. In fall, a combined effect was observed here, as both lagged minimum and maximum temperature influenced ED visits. Higher lagged minimum temperatures decreased the number of ED visits in elderly people, females and internal cases, and in contrast higher maximum temperatures increased the total number of ED visits.

The other weather variables were less frequently included in the models, but still showed a consistent pattern, e.g. to what is perceived as "bad" rainy weather. Warnings against long rains as well as long rain duration (also on preceding days) in fall were associated with lower ED numbers in total cases and all subgroups except the elderly. In Ohio, USA, ED visits decreased with precipitation (Faryar, 2013). In South Korea, ED visits decreased on the same day of rainfall and increased on the following days (Lee et al., 2016). The positive lagged effect was also reported in Wisconsin (Drayna et al., 2010). This discrepancy could be caused by the different geographical location, as the seasons were treated separately and precipitation was not limited to rain. Daily sum of rain was not chosen in the feature selection process, most likely because it is highly variable in time and space. Rain or the threat to rain over a long period of time would result in the tendency to stay at home. A similar explanation might be assumed for the observation that hail warnings in summer were associated with decreased ED numbers in females and children.

The second minor, but consistent pattern is related to storm and other hazards indicated by e.g. storm duration and warning, warning against gusts, minimum wind speed, low pressure systems as well as warnings against hail and slipperiness. Several cases in spring, as well as in other seasons, witnessed increasing numbers of ED visits in total cases, males and females, as well as internal and surgical cases, under these circumstances. In the literature, only dust storm events with extremely high levels of particulate matter were reported to be associated with large increases in ED visits (Merrifield et al., 2013), and no effect of strong winds, thunderstorm or tornadoes was reported for a county in Ohio, US (Faryar, 2013).

Concerning air quality, ambient pollutants consistently posed a significant effect on the number of ED visits. The effects sizes as reported in Figs. 3 to 5 appear small at first glance, but must be related to the regularly observed fluctuations, as indicated by their SD in Table 2. Coarse particulate matter ( $\text{PM}_{10}$ ) in winter was associated with increased ED visits in most subgroups with effect sizes up to 0.22 per  $\mu\text{g m}^{-3}$  (total cases, see Fig. 3). Assuming twice the  $\text{PM}_{10}$  SD in winter, this would translate into ~12 additional daily cases. Additionally, emergency cases in some subgroups were positively associated with NO concentrations in winter and (with a lagged effect) in summer. Again, based on SD

and effect size, this could result in up to ~6 additional ED cases. The World Health Organization et al. (2003) concluded that cardiovascular deaths and morbidity indicators are related to ambient PM. High concentrations of fine particles are known to increase ED visits due to hypertension (Szyszkowicz et al., 2012) and cardiopulmonary diseases (Feng et al., 2019). Winter inversions also increase the rates of ED visits due to asthma (Beard et al., 2012), which could be linked to the trapping of pollutants in the cold layer near the surface intensifying their concentrations.

It is worth noting that higher  $\text{O}_3$  concentrations, potentially indicating photochemical smog episodes, were associated with fewer ED visits in the transitional seasons, especially in total cases, females, elderly and internal cases. Surface ozone is harmful to human health (Krzyzanowski and Cohen, 2008), and high  $\text{O}_3$  concentration is expected to increase the number of ED visits due to asthma (Stieb et al., 1996). However, a negative association between  $\text{O}_3$  and cardiac admissions was found in London, but positive in Hong Kong (Wong et al., 2002). Under the assumption that  $\text{O}_3$  levels currently observed in the transitional seasons are below critical thresholds for short-term exposure, the detected  $\text{O}_3$  effect may be a proxy for other ones, e.g. less  $\text{NO}_x$  usually scavenging  $\text{O}_3$ . Independent (per se)  $\text{O}_3$  effects have been mostly found in summer (World Health Organization et al., 2003).

#### 4.3. Limitations

ED admissions in this research are based solely on cases transported via the EMS ambulance system in Munich, and does not include cases which are transported by other means.

Reported statistical associations do not imply causality. For example, Mondays are linked to higher activities on the roads, thereby increasing the concentration of pollutants. So the observed association between pollutants and ED admissions could be due to the unmeasured confounder of increased traffic, which increases both pollutants and ED admissions. Despite the high number of variables tested and included, there still might be suitable predictors which were not included, such as atmospheric concentrations of allergenic pollen or other events bringing more visitors to Munich, including festivals and job fairs.

Specific variables could have been omitted by the automatic model selection due to high correlation with other variables as the model selection process is not able to unravel multi-collinear effects. Additionally, the span of five years may be insufficient to capture year-to-year variability of weather factors, especially heatwaves (Schär et al., 2004), which advocates continual ED visit and rescue service monitoring in tandem with associated weather variables.

## 5. Conclusions

Although the complex and combined effects of pollutants and weather on ED admissions vary by season, sex, age, and department, the overall pattern suggests that with ongoing climate change, characterized by more hot days and increased variability of rainfall as well as drought periods (Seneviratne et al., 2012), numbers of daily ED admissions could continue to increase, warranting more resource planning. Special attention should be paid to NO and  $\text{PM}_{10}$  concentrations in winter in order to prevent higher morbidity, potentially requiring emergency rescue operations. Realistic prediction of rescue service operations considering in addition to calendar-related factors, weather and air pollutants in winter will improve the healthcare system and guide the daily allocation of resources and staff at the hospital and city level.

#### CRedit authorship contribution statement

**Wael Ghada:** Formal analysis, Visualization, Writing - original draft, Writing - review & editing. **Nicole Estrella:** Writing - review & editing. **Dominik Pfoerringer:** Writing - review & editing. **Karl-Georg Kanz:**

Writing - review & editing. **Viktoria Bogner-Flatz:** Writing - review & editing. **Donna P. Ankerst:** Methodology, Writing - review & editing, Supervision. **Annette Menzel:** Conceptualization, Resources, Writing - review & editing, Supervision, Project administration, Funding acquisition.

### Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

### Acknowledgments

We thank the Rettungszweckverband for providing the IVENA data, the Deutscher Wetterdienst (German Meteorological Service - DWD) for the weather data, the Bavarian State Office for Environment for the air pollution data, and Mr. Tobias Ottenheim for his contribution in the first stage of the project. This study was conducted in the WIKLIGE network as part of the joint project "Climate Change and Health", funded by the Bavarian State Ministry of the Environment and Consumer Protection as well as the Bavarian State Ministry of Health and Care (K3-8503-PN 18-18-D14187/2018).

### Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143772>.

### References

Bavarian State Office for environment. 2020. Measurement archive of air pollutants. <https://www.lfu.bayern.de/luft/immissionsmessungen/messwertarchiv/index.htm>. Accessed 2020 Jun 4.

Oktoberfest.de. 2020. The official Oktoberfest review 2019: The Official Website for the Oktoberfest in Munich. <https://www.oktoberfest.de/en/magazine/oktoberfest-news/2019/the-official-oktoberfest-review-2019>. Accessed 2020 Jun 11.

Achakulwisut, P., Brauer, M., Hystad, P., Anenberg, S.C., 2019. Global, national, and urban burdens of paediatric asthma incidence attributable to ambient NO<sub>2</sub> pollution: estimates from global datasets. *The Lancet Planetary Health* 3 (4), e166–e178. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30046-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30046-4).

Anenberg, S.C., Henze, D.K., Tinney, V., Kinney, P.L., Raich, W., Fann, N., et al., 2018. Estimates of the global burden of ambient ozone: see text, ozone, and formula: see text on asthma incidence and emergency room visits. *Environ. Health Perspect.* 126 (10), 107004. <https://doi.org/10.1289/EHP3766>.

Baumgartner, E.A., Belson, M., Rubin, C., Patel, M., 2008. Hypothermia and other cold-related morbidity emergency department visits: United States, 1995–2004. *Wilderness Environ Med* 19 (4), 233–237. <https://doi.org/10.1580/07-WEME-OR-104.1>.

Bavarian Ministry of education. 2020. Historical official holidays for Bavaria, Germany. <https://www.km.bayern.de/schueler/schule-und-mehr/termine/ferientermine.html>. Accessed 2020 Jun 4.

Beard, J.D., Beck, C., Graham, R., Packham, S.C., Traphagan, M., Giles, R.T., et al., 2012. Winter temperature inversions and emergency department visits for asthma in Salt Lake County, Utah, 2003–2008. *Environ. Health Perspect.* 120 (10), 1385–1390. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104349>.

Bhaskaran, K., Gasparrini, A., Hajat, S., Smeeth, L., Armstrong, B., 2013. Time series regression studies in environmental epidemiology. *Int. J. Epidemiol.* 42 (4), 1187–1195. <https://doi.org/10.1093/ije/dyt092>.

Binner, C., Selinski, S., Barysch, M.J., Pölcher, C., Schormann, W., Hermes, M., et al., 2008. Munich Oktoberfest experience: remarkable impact of sex and age in ethanol intoxication. *Arch. Toxicol.* 82 (12), 933–939. <https://doi.org/10.1007/s00204-008-0373-z>.

Bolt, S., Sparks, R., 2013. Detecting and diagnosing hotspots for the enhanced management of hospital Emergency Departments in Queensland, Australia. *BMC Med Inform Decis Mak* 13, 132. <https://doi.org/10.1186/1472-6947-13-132>.

Boyle, J., Jessup, M., Crilly, J., Green, D., Lind, J., Wallis, M., et al., 2012. Predicting emergency department admissions. *Emerg. Med. J.* 29 (5), 358–365. <https://doi.org/10.1136/emj.2010.103531>.

Breitner, S., Wolf, K., Devlin, R.B., Diaz-Sanchez, D., Peters, A., Schneider, A., 2014. 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.048>.

Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., et al., 2012. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int. J. Biometeorol.* 56 (3), 481–494. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>.

Calegari, R., Fogliatto, F.S., Lucini, F.R., Neyeloff, J., Kuchenbecker, R.S., Schaun, B.D., 2016. Forecasting daily volume and acuity of patients in the emergency department. *Comput Math Methods Med* 2016, 3863268. <https://doi.org/10.1155/2016/3863268>.

Carvalho-Silva, M., Monteiro, M.T.T., de Sá-Soares, F., Dória-Nóbrega, S., 2018. Assessment of forecasting models for patients arrival at Emergency Department. *Operations Research for Health Care* 18, 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2017.05.001>.

Castner, J., Yin, Y., Loomis, D., Hewner, S., 2016. Medical Mondays: ED utilization for Medicaid recipients depends on the day of the week, season, and holidays. *J. Emerg. Nurs.* 42 (4), 317–324. <https://doi.org/10.1016/j.jen.2015.12.010>.

Chen, T.-H., Du, X.L., Chan, W., Zhang, K., 2019. Impacts of cold weather on emergency hospital admission in Texas, 2004–2013. *Environ. Res.* 169, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.10.031>.

Coren, S., 1996. Daylight savings time and traffic accidents. *N. Engl. J. Med.* 334 (14), 924. <https://doi.org/10.1056/NEJM19960403341416>.

Drayna, P., McLellan, S.L., Simpson, P., Li, S.-H., Gorelick, M.H., 2010. Association between rainfall and pediatric emergency department visits for acute gastrointestinal illness. *Environ. Health Perspect.* 118 (10), 1439–1443. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901671>.

Duwalage, K.I., Burkett, E., White, G., Wong, A., Thompson, M.H., 2020. Forecasting daily counts of patient presentations in Australian emergency departments using statistical models with time-varying predictors. *Emerg Med Australas.* <https://doi.org/10.1111/1742-6723.13481>.

Erbas, B., Akram, M., Dharmage, S.C., Tham, R., Dennekamp, M., Newbigin, E., et al., 2012. The role of seasonal grass pollen on childhood asthma emergency department presentations. *Clin. Exp. Allergy* 42 (5), 799–805. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.2012.03995.x>.

Faryar, K.A., 2013. *The Effects of Weekday, Season, Federal Holidays, and Severe Weather Conditions on Emergency Department Volume in Montgomery County, Ohio*.

Feng, W., Li, H., Wang, S., van Halm-Lutterodt, N., An, J., Liu, Y., et al., 2019. Short-term PM<sub>10</sub> and emergency department admissions for selective cardiovascular and respiratory diseases in Beijing, China. *Sci. Total Environ.* 657, 213–221. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.066>.

Ferrari, U., Exner, T., Wanka, E.R., Bergemann, C., Meyer-Arneck, J., Hildenbrand, B., et al., 2012. Influence of air pressure, humidity, solar radiation, temperature, and wind speed on ambulatory visits due to chronic obstructive pulmonary disease in Bavaria, Germany. *Int. J. Biometeorol.* 56 (1), 137–143. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0405-x>.

Gabriel, K.M.A., Endlicher, W.R., 2011. Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environ. Pollut.* 159 (8–9), 2044–2050. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.016>.

Greven, F.E., Vonk, J.M., Fischer, P., Duijm, F., Vink, N.M., Brunekreef, B., 2019. Air pollution during new year's fireworks and daily mortality in the Netherlands. *Sci. Rep.* 9 (1), 5735. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42080-6>.

Hertel, S., Le Tertre, A., Jöckel, K.-H., Hoffmann, B., 2009. Quantification of the heat wave effect on cause-specific mortality in Essen, Germany. *Eur. J. Epidemiol.* 24 (8), 407–414. <https://doi.org/10.1007/s10654-009-9359-2>.

Hondula, D.M., Barnett, A.G., 2014. Heat-related morbidity in Brisbane, Australia: spatial variation and area-level predictors. *Environ. Health Perspect.* 122 (8), 831–836. <https://doi.org/10.1289/ehp.1307496>.

Jilani, T., Housley, G., Figueredo, G., Tang, P.-S., Hatton, J., Shaw, D., 2019. Short and long term predictions of hospital emergency department attendances. *Int. J. Med. Inform.* 129, 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2019.05.011>.

Kim, S.-Y., Peel, J.L., Hannigan, M.P., Dutton, S.J., Sheppard, L., Clark, M.L., et al., 2012. The temporal lag structure of short-term associations of fine particulate matter chemical constituents and cardiovascular and respiratory hospitalizations. *Environ. Health Perspect.* 120 (8), 1094–1099. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104721>.

