

Hitzewellen im Klimawandel: Wie gut sind wir vorbereitet?

Hitzewellen stellen weltweit eine grosse Herausforderung dar, unter anderem da diese Extremereignisse schwerwiegende Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben. Durch den Klimawandel haben Intensität, Dauer und Häufigkeit von Hitzewellen in den meisten Regionen der Welt stark zugenommen. Simulationen mit Klimamodellen projizieren, dass der weitere Anstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre, wie zum Beispiel CO₂, solche Extreme noch stärker begünstigen wird. Um die negativen Auswirkungen von Hitzewellen zu verringern, ist es daher wichtig, das Auftreten von Hitzewellen auf verschiedenen Zeitskalen vorhersagen zu können. Mit Hilfe solcher Vorhersagen können gefährdete Personen und betroffene Sektoren frühzeitig gewarnt und entsprechende Massnahmen ergriffen werden. Während Vorhersagen und Warnungen vor Hitzewellen kurzfristig Leben retten können, wird nur die Eindämmung des Klimawandels langfristig die Folgen von Hitzewellen für Menschen, Infrastruktur und Ökosysteme abmildern.

Daniela I.V. Domeisen

Université de Lausanne, Faculté des géosciences et de l'environnement, Lausanne

ETH Zürich, Institut für Atmosphäre und Klima, Zürich

1 Einleitung

Hitzewellen sind mehrtägige oder länger andauernde Temperaturextreme, die sich auf zahlreiche Sektoren auswirken, unter anderem auf die menschliche Gesundheit (Campbell *et al.* 2018; Ebi *et al.* 2021), den Energiebedarf und die Energieproduktion (Auffhammer *et al.* 2017; Bloomfield *et al.* 2020) sowie auf die Forst- und Landwirtschaft (Brás *et al.* 2021). Hitzewellen haben ferner Konsequenzen für Ökosysteme (Hoegh-Guldberg *et al.* 2018) und Infrastruktur (Nguyen *et al.* 2010). Sie können sowohl an Land als auch im Meer vorkommen (z.B. Benthuyzen *et al.* 2020). Dieser Beitrag befasst sich mit Hitzewellen an Land.

Abgesehen von den direkten Auswirkungen können Hitzewellen zu sich gegenseitig verstärkenden Extremereignissen führen, sogenannten «compound events» (Zscheischler *et al.* 2020). Zum Beispiel treten Hitzewellen häufig in Verbindung mit Trockenperioden auf (Hao *et al.* 2018; Bezak *et al.* 2020), wobei sich Hitze und Trockenheit gegenseitig verstärken können (Seneviratne *et al.* 2010), was zu einem erhöhten Brandrisiko (Libonati *et al.* 2022), Pflanzensterben (Allen *et al.* 2015) und Ernteausfällen (Ribeiro *et al.* 2020) führen kann. Feuchte Hitzewellen – extreme Kombinationen von hoher Temperatur und hoher Luftfeuchtigkeit – stellen eine weitere ernsthafte Gefahr für die menschliche Gesundheit dar (Raymond *et al.* 2020).

2 Mechanismen und Vorhersage von Hitzewellen

Fast alle Hitzewellen in den mittleren Breiten, speziell über Europa, sind mit einem sogenannten atmosphärischen Blocking-Ereignis verbunden, d.h. einer atmosphärischen Zirkulation, bei welcher die atmosphärische Strömung durch ein starkes und anhaltendes Hochdruckgebiet abgeschwächt und umgeleitet wird (Pfahl und Wernli 2012). Hitzewellen bilden sich daher oft in Regionen mit schwachen Winden, beziehungsweise einem schwachen Jetstream (Jiménez-Estève und Domeisen 2022). Ein Beispiel dafür ist die Hitzewelle im Jahr 2018 (Abb. 1), während welcher der Jetstream einen nördlicheren Weg über Europa genommen hat. Die Temperaturen während des Sommers 2018 waren in Europa rekordhoch; für die Schweiz lagen sie etwa 3 Grad Celsius über dem langjährigen Mittel (z.B. Domeisen *et al.* 2023, Abb. 1). Hitzewellen können von weiteren Prozessen zusätzlich angetrieben werden, z.B. durch Advektion von warmer Luft aus umliegenden Gebieten, durch Absinken und der damit einhergehenden Erwärmung der Luft, sowie durch die starke Sonneneinstrahlung aufgrund eines klaren Himmels (Bieli *et al.* 2015; Zschenderlein *et al.* 2019). Das Austrocknen der Böden während Hitzewellen kann eine Hitzewelle noch weiter verstärken: Während sich Böden kühlen können, indem sie während Hitzewellen Wasserdampf verdunsten, werden sie, sobald die oberen Bodenschichten ausgetrocknet sind, stattdessen aufgeheizt und können die darüber liegende Luftschicht weiter erwärmen (Miralles *et al.* 2019). Eine vorangehende Trockenheit kann daher Hitzewellen begünstigen, was für die Vorhersagbarkeit von Hitzewellen auf Zeitska-