Kingsley, S.L., Eliot, M.N., Gold, J., Vanderslice, R.R., Wellenius, G.A., 2016. Current and projected heat-related morbidity and mortality in Rhode Island. *Environ. Health Perspect.* 124 (4), 460–467. <https://doi.org/10.1289/ehp.1408826>.

Klug, M., Barash, Y., Bechler, S., Resheff, Y.S., Tron, T., Ironi, A., et al., 2020. A gradient boosting machine learning model for predicting early mortality in the emergency department triage: devising a nine-point triage score. *J. Gen. Intern. Med.* 35 (1), 220–227. <https://doi.org/10.1007/s11606-019-05512-7>.

Krzyzanowski, M., Cohen, A., 2008. Update of WHO air quality guidelines. *Air Qual. Atmos. Health* 1 (1), 7–13. <https://doi.org/10.1007/s11869-008-0008-9>.

Lee, H.J., Jin, M.H., Lee, J.H., 2016. The association of weather on pediatric emergency department visits in Changwon, Korea (2005–2014). *Sci. Total Environ.* 551–552, 699–705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.015>.

Lindauer, M., Schmid, H.P., Grote, R., Steinbrecher, R., Mauder, M., Wolpert, B., 2017. A simple new model for incoming solar radiation dependent only on screen-level relative humidity. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 56 (7), 1817–1825. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0085.1>.

Lindenberg, L.M., Ackermann, H., Parzeller, M., 2019. The controversial debate about daylight saving time (DST)-results of a retrospective forensic autopsy study in Frankfurt/Main (Germany) over 10 years (2006–2015). *Int. J. Legal Med.* 133 (4), 1259–1265. <https://doi.org/10.1007/s00414-018-1960-z>.

Lippmann, S.J., Fuhrmann, C.M., Waller, A.E., Richardson, D.B., 2013. Ambient temperature and emergency department visits for heat-related illness in North Carolina, 2007–2008. *Environ. Res.* 124, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2013.03.009>.

van Loenhout, J.A.F., Delbiso, T.D., Kirilouk, A., Rodriguez-Llanes, J.M., Segers, J., Guha-Sapir, D., 2018. Heat and emergency room admissions in the Netherlands. *BMC Public Health* 18 (1), 108. <https://doi.org/10.1186/s12889-017-5021-1>.

Lowe, R., Ballester, J., Creswick, J., Robine, J.-M., Herrmann, F.R., Rodó, X., 2015. Evaluating the performance of a climate-driven mortality model during heat waves and cold spells in Europe. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 12 (2), 1279–1294. <https://doi.org/10.3390/ijerph120201279>.

Luginaah, I.N., Fung, K.Y., Gorey, K.M., Webster, G., Wills, C., 2005. Association of ambient air pollution with respiratory hospitalization in a government-designated "area of

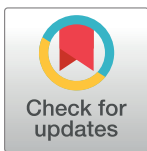
- concern": the case of Windsor, Ontario. *Environ. Health Perspect.* 113 (3), 290–296. <https://doi.org/10.1289/ehp.7300>.
- Malig, B.J., Wu, X.M., Guirguis, K., Gershunov, A., Basu, R., 2019. Associations between ambient temperature and hepatobiliary and renal hospitalizations in California, 1999 to 2009. *Environ. Res.* 177, 108566. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108566>.
- Marcilio, I., Hajat, S., Gouveia, N., 2013. Forecasting daily emergency department visits using calendar variables and ambient temperature readings. *Acad. Emerg. Med.* 20 (8), 769–777. <https://doi.org/10.1111/acem.12182>.
- Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H., 2007. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. *Int. J. Biometeorol.* 51 (4), 323–334. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0061-8>.
- McAllan, F.J., Egerton-Warburton, D., O'Reilly, G., Weiland, T.J., Jelinek, G.A., 2019. Planning for the future: Modelling daily emergency department presentations in an Australian capital city. *Emerg Med Australas* 31 (5), 750–755. <https://doi.org/10.1111/1742-6723.13245>.
- Merrifield, A., Schindeler, S., Jalaludin, B., Smith, W., 2013. Health effects of the September 2009 dust storm in Sydney, Australia: did emergency department visits and hospital admissions increase? *Environ. Health* 12, 32. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-12-32>.
- Min, M., Shi, T., Ye, P., Wang, Y., Yao, Z., Tian, S., et al., 2019. Effect of apparent temperature on daily emergency admissions for mental and behavioral disorders in Yancheng, China: a time-series study. *Environ. Health* 18 (1), 98. <https://doi.org/10.1186/s12940-019-0543-x>.
- Onozuka, D., Hagihara, A., 2017. Within-summer variation in out-of-hospital cardiac arrest due to extremely long sunshine duration. *Int. J. Cardiol.* 231, 120–124. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2016.12.179>.
- Ostro, B., Roth, L., Malig, B., Marty, M., 2009. The effects of fine particle components on respiratory hospital admissions in children. *Environ. Health Perspect.* 117 (3), 475–480. <https://doi.org/10.1289/ehp.11848>.
- Pförringer, D., Breu, M., Crönlein, M., Kolisch, R., Kanz, K.-G., 2018. Closure simulation for reduction of emergency patient diversion: a discrete agent-based simulation approach to minimizing ambulance diversion. *Eur. J. Med. Res.* 23 (1), 32. <https://doi.org/10.1186/s40001-018-0330-0>.
- Salway, R.J., Valenzuela, R., Shoenberger, J.M., Mallon, W.K., Viccellio, A., 2017. Emergency department (ED) overcrowding: evidence-based answers to frequently asked questions. *Revista Médica Clínica Las Condes* 28 (2), 213–219. <https://doi.org/10.1016/j.rmcl.2017.04.008>.
- Schaffer, A., Muscatello, D., Broome, R., Corbett, S., Smith, W., 2012. Emergency department visits, ambulance calls, and mortality associated with an exceptional heat wave in Sydney, Australia, 2011: a time-series analysis. *Environ. Health* 11 (1), 3. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-11-3>.
- Schär, C., Vidale, P.L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M.A., et al., 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427 (6972), 332–336. <https://doi.org/10.1038/nature02300>.
- Scholliers, A., Gogaert, S., de Fré, D., D'haese, I., Vanduycke, C., 2019. Happy new year! Do new year's eve festivities influence the workload of the Emergency Department of an urban hospital? *Prehosp. Disaster med.* 34 (s1), s133–s134. <https://doi.org/10.1017/S1049023X19002929>.
- Seneviratne, S., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C., Kanae, S., Kossin, J., et al., 2012. Changes in Climate Extremes and their Impacts on the Natural Physical Environment. *Changes in Climate Extremes and their Impacts on the Natural Physical Environment*.
- Serra López, V.M., Cheema, A.N., Gray, B.L., Pirruccio, K., Kazmers, N.H., 2020. Epidemiology of fireworks-related injuries to the upper extremity in the United States from 2011 to 2017. *Journal of Hand Surgery Global Online* 2 (3), 117–120. <https://doi.org/10.1016/j.jhsg.2020.03.003>.
- Shiue, I., Perkins, D.R., Bearman, N., 2016. Hospital admissions of hypertension, angina, myocardial infarction and ischemic heart disease peaked at physiologically equivalent temperature 0 °C in Germany in 2009–2011. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 23 (1), 298–306. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5224-x>.
- Singh, A.K., Srivastava, A., 2020. The impact of fireworks emissions on air quality in Delhi, India. *Environmental Claims Journal*, 1–21. <https://doi.org/10.1080/10406026.2020.1756078>.
- Smith K, Woodward A, Campbell-Lendrum D, Chadee D, Honda Y, Liu Q, et al. 2014. Human health: impacts, adaptation, and co-benefits. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [place unknown]: Cambridge University Press, 709–754.
- Steul, K., Jung, H.-G., Heudorf, U., 2019. Hitzeassoziierte Morbidität: surveillance in Echtzeit mittels rettungsdienstlicher Daten aus dem Interdisziplinären Versorgungsnachweis (IVENA) [heat-related morbidity: real-time surveillance via rescue service operations data from the interdisciplinary care capacity proof system (IVENA)]. *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz* 62 (5), 589–598. <https://doi.org/10.1007/s00103-019-02938-6>.
- Stieb, D.M., Burnett, R.T., Beveridge, R.C., Brook, J.R., 1996. Association between ozone and asthma emergency department visits in Saint John, New Brunswick, Canada. *Environ. Health Perspect.* 104 (12), 1354–1360. <https://doi.org/10.1289/ehp.961041354>.
- Szyszkowicz, M., Rowe, B.H., Brook, R.D., 2012. Even low levels of ambient air pollutants are associated with increased emergency department visits for hypertension. *Can J Cardiol* 28 (3), 360–366. <https://doi.org/10.1016/j.cjca.2011.06.011>.
- The World Bank Group. 2020. Fertility rate, total (births per woman) - Germany | Data. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.DYN.TFRF.IN?end=2018&locations=DE&start=1970&view=chart>. Accessed 2020 Jun 11.
- Vaneckova, P., Bambrick, H., 2013. Cause-specific hospital admissions on hot days in Sydney, Australia. *PLoS One* 8 (2), e55459. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0055459>.
- Wang, Y.-C., Lin, Y.-K., 2014. Association between temperature and emergency room visits for cardiorespiratory diseases, metabolic syndrome-related diseases, and accidents in metropolitan Taipei. *PLoS One* 9 (6), e99599. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099599>.
- Wargon, M., Guidet, B., Hoang, T.D., Hejblum, G., 2009. A systematic review of models for forecasting the number of emergency department visits. *Emerg. Med. J.* 26 (6), 395–399. <https://doi.org/10.1136/emj.2008.062380>.
- Wargon, M., Casalino, E., Guidet, B., 2010. From model to forecasting: a multicenter study in emergency departments. *Acad. Emerg. Med.* 17 (9), 970–978. <https://doi.org/10.1111/j.1553-2712.2010.00847.x>.
- Wargon, M., Brun-Ney, D., Beaujouan, L., Casalino, E., 2018. No more winter crisis? Forecasting daily bed requirements for emergency department admissions to hospital. *Eur J Emerg Med* 25 (4), 250–256. <https://doi.org/10.1097/MEJ.0000000000000451>.
- Deutscher Wetterdienst. 2020. Climate Data Center. [ftp://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/](ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/). Accessed 2020 Jun 4.
- Winquist, A., Grundstein, A., Chang, H.H., Hess, J., Sarnat, S.E., 2016. Warm season temperatures and emergency department visits in Atlanta, Georgia. *Environ. Res.* 147, 314–323. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.02.022>.
- Wong, C.-M., Atkinson, R.W., Anderson, H.R., Hedley, A.J., Ma, S., Chau, P.Y.-K., et al., 2002. A tale of two cities: effects of air pollution on hospital admissions in Hong Kong and London compared. *Environ. Health Perspect.* 110 (1), 67–77. <https://doi.org/10.1289/ehp.0211067>.
- World Health Organization, et al. 2003. Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide: report on a WHO working group, Bonn, Germany 13–15 January 2003. [place unknown]: Copenhagen: WHO Regional Office for Europe. Accessed.
- Zhou, M.G., Wang, L.J., Liu, T., Zhang, Y.H., Lin, H.L., Luo, Y., et al., 2014. Health impact of the 2008 cold spell on mortality in subtropical China: the climate and health impact national assessment study (CHINAS). *Environ. Health* 13, 60. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-13-60>.

## RESEARCH ARTICLE

# Universal thermal climate index associations with mortality, hospital admissions, and road accidents in Bavaria

Wael Ghada<sup>1\*</sup>, Nicole Estrella<sup>1</sup>, Donna P. Ankerst<sup>1,2</sup>, Annette Menzel<sup>1,3</sup>

**1** Department of Life Science Systems, Technical University of Munich, Freising, Germany, **2** Department of Mathematics, Technical University of Munich, Garching, Germany, **3** Institute for Advanced Study, Technical University of Munich, Garching, Germany

\* [ghada@wzw.tum.de](mailto:ghada@wzw.tum.de)

## Abstract

When meteorological conditions deviate from the optimal range for human well-being, the risks of illness, injury, and death increase, and such impacts are feared in particular with more frequent and intense extreme weather conditions resulting from climate change. Thermal indices, such as the universal thermal climate index (UTCI), can better assess human weather-related stresses by integrating multiple weather components. This paper quantifies and compares the seasonal and spatial association of UTCI with mortality, morbidity, and road accidents in the federal state of Bavaria, Germany. Linear regression was applied to seasonally associate daily 56 million hospital admissions and 2.5 million death counts (1995–2015) as well as approximately 930,000 road accidents and 1.7 million people injured (2002–2015) with spatially interpolated same day- and lagged- (up to 14 days) average UTCI values. Additional linear regressions were performed stratifying by age, gender, region, and district. UTCI effects were clear in all three health outcomes studied: Increased UTCI resulted in immediate (1–2 days) rises in morbidity and even more strongly in mortality in summer, and lagged (up to 14 days) decreases in fall, winter, and spring. The strongest UTCI effects were found for road accidents where increasing UTCI led to immediate decreases in daily road accidents in winter but pronounced increases in all other seasons. Differences in UTCI effects were observed e.g. between in warmer north-western regions (Franconia, more districts with heat stress-related mortality, but hospital admissions for lung, heart and external reasons decreasing with summer heat stress), the touristic alpine regions in the south (immediate effect of increasing UTCI on road accidents in summer), and the colder south-eastern regions (increasing hospital admissions for lung, heart and external reasons in winter with UTCI). Districts with high percentages of elderly suffered from higher morbidity and mortality, particularly in winter. The influences of UTCI as well as the spatial and temporal patterns of this influence call for improved infrastructure planning and resource allocation in the health sector.

## OPEN ACCESS

**Citation:** Ghada W, Estrella N, Ankerst DP, Menzel A (2021) Universal thermal climate index associations with mortality, hospital admissions, and road accidents in Bavaria. PLoS ONE 16(11): e0259086. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259086>

**Editor:** Maite deCastro, University of Vigo, SPAIN

**Received:** April 29, 2021

**Accepted:** October 13, 2021

**Published:** November 17, 2021

**Copyright:** © 2021 Ghada et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

**Data Availability Statement:** The data used in our study are from the “Research Data Centers of the Federal Statistical Office and the Statistical Offices of the Federal States” (RDC) which can be regarded as a third-party “non-commercial, state-owned” organization. Access to the data is granted after an application referring to conditions under which data are provided for scientific purposes. For this, direct contact is required through the website <https://www.forschungsdatenzentrum.de/en/contact>.

## Introduction

Climate change is altering the frequency, intensity, spatial extent, duration, and timing of extremes [1]. This affects morbidity, particularly among vulnerable populations [2], and

**Funding:** This study was conducted in the WIKLIGE network as part of the joint project “Climate Change and Health”, funded by the Bavarian State Ministry of the Environment and Consumer Protection as well as the Bavarian State Ministry of Health and Care (K3-8503-PN 18-18-D14187/2018). The funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

**Competing interests:** The authors have declared that no competing interests exist.

extends to mortality and road accidents. Losses will intensify in absence of climate change adaptation and mitigation practices [3].

Among climate variables, air temperature remains the most studied predictor of morbidity. Higher temperatures were related to more emergency cases in summer [4], more nervous, circulatory and respiratory diseases [5], strokes [6], trauma [7–10], injuries [11, 12], and preterm births [13]. Heatwave days witnessed more emergency department admissions and higher mortality [14] due to heat strokes, sunstrokes, and fluid disorders [15]. Mortality rates increased on hot days [16], rapidly per degree above thresholds [17] and injury-related mortality increased with temperature in the US [18]. The reduction of mortality after heat-related mortality peaks, the so-called “harvesting effect”, disappeared in cases of extreme heat [16]. On the other hand, cold increased respiratory and circulatory diseases [5] as well as unintentional injuries [11] and led to high mortality levels in France [16]. Mortality due to cold spells was especially high among elderly, respiratory patients, and the less educated [19]. Consequently, temperature influences on morbidity and mortality differ between cold and warm seasons. More trauma patients, a higher proportion of young patients [20], and more orthopedic trauma consultation [10] occurred in summer than in winter in the US and the UK. Wider diurnal temperature ranges in cold seasons were associated with more patients with chronic respiratory diseases, but less in hot seasons [21]. Most interestingly exposure to heat in warm seasons had no impact on hospital admissions for cardiovascular and respiratory reasons in Spanish cities but was associated with higher mortality risks. In contrast, cold exposure was associated with more hospitalization, but lower mortality risks due to cardiovascular and respiratory reasons during cold seasons [22]. Thus, it is necessary to consider seasonal variations to understand the impact of weather conditions for health services [23]. In addition to temperature, other meteorological parameters for predicting morbidity and mortality are solar radiation, humidity, wind speed, precipitation, and foehn [4, 6, 8, 24, 25]. Following extreme weather events, there is an increased demand for emergency services and an increased mortality risk [2, 26]. Road accidents as well as associated injuries and fatalities have been influenced by both high and low temperatures [27–30], precipitation [31, 32], sunshine and wind speed [33], as well as by sandstorms [34]. Higher intensity of weather conditions increased road accidents [30, 35], particularly when temperatures were below freezing in Germany [36].

Thermal indices provide an excellent way to predict the demand for medical services due to adverse weather conditions more efficiently than direct weather variables [37, 38]. Indices, such as the Universal Thermal Climate Index (UTCI), have been recommended as physiologically relevant indices for biometeorology and climate impact studies [39]. UTCI better represented the physiological response of the human body, and was more sensitive to heat stress changes than other thermal indices [40]. Consequently, UTCI has been proposed as a basis for constructing heat warning systems [41], leading to assessments of its spatial and temporal variation [42–44]. An increase in UTCI has been observed for Europe over the last decade, with the south being more prone to heat stress than the north [45].

Various correlations between UTCI and morbidity/mortality have been addressed in recent studies. UTCI performed well in estimating the occupational heat stress in mines in Iran [46], the intensity of summer excess mortality in the Czech Republic [47], as well as in Europe, particularly in France during the heatwave of summer 2003 [45]. The impact of UTCI on mortality varied between warm and cold regions in Poland [48] and between rural and urban areas in the Czech Republic [37].

Within Germany, Bavaria is expected to suffer an increase in mortality rate due to climate change and population aging [49]. Temperature extremes induced higher mortality rates among the elderly [50] and higher cardiovascular mortality [51]. Also, ambulance activity in Munich was affected by temperature, humidity, sunshine, and precipitation [4], and severe

trauma by foehn winds [25]. However, the influence of weather conditions on traffic accidents has not yet been studied at all. To the best of our knowledge, there have been no studies addressing and comparing the UTCI associations with mortality, morbidity, and traffic accidents.

We hypothesize that the influence of heat stress as assessed by UTCI on both morbidity and road accidents is comparable to the established influence of heat stress on mortality across seasons. We expect the spatial variation in these effects to be related to population characteristics. Therefore, the following questions are addressed (1) How do mortality, morbidity, and road accidents respond to variation in UTCI? (2) Does such an influence differ with seasons, age, sex, and regions within Bavaria?

By combining daily UTCI averages and daily counts of hospital admissions, death cases, and traffic accidents, this report quantifies the impact of UTCI on the population of Bavaria in order to mitigate severe impacts of weather extremes, improve the resilience and preparedness of health care systems, and reduce casualties.

## Materials and methods

### Morbidity, mortality, and road accidents

Bavarian hospital admissions and mortalities for the period 1995–2015 as well as road accidents for 2002–2015 were provided after anonymization by the Research Data Centers of the Federal Statistical Office and the Statistical Offices of the Federal States [52–54]. Access to this data and can be arranged through their website after strict procedures for ethical and privacy-related reasons. For further details <https://www.forschungsdatenzentrum.de/en/request>. Hospital admissions and mortality data comprised date, age, sex, and ICD-10 code, while the road accidents data included the number of people involved in each accident. A total of 56,028,368 hospital admissions, 2,557,651 mortalities, and 930,861 road accidents involving 1,753,980 injured persons were aggregated for this study (see Table 1). The three datasets may partially overlap; however, it is not possible to identify the overlapping cases. The daily counts of hospital admissions were itemized by sex, age (child: <18, adult: 18–70, senior: >70), diagnoses (heart, lungs, external), and death. Similarly, daily mortality counts were itemized by sex, age, and diagnoses. “External” here refers to injuries due to external causes such as falling, machinery, or fire.

It is important to note the spatial variation of population and age structure among Bavarian regions and districts (Fig 1 and S1 Fig). Therefore, the daily counts were calculated for the whole of Bavaria, for its seven regions, namely Lower-Bavaria/Niederbayern (NB), Upper-Bavaria/Oberbayern (OB), Upper-Franconia/Oberfranken (OF), Upper-Palatinate/Oberpfalz (OPf), Swabia/Schwaben (Sch), Lower-Franconia/Unterfranken (UF), Middle-Franconia/Mittelfranken (MF) (see S1 Table), and for its 96 districts (i.e. Landkreise) (Fig 2).

### UTCI

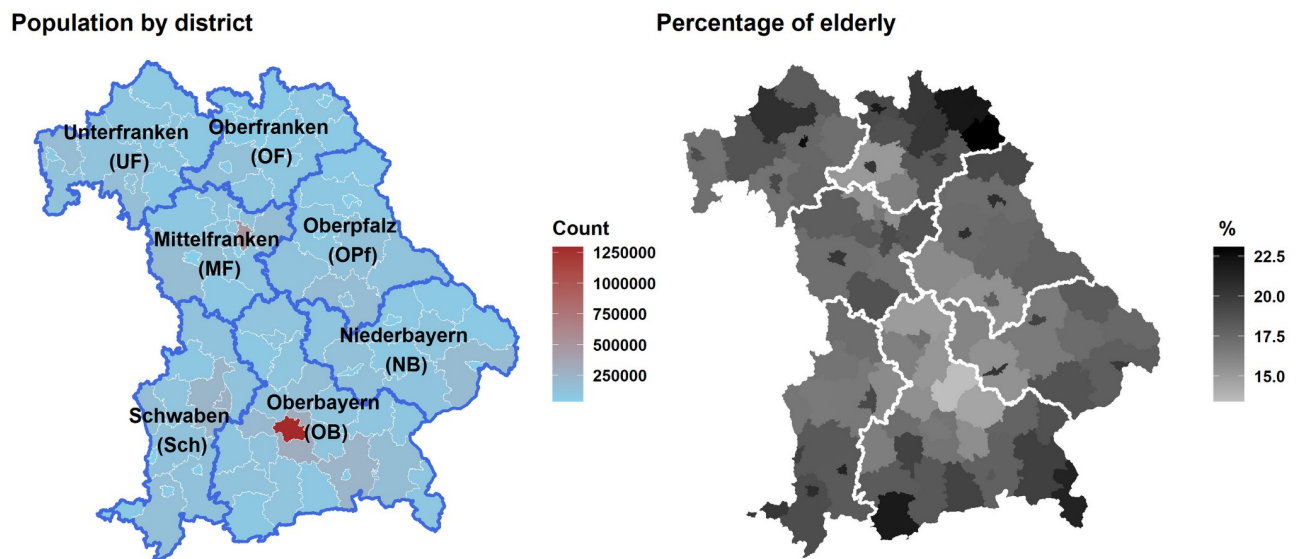
To determine the UTCI, the meteorological variables solar radiation, relative humidity, wind speed, and air temperature are required [56]. The German Meteorological Service (DWD) [57] provided hourly measurements for 44 stations throughout Bavaria between 1995–2015. To obtain precise UTCI values, detailed information on topography, human activities, and clothing in a physiological model is required. Since this information is not available, hourly UTCI values at individual stations were approximated by 6<sup>th</sup> order polynomial regression functions [58]. Daily grids of UTCI at 200m resolution were then produced based on the daily averaged values of UTCI and integrated nested Laplace approximation (INLA) models [59]. From this analysis, mean daily UTCI values were extracted for Bavaria, each region, and district (Fig 2).

Table 1. Total and average daily hospital admissions, mortality, and road accidents in Bavaria by season as well as by subgroups and regions.

VARIABLE	TOTAL COUNT	%	DAILY AVERAGE							
			Winter	Sd*	Spring	Sd	Summer	Sd	Fall	Sd
<b>Hospital admissions (1995–2015)</b>										
<b>Total</b>	<b>56028368</b>	<b>100</b>	<b>7019.1</b>	3143.5	<b>7501.8</b>	2878.6	<b>7301.6</b>	2578.8	<b>7392.4</b>	2670.6
<b>By subgroup</b>										
Female	30062529	53.7	3752.2	1629.1	4040.4	1496.5	3903.9	1327.6	3978.9	1383
Male	25965546	46.3	3266.9	1523.0	3461.4	1389.9	3397.7	1258.3	3413.4	1296.4
Adult	32776409	58.5	4151.2	1955.4	4360.8	1801.3	4242.9	1571.5	4336.8	1676.2
Child	6092564	10.9	764.8	237.3	828.1	219.7	821.0	207.1	762.5	187.2
Senior	17158985	30.6	2103.1	1055.2	2312.9	966.2	2237.7	895.8	2293	914.9
Heart	1961849	3.5	248.3	487.9	268.9	510.5	244.2	464.0	261.7	499.9
Lungs	809849	1.4	117.3	230.7	115.6	224.8	91.8	178.4	97.8	188.9
External	1407912	2.5	171.8	320.1	182.9	332	197.6	357.9	181.7	331.9
Death	1187800	2.1	156.4	51.7	161.3	38.1	149.6	33.9	152.2	33.3
<b>By Region</b>										
Niederbayern	5168521	9.2	649.4	273.6	692.1	244.8	675.9	218.0	677.6	226.8
Oberbayern	19737933	35.2	2468.2	1144.1	2643.7	1062.3	2568.7	957.0	2611.3	983.7
Oberfranken	4789391	8.5	599.8	268.2	638.1	244.4	626.2	219.3	633.2	228.4
Oberpfalz	5127236	9.2	639.4	285.7	686.2	261.8	673.0	235.5	674.8	242.0
Schwaben	7174579	12.8	910.1	386.0	961.2	347.0	928.4	310.5	941.5	322.3
Unterfranken	6179137	11.0	772.5	358.2	826.4	329.9	806.0	297.4	817.1	308.1
Mittelfranken	7851571	14.0	979.6	442.0	1054.1	403.4	1023.4	359.5	1037	373.3
<b>Mortality (1995–2015)</b>										
<b>Total</b>	<b>2557651</b>	<b>100</b>	<b>363.1</b>	33.9	<b>339.4</b>	33.6	<b>310.8</b>	26.3	<b>320.9</b>	24.4
<b>By subgroup</b>										
Female	1356942	53.1	194.6	21.5	180.8	21.1	163.3	16.4	169.2	15.6
Male	1200709	46.9	168.5	17.7	158.6	17.8	147.5	15.6	151.7	15.0
Adult	964843	37.7	132.6	17.1	127.1	15.9	121.3	15.2	122.3	14.5
Child	16039	0.6	2.1	1.6	2.1	1.6	2.1	1.5	2.0	1.5
Senior	1576769	61.6	228.4	29.6	210.1	30.1	187.5	23.9	196.6	23.3
Heart	1151134	45.0	167.2	21.7	154.4	19.4	136	15.5	143.0	16.6
Lungs	171227	6.7	27.5	8.2	24.2	7.6	18.3	4.9	19.3	5.3
External	101565	4.0	12.7	4.0	13.2	4.2	13.9	4.5	13.0	3.8
<b>By Region</b>										
Niederbayern	250326	9.8	35.4	6.8	33.1	6.3	30.6	6.0	31.5	6.0
Oberbayern	799492	31.3	113.9	13.6	105.6	13.3	96.9	11.5	100.7	11.4
Oberfranken	261829	10.2	37.0	6.9	34.9	6.6	32.0	5.9	32.8	5.8
Oberpfalz	229686	9.0	32.5	6.3	30.6	6.2	28.0	5.7	28.7	5.6
Schwaben	370202	14.5	52.9	8.2	49.2	8.2	44.6	7.1	46.4	7.2
Unterfranken	276525	10.8	39.2	7.3	36.7	7.0	33.6	6.4	34.8	6.3
Mittelfranken	369591	14.5	52.3	8.5	49.3	8.3	45.2	7.6	46.1	7.5
<b>Road accidents (2002–2015)</b>										
<b>Accidents</b>	<b>930861</b>	<b>100</b>	<b>152.4</b>	54.1	<b>174.1</b>	48.8	<b>213.0</b>	42.5	<b>188.1</b>	46.2
<b>Injured persons</b>	<b>1753980</b>	<b>100</b>	<b>286.4</b>	103.5	<b>330.2</b>	98.6	<b>395.3</b>	89.5	<b>359.3</b>	95.0

\*Sd is the standard deviation of the daily count considering the number of days in each season.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259086.t001>



**Fig 1. Population of Bavaria.** The population in each district (left panel), and the percentage of elderly/senior (right panel). All values are averaged over the study period 1995–2015 [55]. Border shapefiles were provided with written permission by the [Bundesamt für Kartographie und Geodäsie](#) under the license (CC BY 4.0).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259086.g001>

## Statistical methods

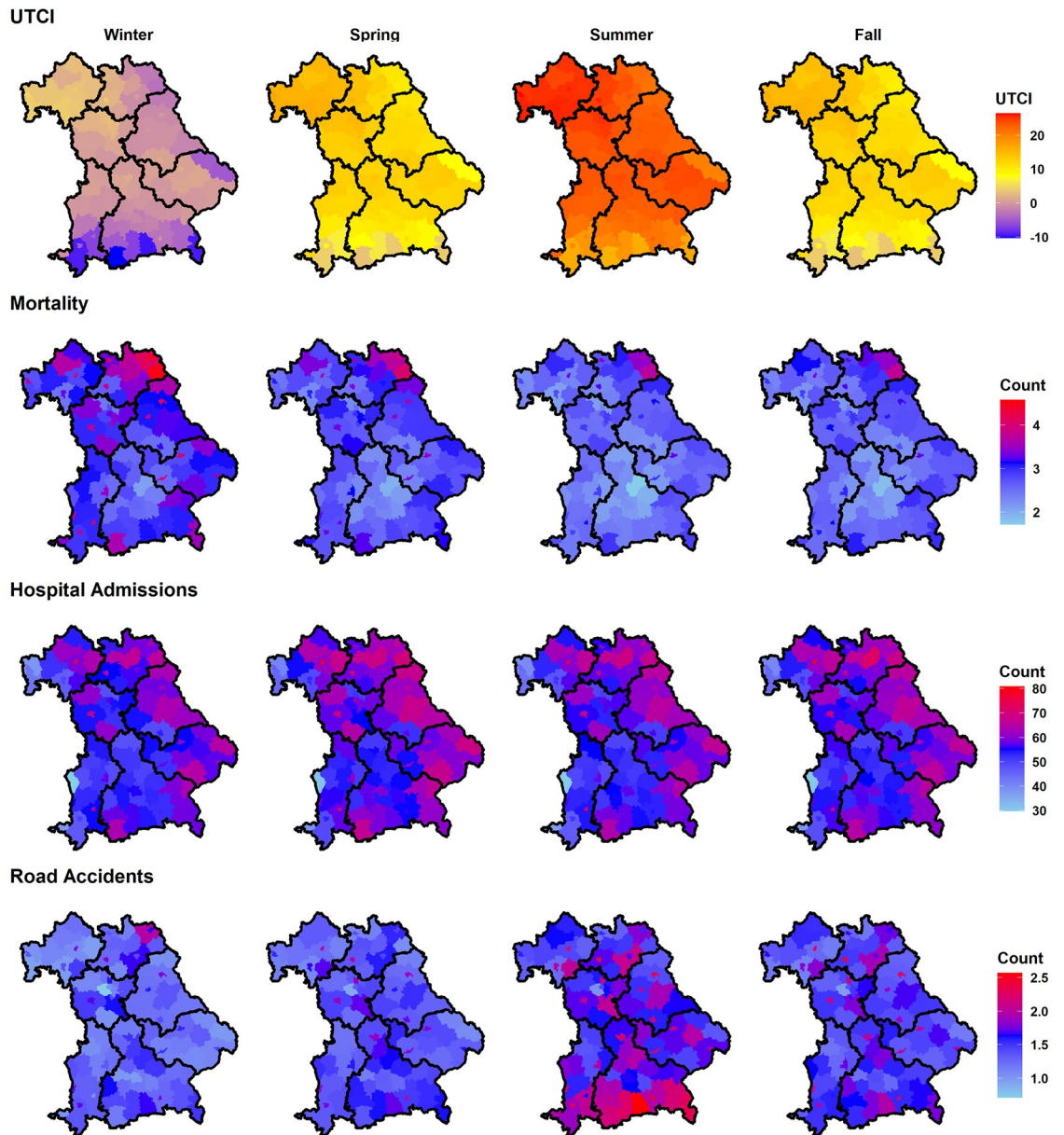
Multiple normal linear regression was used for association analyses of daily hospital admissions, death, and road accidents with UTCI, spatial and seasonal predictors. Lagged effects of UTCI up to 14 days were considered as potential predictors in a model for expected daily cases  $E(Y)$  (hospital admissions, deaths, or road accidents), which controlled for the year, official state holiday, and day of the week as shown below:

$$E(Y) = \alpha + \beta_y * y + \beta_H * H + \sum_{d=Monday}^{Saturday} \beta_d * d + \sum_{lag=0}^{lag=14} \beta_{UTCI_{lag}} * UTCI_{lag}, \quad (1)$$

where  $\alpha$  is the intercept,  $Y$  the year,  $\beta_y$  the change in  $E(Y)$  per year,  $H$  an indicator with value 1 for holidays and 0 otherwise,  $\beta_H$  the difference in counts between holidays and non-holidays,  $d$  the day of the week,  $\beta_d$  the difference in counts between day  $d$  and the reference day,  $UTCI_{lag}$  is the UTCI on lag days previously, and  $\beta_{UTCI_{lag}}$  is the change in counts for a unit increase in UTCI. Friday was chosen as the reference weekday for hospital admissions since weekdays at the start of the week may be more compromised / biased by planned surgeries or examinations. For road accidents, the choice was moved to Thursday since Mondays and Fridays witness different levels of transportation activity on the road due to weekend commuters and weekend activities. For mortality, Wednesday was chosen as the reference day at the middle of the weekdays, and to highlight the different situation compared to the weekends. Inclusion of the lagged UTCI effects as fixed effects in the model removed autocorrelation, justifying the assumption of independent errors as required for the models. Large sample sizes enabled the assumption of a Normal distribution by the central limit theorem, which was confirmed by residual Normal quantile plots.

Separate models were constructed for meteorological seasons (DJF winter, MAM spring, JJA summer, SON fall), for age, sex, and diagnosis subgroups, and for Bavaria, its seven regions, and 96 districts. The total number of analyses comprised 84 for Bavaria, 588 for regions, and 8064 for districts. Daily case numbers and UTCI varied between regions, districts, subgroups, and seasons (see also Fig 2), and hence were standardized by subtracting means and then dividing

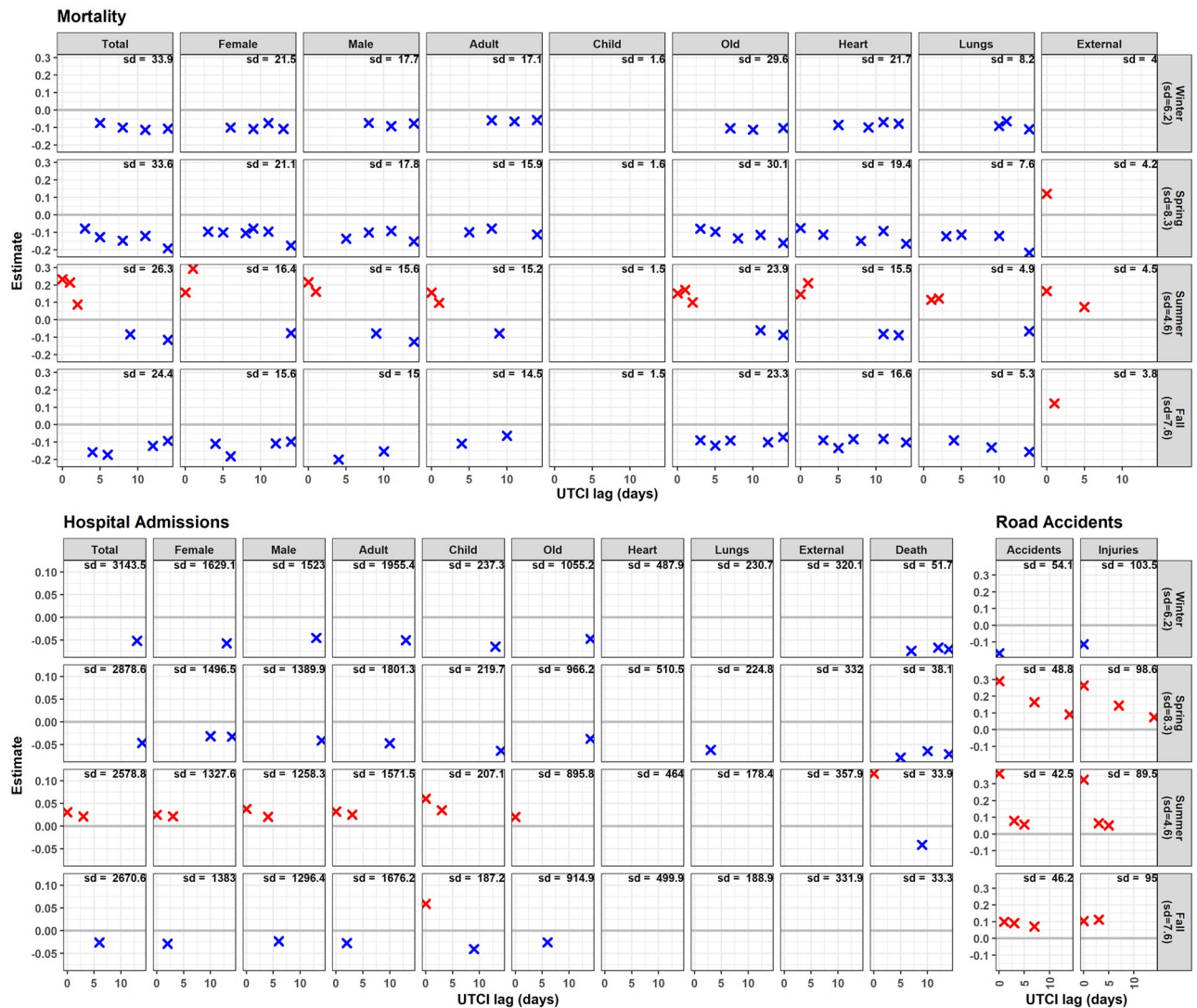




**Fig 2. Summary of the data by season and region/district.** The upper row of panels contains for each district the average UTCI value calculated for the corresponding season over the study period (1995–2015). The numbers of daily cases per 100,000 inhabitants are averaged for mortality (second row) and for hospital admissions (third row) over 1995–2015. The lower panel row represents the daily number of road accidents per 100,000 inhabitants averaged over 2002–2015. Border shapefiles were provided with written permission by the [Bundesamt für Kartographie und Geodäsie](#) under the license (CC BY 4.0).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259086.g002>

by the respective standard deviations (sd). Therefore, when interpreting the modelled effects for a target group, season, and spatial unit, the sd of the respective daily values of mortality, morbidity, and accidents has to be considered as the unit of change (see [Table 1](#)). For example, a  $\beta_{UTCI}$  value of 0.1 means that a change of one standard deviation in UTCI within a particular season and region (or district) was associated with a positive increase in the daily count of cases of the target group with a magnitude of 10% of its standard deviation in the respective season and region. Explanatory examples in each figure caption help with this calculation.



**Fig 3. UTCI effects.** UTCI effects on daily cases of mortality, hospital admissions, and road accidents for each subgroup and season in Bavaria. The horizontal axis represents the lag in days, and the vertical axis represents the effect estimate, either positive (red) or negative (blue). Crosses are lacking when the effect of UTCI was not significant for a particular lag in the corresponding model. Effect estimates are expressed in proportion of the standard deviation of daily number of cases within the corresponding subgroup (given in the upper right corner of each panel) when UTCI changes by one standard deviation of its daily value for the corresponding season. The numbers in the gray facet titles on the right are the standard deviations of UTCI within each season for the whole of Bavaria. The absence of the crosses indicates that the effect of UTCI was not significant for a particular lag in the corresponding model. Explanatory example: For winter, the UTCI sd is 6.2°C, the hospital admissions sd is 3143.5, and the estimated UTCI effect is -0.0513. This indicates a decrease in daily hospital admissions in Bavaria by  $-0.0513 \times 3143.5 = 161$  when the value of UTCI increases by 6.2°C.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259086.g003>

The set of predictors for each model was chosen by minimization of the Bayesian Information Criterion (BIC). Variance inflation factor values were mostly below 2 indicating low multicollinearity in the final models. All computations were performed in the R statistical software package (version 4.0.3) and all comparisons were tested at the two-sided 0.05 level of significance.

## Results

### Seasonal UTCI effects on daily morbidity, mortality, and road accidents

In summer, higher UTCI was consistently associated with increasing daily numbers of mortality, hospital admissions, and road accidents (Fig 3). The strength of immediate UTCI effects

(lag 0), however, differed substantially per 4.6°C UTCI increase: Daily hospital admissions increased by ~ +0.04 sd, mortality by ~ 0.20 sd, and road accidents by ~ +0.40 sd. Correspondingly, the category death within hospital admissions was characterized by larger UTCI effects (0.12 sd) than total admissions (0.04 sd).

In a few other cases amplifying (positive) UTCI effects were derived for seasons other than summer, namely for road accidents in spring and fall, children hospital admissions in fall as well as mortality due to external reasons in spring and fall. Here again, the UTCI effect size in spring was larger for road accidents than for external mortality.

Model results also pointed to temporal changes in UTCI effect based on the lag structure (Fig 3). In summer, an increase in mortality occurred up to three days after the increase in UTCI, but later there was a decrease within the second week. In the other seasons, however, no immediate effect was detected, but a decreasing effect of UTCI was apparent about three days after the UTCI change which lasted up to two weeks. Nevertheless, there were two exceptions: death among children was not influenced by UTCI fluctuations, and death due to external causes increased immediately after an increase in UTCI in spring, summer, and fall.

Higher summer UTCI values caused an immediate to three days lagged increase in Bavarian daily hospital admissions, but a decrease after one week in fall and after two weeks in winter and spring. The effect was consistent among sex and age groups, except for children's hospital admissions, which increased immediately after an increase in UTCI in fall. No effect was detected on heart or external admission categories. However, lung-related admissions in spring decreased a couple of days after a UTCI increase. Remarkably, UTCI had an immediate positive effect on death within hospital admissions only in summer, and a negative lagged effect in winter, spring, and summer.

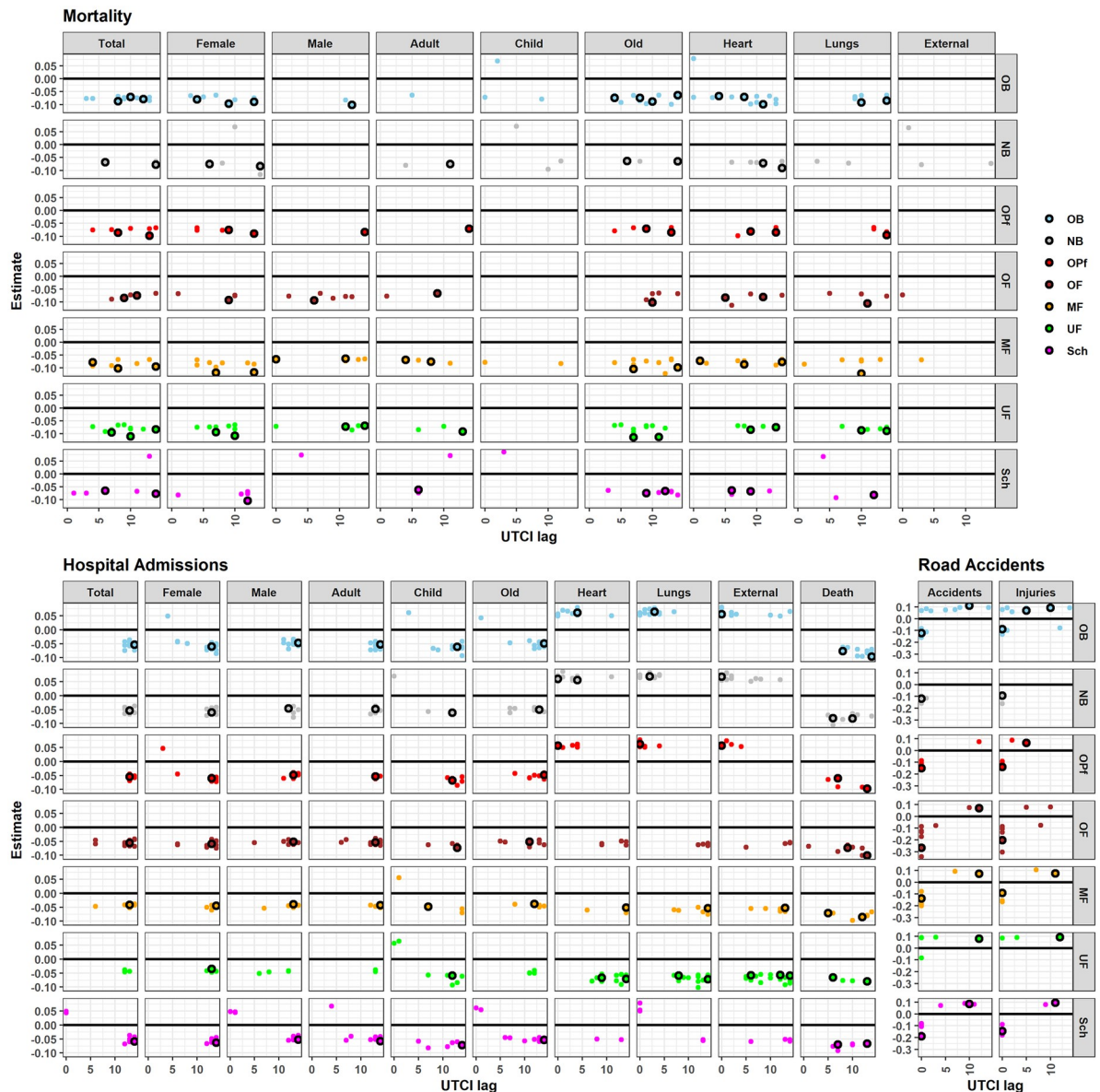
In winter, an increase in UTCI was associated with an immediate reduction in road accidents without any lagged effects. In other seasons, the association between UTCI and road accidents was always positive, very strong, and immediate in spring and summer and decreased over time up to one week in summer and fall, and up to two weeks in spring.

### Spatial variation of UTCI effects in summer and winter

To examine the spatial variability of UTCI effects on the daily cases of morbidity, mortality, and road accidents, the effect estimates were compared between regions and districts. In order to tighten the results, we only discuss the summer and winter seasons in more detail (Figs 4 and 5), the corresponding results for spring and fall are in the supplement (S2 and S3 Figs).

In winter, there were no apparent differences in the UTCI effect structure on mortality among regions and their districts (Fig 4). Concerning morbidity, increases in UTCI were associated with immediate rises in hospital admissions due to heart, lungs, and external reasons in the three south-eastern (partly higher elevated and thus colder) regions of Bavaria, namely OB, NB, and OPf, but lagged reductions in MF and UF (i.e. the warmer regions of Bavaria) and some districts of the remaining regions. Additionally, increases in UTCI led to immediate reductions in road accidents in all regions except for UF, but delayed increases in all regions except NB and OPf.

Summerly UTCI effects on mortality were more frequent in two regions of Franconia (MF, UF), the relatively warmer north-western part of Bavaria, where more districts revealed significant UTCI effects (Fig 5). Quite strikingly, summer hospital admissions due to heart, lungs, and external causes were negatively correlated with UTCI change in OF, MF, and UF for 1 to 14 days lags structures. However, no effect was detected for all other regions, except NB where admissions due to external injuries were positively correlated with UTCI change. Additionally, deaths among hospital admissions decreased in the second week after UTCI increased in NB, MF, and Sch. Road accidents strongly increased with higher UTCI in summer in OB and Sch,

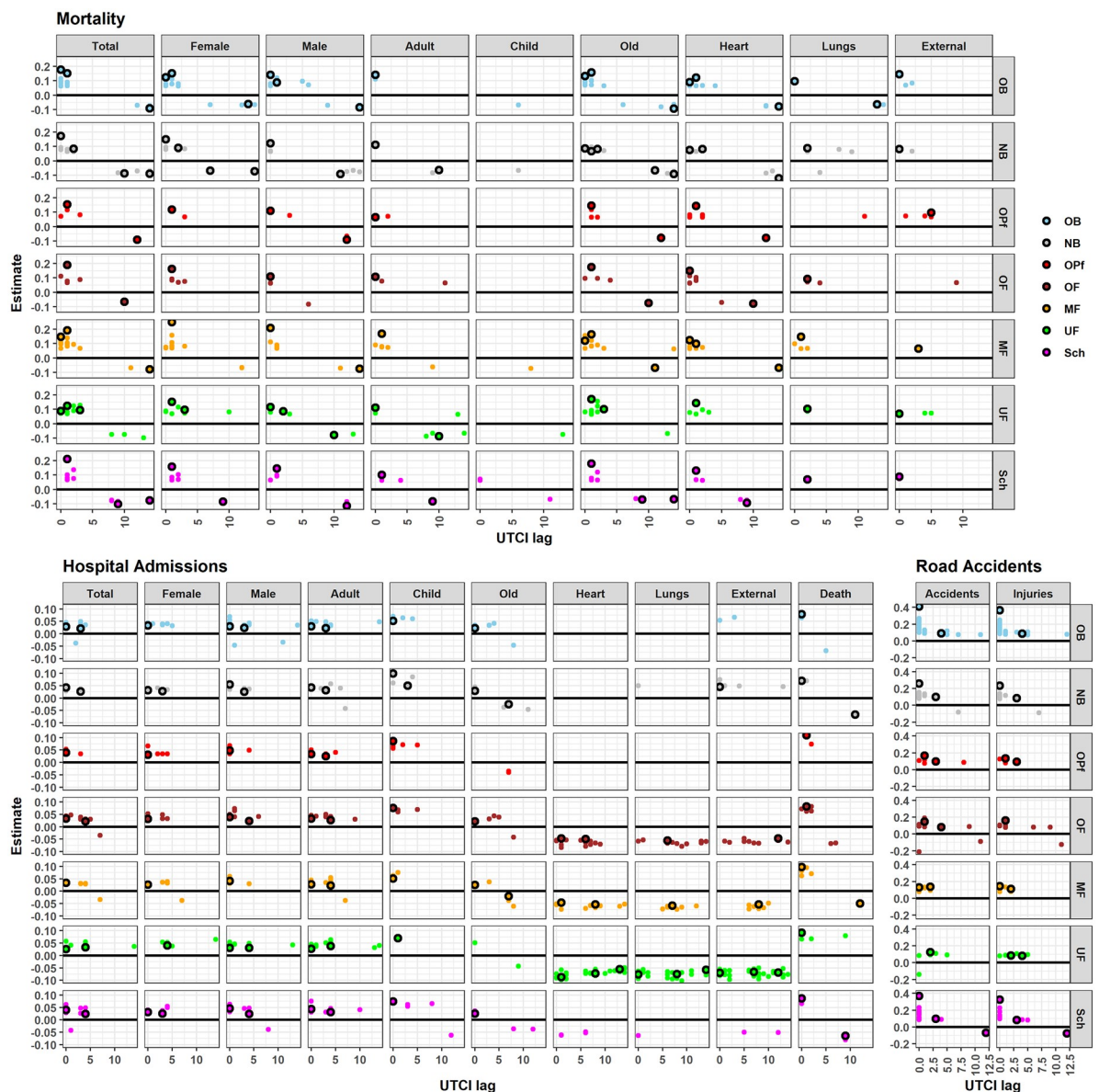


**Fig 4. Winter UTCI effect.** Winter UTCI effect on daily cases of mortality, hospital admissions, and road accidents for each subgroup and district. The horizontal axis represents the lag in days, and the vertical axis represents the effect estimate. It is expressed in proportion of the standard deviations of daily number of cases within the corresponding subgroup when UTCI changes by one standard deviation of its daily value. The black circles represent those effects for districts within the region. The colored dots represent those effects for districts within the region. The absence of points indicates that the effect of UTCI was not significant for a particular lag in the corresponding model.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259086.g004>

the two main touristic regions in the south of Bavaria comprising alpine forelands and the alpine region.

For the two transitional seasons, spring and fall, some regional patterns in UTCI were apparent: Like in summer, the immediate increase in road accidents in spring with UTCI was high in OB, NB and Sch, which could be associated with the increase in deaths due to external causes in these three regions (S2 Fig). During fall, and despite the significant effect of UTCI on hospital admissions for all age groups for Bavaria, children’s hospital admissions were not affected by UTCI in MF and UF (S3 Fig). Similarly, the elderly were not affected in NB. In contrast, while



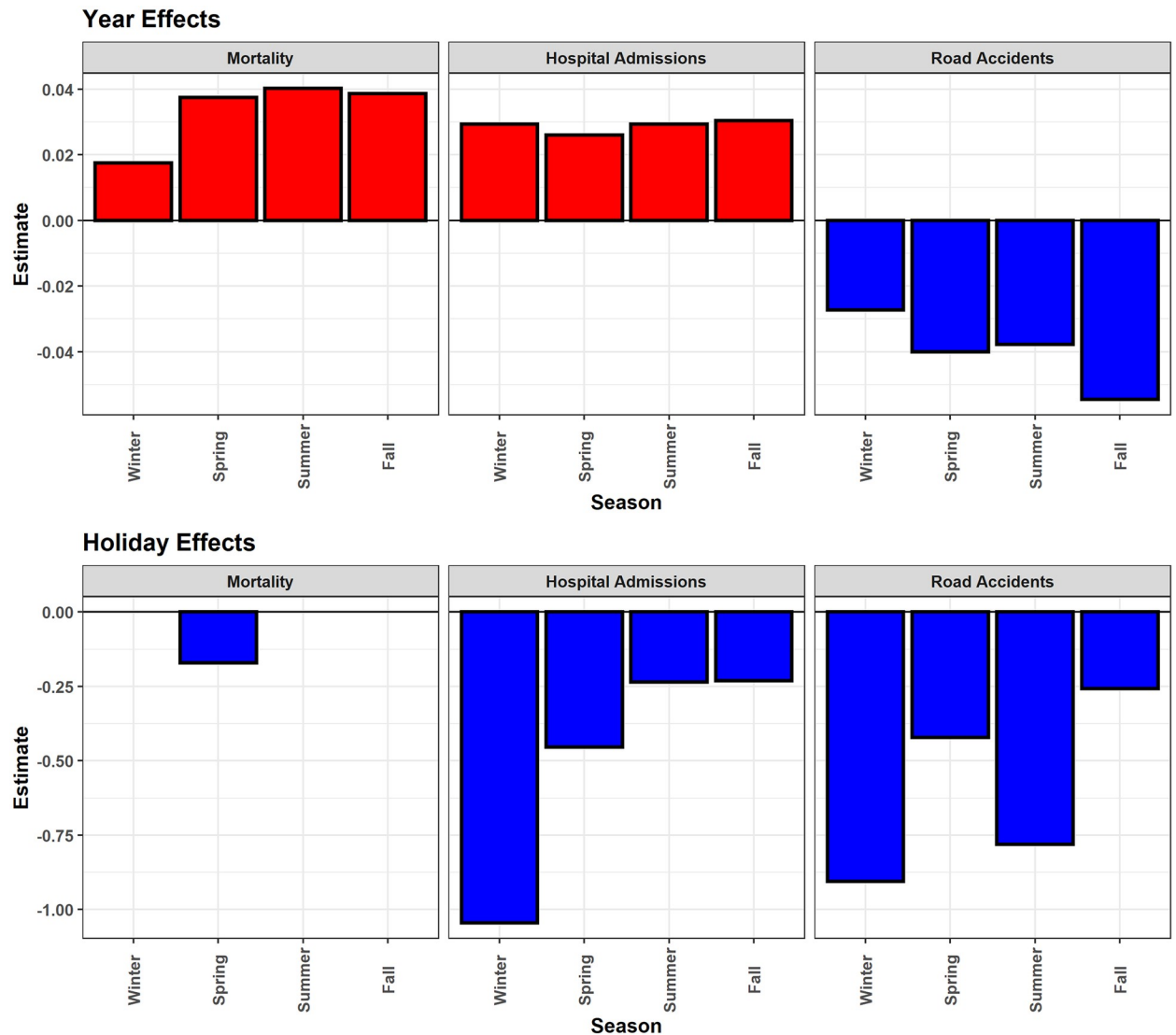
**Fig 5. Summer UTCI effect.** Summer UTCI effect on daily cases of mortality, hospital admissions, and road accidents for each subgroup and district. The horizontal axis represents the lag in days, and the vertical axis represents the effect estimate. It is expressed in proportion of the standard deviations of daily number of cases within the corresponding subgroup when UTCI changes by one standard deviation of its daily value. The black circles represent those effects for each region. The colored dots represent those effects for districts within the region. The absence of points indicates that the effect of UTCI was not significant for a particular lag in the corresponding model.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259086.g005>

UTCI had no effect on heart, lungs, or external hospital admissions, a significant negative effect appeared only in OF, MF, UF, and Sch for heart and lungs, and a positive effect for external cases in NB. The positive immediate effect of UTCI change on road accidents in Bavaria was limited to OB, NB, Sch, and reversed to a negative effect in OF and few other districts.

### Calendar effects

Daily hospital admissions and mortality increased across Bavaria during the 1995–2015 study period, while daily road accidents decreased (Fig 6). Overall, annual increases in daily hospital



**Fig 6. Year and holiday effects.** Year and holiday effects on daily mortality, hospital admissions, and road accidents for each season, expressed as a proportion of the standard deviation of the respective daily number of cases within Bavaria. The absence of a column means that the effect of the year or holiday was not significant in the corresponding model. **Explanatory example:** For winter hospital admissions, the sd is 3143.5 (see Table 1), and the year effect for Bavaria is 0.02933. This indicates an increase in daily hospital admissions by  $0.02933 \times 3143.5 = 92.2$  every year.

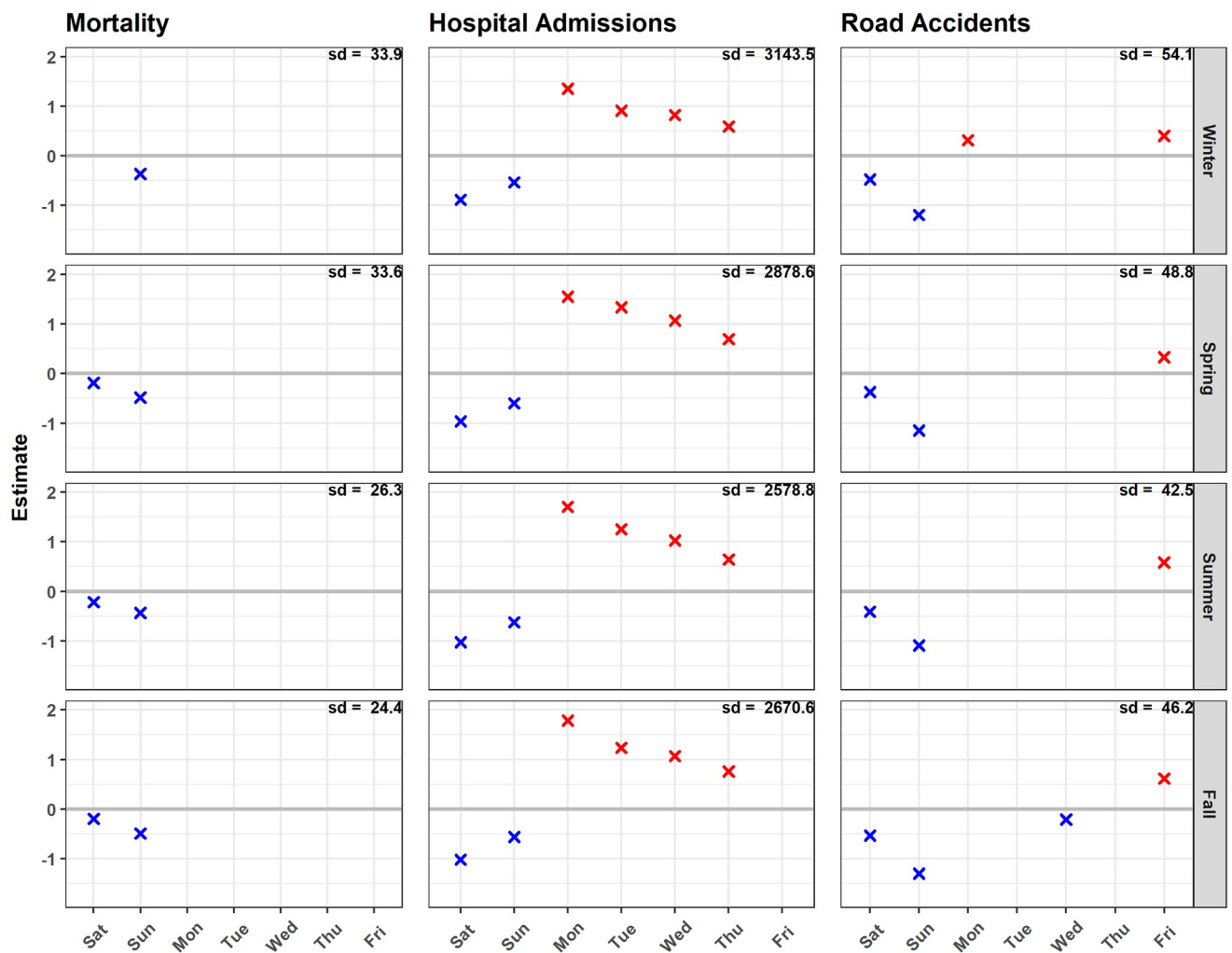
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259086.g006>

admissions ranged from 2.6% of sd in the spring to 3% in winter, corresponding to 75 and 92.2 additional daily cases per year, respectively. Total daily death counts in Bavaria increased during the study period, but not consistently across districts and for subgroups. Remarkably, the positive trend in mortality was the least in winter. While mortality increased for the elderly and for lungs cases, it decreased among adults, children, heart, and external cases (results for subgroups not shown). Daily road accidents and the resulting injuries decreased in all seasons, with the strongest decreases in fall, and the smallest decreases in winter.

Holidays significantly reduced the number of hospital admissions and road accidents but had no significant effect on deaths except in spring (Fig 6). Total daily hospital admissions were reduced especially in winter holidays (-105% of sd), followed by spring (-45% sd) and the reducing effect was smallest in summer and fall (-23% sd). The effect on children having

school holidays was comparably high during summer (-42%), but lower in spring (-28%), and the least in fall (-9%). We observed only a marginal reduction of mortality during the spring holidays. Road accidents decreased during holidays by 90%, 78%, 42%, and 25% of the respective daily sds in winter, summer, spring, and fall.

Hospital admissions were the highest on Mondays, and declined until Fridays, while Saturdays and Sundays witnessed the least daily cases (Fig 7). This pattern was spatially consistent, and across sex and age groups (results for subgroups not shown). The effect size was highest in summer and fall, and smallest in winter, slightly lower for children and the elderly, and mostly limited to Mondays and weekends for heart, lungs, external causes, and death within hospital admissions. Mortality in Bavaria generally dropped during the weekends, especially on Sundays. Children mortality was not affected by the day of the week, while death due to external injuries increased on Mondays. Road accidents increased on Fridays in all seasons, and on



**Fig 7. Day of the week effect.** Day of the week effect on daily mortality, hospital admissions, and road accidents for each season, expressed in proportion of the standard deviations of daily number of cases within Bavaria compared to a reference day of the week (mortality Wednesday, hospital admissions Friday, road accidents Thursday). The color indicates the effect direction whether positive (red) or negative (blue). The number in the upper right corner of each panel indicates the standard deviation of daily cases in the relevant season for the whole of Bavaria. The absence of the cross means that the effect of the day was not significant in the corresponding model. Explanatory example: For winter hospital admissions, the sd is 3143.5, and the Saturday effect for Bavaria is -0.884. This indicates a decrease in daily hospital admissions by  $0.884 \times 3143.5 = 2779$  on Saturdays compared to Fridays.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259086.g007>

Mondays in winter. However, Sundays had the least number of accidents followed by Saturdays.

## Discussion

While few studies have separately examined the effects of weather on morbidity, mortality, and road accidents in Bavaria, this is the first study to compare the effects and consider the integrative effect of UTCI on these three public health outcomes. In addition, we examined variations of UTCI effects in space (districts, regions, and Bavaria), with season, and specific to different population groups. The results clearly indicated that UTCI had a significant effect on all three public health outcomes after adjusting for calendar effects.

### UTCI effect

The significant UTCI effect on hospital admissions, mortality, and road accidents in Bavaria extended to all regions, districts, and subgroups except children mortality which was not influenced by UTCI. This might be due to the low daily death cases among children, especially since an increase in children's hospital and emergency admissions particularly in summer has been reported by other studies [4, 60].

Mortality and morbidity in Bavaria were similarly affected by UTCI as previously reported for temperatures, i.e. higher UTCI during summer caused an immediate increase in hospital admissions and mortality. The observed increase in hospital admissions agrees with the previous findings of higher ambulance activity in the Munich area with higher temperatures [4]. Similar increases in mortality with high UTCI have been reported for France [41], Czech Republic [47], and Bangladesh [61]. In fall, winter and spring, however, lower UTCI increased hospital admissions and mortality in Bavaria with a lag of one to two weeks. Such cold-related mortality has been equally reported for the Czech Republic [37] and Greece [62].

The unique result of our study is that for both promoting UTCI effects on mortality and morbidity in summer as well as mitigating UTCI effects in winter, the effects were clearly stronger for mortality than for morbidity by up to a factor of 5. Here, our study supports recent results for 52 Spanish cities [22] where heat exposure increased the risk of cardiovascular and respiratory mortality, but not hospital admissions.

The second important point of our study is a deeper look into the spatial patterns of such UTCI effects. Generally, the eastern districts of Bavaria have higher hospital admission rates per 100,000 inhabitants than the western ones (Fig 2), probably not due to more hospital beds (see S4 Fig for no apparent east-west differences), but likely due to a higher share of elderly people in the (north-) eastern districts of Bavaria, especially the districts of Wunsiedel and Hof, and in Garmisch-Partenkirchen in the south (Fig 1). It is well known that this senior part of the population is particularly vulnerable to heat/cold stress [49], probably resulting in higher hospital admissions and mortality in these districts at all times of the year, but especially in winter. These above-mentioned districts are characterized by lower UTCI values in winter, likely contributing to this spatial pattern in winter. A similar spatial variability of the UTCI effect on mortality has been recognized when comparing cool and warm cities in Poland [48].

Systematic reviews showed that heat-related morbidity and mortality differ by sex [63, 64]. Yet, no clear distinct differences between female and male vulnerability to UTCI were detected in this study.

Although there was a lack of a significant UTCI effect on heart, external, and lung hospital admissions for Bavaria, season-specific spatial variations became evident for these subgroups in summer and winter when considering the seven regions and the 96 districts, comparable to the study on cardiovascular- and respiratory-related hospital admissions in 52 Spanish cities



[22]. For the (south-) eastern regions (OB, NB, and OPf), higher UTCI in summer had no effect on hospital admissions and lower UTCI in winter was associated with fewer hospital admissions. In contrast, for the (north-) western regions (OF, MF, and UF) higher UTCI in summer reduced hospital admissions and lower UTCI in winter was associated with increased hospital admissions. These east-west contrasts within Bavaria are striking since the UTCI heat effect on hospital admissions in summer was smaller in the comparably hotter regions (Fig 2) and in winter the UTCI cold effect was even reverse in the comparably cooler regions of Bavaria. Such region-specific variations in seasonal heat/cold stress effects on hospital admissions should be addressed when adjusting the best prevention and adaptation policies across the whole federal state of Bavaria accordingly.

Higher UTCI considerably increased road accidents in all seasons except for winter when more road accidents happen immediately after a decrease in UTCI. This can be well explained by bad driving conditions due to fog, precipitation, and the drop of temperatures below freezing level in winter, constituting major reasons for road accidents in Germany [36]. The increase in road accidents following high UTCI values in spring, summer, and fall coincide with a higher mortality (see Fig 3). This may be explained by a greater demand for leisure seeking activities and transportation. The immediate UTCI effect on road accidents in summer was about twice as strong as on mortality. Remarkably, during summer, road accidents increased in touristic districts especially in the alpine region in the south. The high number of road accidents in larger cities in all seasons was probably due to the high traffic density, which also peaks in summer with more non-local drivers. Since immediate amplifying UTCI effects were comparably strong in three seasons (spring through fall), awareness-raising activities and additional safety measures should target these regions before and during the peak periods.

### Confounding effects

All UTCI models accounted for other calendar-related effects (year, holidays, day of the week) on mortality, hospital admission, and road accidents. Since a deeper understanding of these confounding effects may support adaptation and policy measures, we will briefly discuss selected results in this respect.

The Bavarian population increased by 850,000 inhabitants over two decades, reaching 12.8 million in 2015 [65]. The corresponding increase in daily hospital admissions was concentrated in the elderly, children, and males, most likely due to a higher proportion of elderly in the German population being especially vulnerable to heat stress [49]. The increasing trend of death due to lung problems might be related to air pollution [66], as well as lung cancer and chronic obstructive pulmonary disease (COPD), especially among the increasing number of smoking women [67]. This highlights the importance of including the effect of air pollution in future studies, especially in the north-eastern districts, which are open to pollution sources from the east and commonly suffer blocking situations. Most Bavarian districts and regions had similar year effects on hospital admissions, mortality, and road accidents, with a few interesting exceptions. The districts with the highest population density, the cities of Munich, Nurnberg, and Augsburg, had a negative trend in total mortality, while most of the remaining districts had a positive trend, mirroring quite likely the concentration of the mobile, younger working population where the jobs are. Additionally, the observed discrepancies in mortality trends may be influenced by variations in birth rates, migration of young people to large cities, and investments in infrastructure. The observed reduction in daily road accidents over the study period could be associated with the technological improvement of safety measures [68], and the continuous efforts within the European Union to reduce casualties on the road [69]. There was only one district (Landshut) with a positive trend in road accidents in both summer

and spring without any obvious explanation. Such deviations from the general patterns may be associated with the demographic characteristics, employment situation, number of hospital beds in these districts, and how they change over time. Factors like this should be addressed on the district level to resolve deficiencies and extract good policies on how to adapt to UTCI changes.

Holidays had almost no effect on mortality but witnessed fewer hospital admissions in all seasons, especially in winter, and for all regions, age, and sex groups. This evident winter reduction may be related to fewer outdoor activities. The reduction of mortality within hospital admissions during holidays was always less than the corresponding reduction in the total number of admissions. This finding may correspond to results of a meta-analysis reporting that the mortality rate is higher among patients admitted during holidays and weekends [70]. Seniors mostly do not depend on (school) holidays anymore, thus should not have holiday effects as e.g. shown by an absence of holiday effect on elderly emergency hospitalization in Munich [4]. However, in our study elderly hospital admissions did not deviate from the general pattern of the remaining age groups in Bavaria, and not even when considering the city of Munich. This discrepancy may be caused by the different years included in the emergency hospitalization study in Munich (2014–2018). The overall reducing effect of holidays was especially strong in winter and summer, the two seasons with a larger proportion of holidays in Bavaria.

Day of the week effects basically mirroring human behavior and habits were most prominent for hospital admissions, followed by road accidents, and least for mortality. Planned hospital admissions and a catch-up effect after the weekend perfectly explain the reduced hospital admissions on the weekend and the respective increase during weekdays, especially stronger at the beginning of the week. Weekends, especially Sundays had the least number of road accidents due to the reduced road activity in these days, whereas increased numbers on Mondays and Fridays may be related to weekly commuters. The excess in road accidents on Fridays, and Saturdays compared to Sundays might be due to alcohol consumption, risk-seeking, and leisure drives at night among young drivers [71].

### Future research and limitations

Our study confirmed that admission to hospitals, mortality, and road accidents were clearly associated with UTCI changes, with sizes of immediate effects in summer increasing in this order. Thus, the established influence of heat stress/UTCI extends to our health outcomes. In the next step, comparisons between prediction models which use thermal indices, particularly UTCI, and temperature should be carried out. In winter, the influence of precipitation might interfere with the UTCI influence. For example, it is evident that precipitation affects hospital admissions in the United States [24], while precipitation influences road accidents worldwide [32]. Particularly in the case of Munich, precipitation had a negative effect on emergency department visits in fall, and the number of female patients was negatively correlated with hail warnings and maximum precipitation intensity [4]. The simultaneous influence of precipitation and UTCI on mortality, morbidity, and road accidents is not addressed in this paper due to its complexity. However, this interaction calls for dedicated future research.

We expected UTCI effects to differ spatially within Bavaria and with subgroup characteristics. Therefore the specific patterns in the significant effects of UTCI on morbidity, mortality, and road accidents, that become obvious when conducting separate tests per season and age-gender subpopulation at different spatial scales, are extremely important. These results highlight the importance of planning climate change adaptation and mitigation efforts in both the local and regional context. According to literature, people who live in regions of moderate

climate show higher sensitivity to weather extremes [72]. By applying this concept to Bavaria, inhabitants of warmer areas in Franconia and colder alpine regions are supposed to be less sensitive to UTCI variations in summer and winter, respectively. Therefore, our first, but not consistent results on spatial differences in UTCI effects should be intensified in future studies. Then, also the possibly amplified effect of UTCI in urban areas that might contribute to the increasing number of hospital admissions and mortality, especially among the elderly [61], should be addressed. Future research should also consider the possible influence of heat islands in large cities, and the moderating influence of vegetation and water bodies on the heat stress-related morbidity and mortality which has been recognized in other geographical locations [73–75].

The correlations reported between UTCI and the daily counts of Hospital admissions, death, and road accidents should be interpreted with care. Previous studies have demonstrated the causal connection between weather conditions, particularly heat-stress, and mortality in Bavarian large cities [50, 51]. Additionally, the observed correlations are highly influenced by the public behavior patterns. Specific ranges of UTCI at specific seasons may cause higher or lower levels of activity, use of transportation, interaction with the environment and other individuals, and stress which all eventually accumulate in causing the observed fluctuations in morbidity, mortality, and road accidents numbers. The available data does not contain enough details to attribute each case to a specific cause. However, our results indicate the surplus in cases which occur following UTCI fluctuations regardless of their nature of a direct or indirect link. This is particularly important for improving preparedness in the healthcare sector.

## Supporting information

**S1 Fig. Age structure of the population in Bavaria.** The percentage of children and adults. All values are averaged over the study period 1995–2015 [55]. Border shapefiles were provided with written permission by the [Bundesamt für Kartographie und Geodäsie](#) under the license [\(CC BY 4.0\)](#).

(TIF)

**S2 Fig. Spring UTCI effect.** Spring UTCI effect on the daily mortality, hospital admissions, and road accidents for each subgroup. The horizontal axis represents the lag in days, and the vertical axis represents the effect estimate. It is expressed in proportion of the standard deviations of daily number of cases within the corresponding subgroup when UTCI changes by one standard deviation of its daily value. The black circles represent those effects for each region. The colored dots represent those effects for districts within the region. The absence of the points means that the effect of UTCI was not significant for a particular lag in the corresponding model.

(TIF)

**S3 Fig. Fall UTCI effect.** Fall UTCI effect on the daily mortality, hospital admissions, and road accidents for each subgroup. The horizontal axis represents the lag in days, and the vertical axis represents the effect estimate. It is expressed in proportion of the standard deviations of daily number of cases within the corresponding subgroup when UTCI changes by one standard deviation of its daily value. The black circles represent those effects for each region. The colored dots represent those effects for districts within the region. The absence of the points means that the effect of UTCI was not significant for a particular lag in the corresponding model.

(TIF)

**S4 Fig. Hospital beds in Bavaria.** The number of hospital beds per 1000 inhabitants averaged over the study period 1995–2015 [76]. Border shapefiles were provided with written permission by the [Bundesamt für Kartographie und Geodäsie](#) under the license ([CC BY 4.0](#)). (TIF)

**S1 Table. Percentages of hospital admissions, mortality, and road accidents in regions and by subcategories.** (DOCX)

## Acknowledgments

We thank the Research Data Centers of the Federal Statistical Office for providing most of the data used in this paper, the Deutscher Wetterdienst (German Meteorological Service—DWD) for the weather data, Mr. Tobias Ottenheim for his contribution in the first stage of the project, and the two anonymous reviewers for the constructive comments.

## Author Contributions

**Conceptualization:** Annette Menzel.

**Data curation:** Wael Ghada.

**Formal analysis:** Wael Ghada, Donna P. Ankerst.

**Funding acquisition:** Annette Menzel.

**Methodology:** Donna P. Ankerst.

**Project administration:** Annette Menzel.

**Resources:** Nicole Estrella, Annette Menzel.

**Supervision:** Donna P. Ankerst, Annette Menzel.

**Validation:** Donna P. Ankerst.

**Visualization:** Wael Ghada.

**Writing – original draft:** Wael Ghada.

**Writing – review & editing:** Wael Ghada, Nicole Estrella, Donna P. Ankerst, Annette Menzel.

## References

1. Seneviratne S, Nicholls N, Easterling D, Goodess C, Kanae S, Kossin J, et al. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. 2012;109–230. <https://doi.org/10.7916/d8-6nbt-s431>
2. Sorensen CJ, Salas RN, Rublee C, Hill K, Bartlett ES, Charlton P, et al. Clinical Implications of Climate Change on US Emergency Medicine: Challenges and Opportunities. *Ann Emerg Med*. 2020; 76:168–78. <https://doi.org/10.1016/j.annemergmed.2020.03.010> PMID: 32507491
3. Ahmadalipour A, Moradkhani H. Escalating heat-stress mortality risk due to global warming in the Middle East and North Africa (MENA). *Environment International*. 2018; 117:215–25. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.05.014> PMID: 29763817.
4. Ghada W, Estrella N, Pfoerringer D, Kanz K-G, Bogner-Flatz V, Ankerst DP, et al. Effects of weather, air pollution and Oktoberfest on ambulance-transported emergency department admissions in Munich, Germany. *Sci Total Environ*. 2020:143772. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143772> PMID: 33229084.
5. Su X, Cheng Y, Wang Y, Liu Y, Li N, Li Y, et al. Regional Temperature-Sensitive Diseases and Attributable Fractions in China. *Int J Environ Res Public Health*. 2019; 17. <https://doi.org/10.3390/ijerph17010184> PMID: 31888051.

6. Sato T, Kusaka H, Hino H. Quantitative Assessment of the Contribution of Meteorological Variables to the Prediction of the Number of Heat Stroke Patients for Tokyo. *SOLA*. 2020; 16:104–8. <https://doi.org/10.2151/sola.2020-018>
7. Ali AM, Willett K. What is the effect of the weather on trauma workload? A systematic review of the literature. *Injury*. 2015; 46:945–53. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2015.03.016> PMID: 25816705.
8. Bundi M, Meier L, Amsler F, Gross T. Wie hängen Eintreffen und Outcome schwerer Verletzter im Traumazentrum von Wetter, Tages- und Jahreszeit ab. *Unfallchirurg*. 2018; 121:10–9. <https://doi.org/10.1007/s00113-016-0267-0> PMID: 27778061.
9. Watson KE, Gardiner KM, Singleton JA. The impact of extreme heat events on hospital admissions to the Royal Hobart Hospital. *J Public Health (Oxf)*. 2020; 42:333–9. <https://doi.org/10.1093/pubmed/fdz033> PMID: 31220305.
10. Wilson JM, Staley CA, Boden AL, Boissonneault AR, Schwartz AM, Schenker ML. The Effect of Season and Weather on Orthopaedic Trauma: Consult Volume Is Significantly Correlated with Daily Weather. *Adv Orthop*. 2018; 2018:6057357. <https://doi.org/10.1155/2018/6057357> PMID: 30245890.
11. Im Otte Kampe E, Kovats S, Hajat S. Impact of high ambient temperature on unintentional injuries in high-income countries: a narrative systematic literature review. *BMJ Open*. 2016; 6:e010399. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2015-010399> PMID: 26868947.
12. Lee H, Myung W, Kim H, Lee E-M, Kim H. Association between ambient temperature and injury by intentions and mechanisms: A case-crossover design with a distributed lag nonlinear model. *Sci Total Environ*. 2020; 746:141261. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141261> PMID: 32745866.
13. Ilango SD, Weaver M, Sheridan P, Schwarz L, Clemesha RES, Bruckner T, et al. Extreme heat episodes and risk of preterm birth in California, 2005–2013. *Environment International*. 2020; 137:105541. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105541> PMID: 32059147.
14. Williams S, Nitschke M, Weinstein P, Pisaniello DL, Parton KA, Bi P. The impact of summer temperatures and heatwaves on mortality and morbidity in Perth, Australia 1994–2008. *Environment International*. 2012; 40:33–8. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.11.011> PMID: 22280925.
15. Hopp S, Dominici F, Bobb JF. Medical diagnoses of heat wave-related hospital admissions in older adults. *Prev Med*. 2018; 110:81–5. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2018.02.001> PMID: 29428173.
16. Pascal M, Wagner V, Corso M, Laaidi K, Ung A, Beaudou P. Heat and cold related-mortality in 18 French cities. *Environment International*. 2018; 121:189–98. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.08.049> PMID: 30216771.
17. Calleja-Agus J, England K, Calleja N. The effect of global warming on mortality. *Early Hum Dev*. 2020; 105222. <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2020.105222> PMID: 33097356.
18. Merrill RM. Injury-Related Deaths according to Environmental, Demographic, and Lifestyle Factors. *J Environ Public Health*. 2019; 2019:6942787. <https://doi.org/10.1155/2019/6942787> PMID: 30944571.
19. Chen J, Yang J, Zhou M, Yin P, Wang B, Liu J, et al. Cold spell and mortality in 31 Chinese capital cities: Definitions, vulnerability and implications. *Environment International*. 2019; 128:271–8. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.049> PMID: 31071590.
20. Hind J, Lahart IM, Jayakumar N, Athar S, Fazal MA, Ashwood N. Seasonal variation in trauma admissions to a level III trauma unit over 10 years. *Injury*. 2020; 51:2209–18. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2020.07.014> PMID: 32703642.
21. Wang Z, Zhou Y, Luo M, Yang H, Xiao S, Huang X, et al. Association of diurnal temperature range with daily hospitalization for exacerbation of chronic respiratory diseases in 21 cities, China. *Respir Res*. 2020; 21:251. <https://doi.org/10.1186/s12931-020-01517-7> PMID: 32993679.
22. Iñiguez C, Royé D, Tobías A. Contrasting patterns of temperature related mortality and hospitalization by cardiovascular and respiratory diseases in 52 Spanish cities. *Environ Res*. 2020; 192:110191. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110191> PMID: 32980302.
23. Peña-Angulo D, Reig-Gracia F, Domínguez-Castro F, Revuelto J, Aguilar E, Schrier G, et al. ECTACI: European Climatology and Trend Atlas of Climate Indices (1979–2017). *J Geophys Res Atmos*. 2020; 125. <https://doi.org/10.1029/2020JD032798>
24. Bobb JF, Ho KKL, Yeh RW, Harrington L, Zai A, Liao KP, et al. Time-Course of Cause-Specific Hospital Admissions During Snowstorms: An Analysis of Electronic Medical Records From Major Hospitals in Boston, Massachusetts. *Am J Epidemiol*. 2017; 185:283–94. <https://doi.org/10.1093/aje/kww219> PMID: 28137774.
25. Greve F, Kanz K-G, Zyskowski M, Matthey F von, Biberthaler P, Muthers S, et al. The influence of foehn winds on the incidence of severe injuries in southern Bavaria—an analysis of the TraumaRegister DGU®. *BMC Musculoskelet Disord*. 2020; 21:568. <https://doi.org/10.1186/s12891-020-03572-z> PMID: 32825813.

26. Lane K, Charles-Guzman K, Wheeler K, Abid Z, Graber N, Matte T. Health effects of coastal storms and flooding in urban areas: a review and vulnerability assessment. *J Environ Public Health*. 2013; 2013:913064. <https://doi.org/10.1155/2013/913064> PMID: 23818911.
27. Zhan Z-Y, Yu Y-M, Chen T-T, Xu L-J, Ou C-Q. Effects of hourly precipitation and temperature on road traffic casualties in Shenzhen, China (2010–2016): A time-stratified case-crossover study. *Sci Total Environ*. 2020; 720:137482. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137482> PMID: 32145618.
28. Drosu A, Cofaru C, Popescu MV. Influence of Weather Conditions on Fatal Road Accidents on Highways and Urban and Rural Roads in Romania. *Int.J Automot Technol*. 2020; 21:309–17. <https://doi.org/10.1007/s12239-020-0029-4>
29. Wu CYH, Zaitchik BF, Gohlke JM. Heat waves and fatal traffic crashes in the continental United States. *Accid Anal Prev*. 2018; 119:195–201. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.07.025> PMID: 30048841.
30. Lee W-K, Lee H-A, Hwang S, Kim H, Lim Y-H, Hong Y-C, et al. A time series study on the effects of cold temperature on road traffic injuries in Seoul, Korea. *Environ Res*. 2014; 132:290–6. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.04.019> PMID: 24834824.
31. Liu A, Soneja SI, Jiang C, Huang C, Kerns T, Beck K, et al. Frequency of extreme weather events and increased risk of motor vehicle collision in Maryland. *Sci Total Environ*. 2017; 580:550–5. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.211> PMID: 27988189.
32. Theofilatos A, Yannis G. A review of the effect of traffic and weather characteristics on road safety. *Accid Anal Prev*. 2014; 72:244–56. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.06.017> PMID: 25086442.
33. Gao J, Chen X, Woodward A, Liu X, Wu H, Lu Y, et al. The association between meteorological factors and road traffic injuries: a case analysis from Shantou city, China. *Sci Rep*. 2016; 6:37300. <https://doi.org/10.1038/srep37300> PMID: 27853316.
34. Islam MM, Alharthi M, Alam MM. The Impacts of Climate Change on Road Traffic Accidents in Saudi Arabia. *Climate*. 2019; 7:103. <https://doi.org/10.3390/cli7090103>
35. Bergel-Hayat R, Debbarh M, Antoniou C, Yannis G. Explaining the road accident risk: weather effects. *Accid Anal Prev*. 2013; 60:456–65. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.03.006> PMID: 23928504.
36. Becker N, Rust HW, Ulbrich U. Predictive modeling of hourly probabilities for weather-related road accidents. *Nat Hazards Earth Syst Sci*. 2020; 20:2857–71. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2857-2020>
37. Urban A, Kysely J. Comparison of UTCI with other thermal indices in the assessment of heat and cold effects on cardiovascular mortality in the Czech Republic. *Int J Environ Res Public Health*. 2014; 11:952–67. <https://doi.org/10.3390/ijerph110100952> PMID: 24413706.
38. Pan R, Gao J, Wang X, Bai L, Wei Q, Yi W, et al. Impacts of exposure to humidex on the risk of childhood asthma hospitalizations in Hefei, China: Effect modification by gender and age. *Sci Total Environ*. 2019; 691:296–305. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.026> PMID: 31323575.
39. Jendritzky G, Dear R de, Havenith G. UTCI—why another thermal index. *Int J Biometeorol*. 2012; 56:421–8. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7> PMID: 22187087.
40. Blazejczyk K, Epstein Y, Jendritzky G, Staiger H, Tinz B. Comparison of UTCI to selected thermal indices. *Int J Biometeorol*. 2012; 56:515–35. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2> PMID: 21614619.
41. Di Napoli C, Pappenberger F, Cloke HL. Verification of Heat Stress Thresholds for a Health-Based Heat-Wave Definition. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2019; 58:1177–94. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-18-0246.1>
42. Tomczyk AM, Owczarek M. Occurrence of strong and very strong heat stress in Poland and its circulation conditions. *Theor Appl Climatol*. 2020; 139:893–905. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02998-3>
43. Wu F, Yang X, Shen Z. Regional and seasonal variations of outdoor thermal comfort in China from 1966 to 2016. *Sci Total Environ*. 2019; 665:1003–16. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.190> PMID: 30893732.
44. Vinogradova V. Using the Universal Thermal Climate Index (UTCI) for the assessment of bioclimatic conditions in Russia. *Int J Biometeorol*. 2020:1–11. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01901-4> PMID: 32383024.
45. Di Napoli C, Pappenberger F, Cloke HL. Assessing heat-related health risk in Europe via the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int J Biometeorol*. 2018; 62:1155–65. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1518-2> PMID: 29546489.
46. Nassiri P, Monazzam MR, Golbabaefi F, Dehghan SF, Rafieepour A, Mortezaipoor AR, et al. Application of Universal Thermal Climate Index (UTCI) for assessment of occupational heat stress in open-pit mines. *Industrial health*. 2017; 55:437–43. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2017-0018> PMID: 28804096.
47. Urban A, Hondula DM, Hanzlíková H, Kysely J. The predictability of heat-related mortality in Prague, Czech Republic, during summer 2015—a comparison of selected thermal indices. *Int J Biometeorol*. 2019; 63:535–48. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01684-3> PMID: 30739159.

48. Kuchcik M. Mortality and thermal environment (UTCI) in Poland-long-term, multi-city study. *Int J Biometeorol*. 2020;1–13. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01995-w> PMID: 32880062.
49. Rai M, Breitner S, Wolf K, Peters A, Schneider A, Chen K. Impact of climate and population change on temperature-related mortality burden in Bavaria, Germany. *Environ Res Lett*. 2019; 14:124080. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab5ca6>
50. Breitner S, Wolf K, Devlin RB, Diaz-Sanchez D, Peters A, Schneider A. 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*. 2014; 485–486:49–61. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.048> PMID: 24704956.
51. Breitner S, Wolf K, Peters A, Schneider A. Short-term effects of air temperature on cause-specific cardiovascular mortality in Bavaria, Germany. *Heart*. 2014; 100:1272–80. <https://doi.org/10.1136/heartjnl-2014-305578> PMID: 24906508.
52. Research Data Center of the Federal Statistical Office and the Statistical Offices of the federal states (RDC). *Krankenhausstatistik Teil II: Diagnosen der Krankenhauspatienten (23131)*.; 1995–2015.
53. Research Data Center of the Federal Statistical Office and the Statistical Offices of the federal states (RDC). *Todesursachenstatistik (23211)*.; 1995–2015.
54. Research Data Center of the Federal Statistical Office and the Statistical Offices of the federal states (RDC). *Statistik der Straßenverkehrsunfälle (46241)*.; 2002–2015.
55. Federal Statistical Office Germany. Population: Administrative districts, reference date. Table: 12411–0015. © Statistisches Bundesamt (Destatis) [updated 25 Jan 2021; cited 25 Jan 2021]. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=table&code=12411-0015#astructure>.
56. Błażejczyk K, Jendritzky G, Bröde P, Fiala D, Havenith G, Epstein Y, et al. An introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Geogr Pol*. 2013; 86:5–10. <https://doi.org/10.7163/GPol.2013.1>
57. Deutscher Wetterdienst. Hourly Climate Observations, Germany [updated 10 Dec 2020; cited 10 Dec 2020]. [ftp://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/observations\\_germany/climate/hourly/](ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/hourly/).
58. Bröde P, Fiala D, Błażejczyk K, Holmér I, Jendritzky G, Kampmann B, et al. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int J Biometeorol*. 2012; 56:481–94. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1> PMID: 21626294.
59. Blangiardo M, Cameletti M, Baio G, Rue H. Spatial and spatio-temporal models with R-INLA. *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology*. 2013; 4:33–49. Epub 2013/01/02. <https://doi.org/10.1016/j.sste.2012.12.001> PMID: 23481252.
60. Winquist A, Grundstein A, Chang HH, Hess J, Sarnat SE. Warm season temperatures and emergency department visits in Atlanta, Georgia. *Environ Res*. 2016; 147:314–23. Epub 2016/02/27. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.02.022> PMID: 26922412.
61. Burkart K, Breitner S, Schneider A, Khan MMH, Krämer A, Endlicher W. An analysis of heat effects in different subpopulations of Bangladesh. *Int J Biometeorol*. 2014; 58:227–37. Epub 2013/05/21. <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0668-5> PMID: 23689928.
62. Nastos PT, Matzarakis A. The effect of air temperature and human thermal indices on mortality in Athens, Greece. *Theor Appl Climatol*. 2012; 108:591–9. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0555-0>
63. Gifford RM, Todisco T, Stacey M, Fujisawa T, Allerhand M, Woods DR, et al. Risk of heat illness in men and women: A systematic review and meta-analysis. *Environ Res*. 2019; 171:24–35. Epub 2018/10/25. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.10.020> PMID: 30641370.
64. van Steen Y, Ntarladima A-M, Grobbee R, Karssenberg D, Vaartjes I. Sex differences in mortality after heat waves: are elderly women at higher risk. *Int Arch Occup Environ Health*. 2019; 92:37–48. Epub 2018/10/06. <https://doi.org/10.1007/s00420-018-1360-1> PMID: 30293089.
65. Federal Statistical Office Germany. Bevölkerung: Gemeinde, Geschlecht, Quartale, Jahre, table 12411-009z. © Statistisches Bundesamt (Destatis) [updated 22 Jan 2021; cited 22 Jan 2021]. <https://www.statistikdaten.bayern.de/genesis/online/data?operation=table&code=12411-009z>.
66. Liu C, Chen R, Sera F, Vicedo-Cabrera AM, Guo Y, Tong S, et al. Ambient Particulate Air Pollution and Daily Mortality in 652 Cities. *N Engl J Med*. 2019; 381:705–15. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1817364> PMID: 31433918.
67. RKI. Time trends in incidence and mortality of respiratory diseases of high public health relevance in Germany. RKI-Bib1 (Robert Koch-Institut); 2017.
68. TraumaRegister DGU. 20 years of trauma documentation in Germany—actual trends and developments. *Injury*. 2014; 45 Suppl 3:S14–9. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2014.08.012> PMID: 25284227.
69. European Commission. Roadmap to a single European transport area. towards a competitive and resource efficient transport system COM(2011) 144 final. White paper. Luxembourg: Publications Office of the European Union 2011 [updated 18 Jan 2021; cited 18 Jan 2021]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52011DC0144>.

70. Pauls LA, Johnson-Paben R, McGready J, Murphy JD, Pronovost PJ, Wu CL. The Weekend Effect in Hospitalized Patients: A Meta-Analysis. *J Hosp Med.* 2017; 12:760–6. <https://doi.org/10.12788/jhm.2815> PMID: 28914284.
71. Scheiner J, Holz-Rau C. A residential location approach to traffic safety: two case studies from Germany. *Accid Anal Prev.* 2011; 43:307–22. Epub 2010/10/08. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.08.029> PMID: 21094329.
72. Guo Y, Gasparrini A, Armstrong BG, Tawatsupa B, Tobias A, Lavigne E, et al. Heat Wave and Mortality: A Multicountry, Multicommunity Study. *Environ Health Perspect.* 2017; 125:87006. Epub 2017/08/10. <https://doi.org/10.1289/EHP1026> PMID: 28886602.
73. Burkart K, Meier F, Schneider A, Breitner S, Canário P, Alcoforado MJ, et al. Modification of Heat-Related Mortality in an Elderly Urban Population by Vegetation (Urban Green) and Proximity to Water (Urban Blue): Evidence from Lisbon, Portugal. *Environ Health Perspect.* 2016; 124:927–34. Epub 2015/11/13. <https://doi.org/10.1289/ehp.1409529> PMID: 26566198.
74. Son J-Y, Lane KJ, Lee J-T, Bell ML. Urban vegetation and heat-related mortality in Seoul, Korea. *Environ Res.* 2016; 151:728–33. Epub 2016/09/17. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.09.001> PMID: 27644031.
75. Tiegies Z, McGregor D, Georgiou M, Smith N, Saunders J, Millar R, et al. The Impact of Regeneration and Climate Adaptations of Urban Green-Blue Assets on All-Cause Mortality: A 17-Year Longitudinal Study. *Int J Environ Res Public Health.* 2020; 17. Epub 2020/06/25. <https://doi.org/10.3390/ijerph17124577> PMID: 32630538.
76. Federal Statistical Office Germany. Krankenhäuser: Kreise, Krankenhäuser, Betten, Patienten, Ärzte, Pflegepersonal, Jahr. © Statistisches Bundesamt (Destatis) [updated 8 Feb 2021; cited 8 Feb 2021]. <https://www.statistikdaten.bayern.de/genesis/online/data?operation=table&code=23111-001r>.