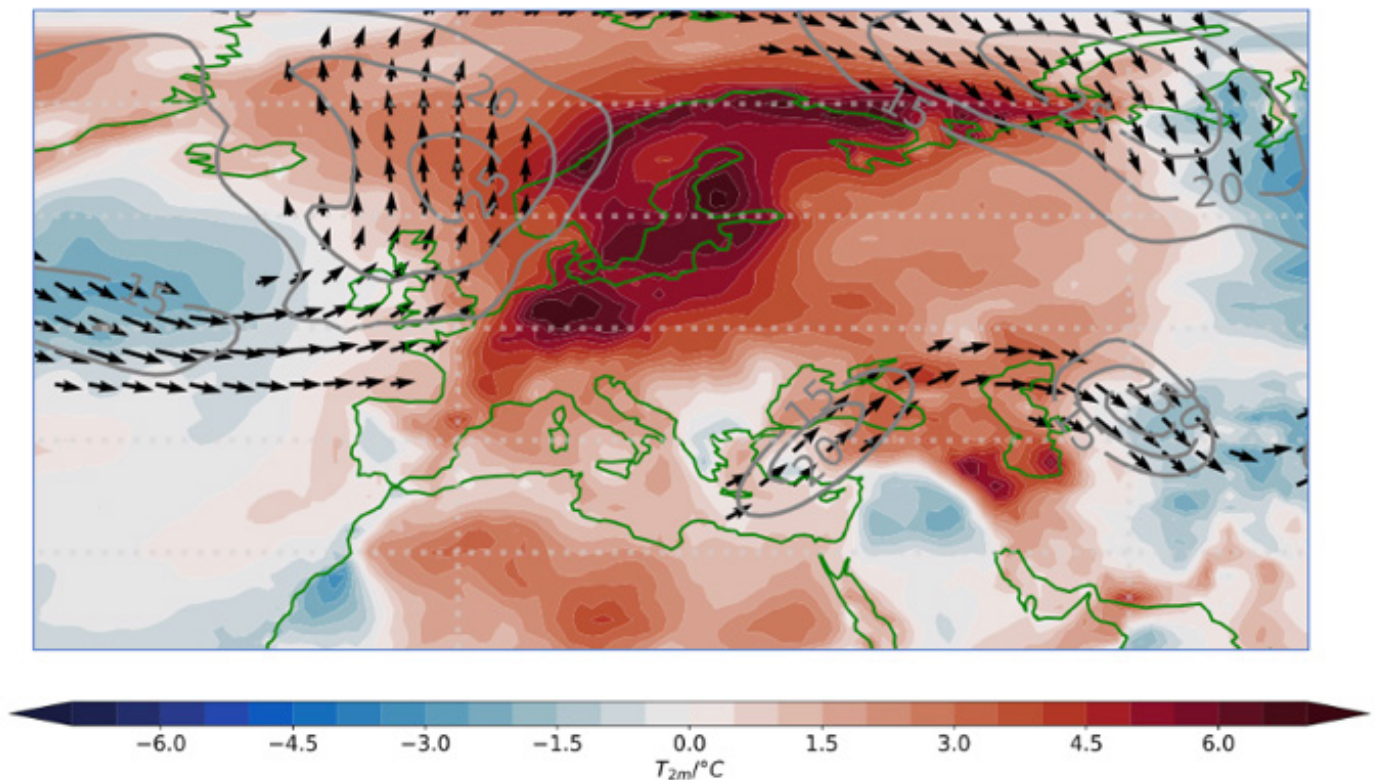


Abb. 1. Hitzewellen bilden sich oft in Regionen mit schwachen Winden. Hier eine Temperaturanomalie (2-Meter-Temperatur in Grad Celsius) in Bezug auf das langjährige Mittel während der Hitzewelle 2018 in Europa (mit Schwerpunkt auf der Woche vom 26. Juli bis 3. August 2018). Die Pfeile zeigen die horizontale Windrichtung auf einer Höhe von etwa 10 km an. (Grafik: Ole Wulff)

len von mehreren Wochen genutzt werden kann (Seo *et al.* 2019). Auch grossräumige Zirkulationsmuster oder Anomalien der Meeresoberflächentemperatur können zu Hitzewellen beitragen (Wulff *et al.* 2017; Duchez *et al.* 2016; McKinnon *et al.* 2016), was die langfristige Vorhersagbarkeit ebenfalls begünstigt.

2.1 Auswirkungen des Klimawandels

Die Häufigkeit und Dauer von Hitzewellen hat seit den 1950er-Jahren fast überall auf der Welt zugenommen (Perkins-Kirkpatrick und Lewis 2020; Russo und Domeisen 2023). Dafür verantwortlich ist der menschengemachte Klimawandel, welcher die Frequenz und Intensität von Hitzewellen erhöht (Seneviratne *et al.* 2021; Perkins *et al.* 2012). Viele der in den letzten Jahren beobachteten Hitzewellen wären ohne menschlichen Einfluss äusserst unwahrscheinlich (IPCC 2021), wie zum Beispiel die sogenannte Pacific Northwest –Hitzewelle von 2021 (Bercos-Hickey *et al.* 2022; McKinnon und Simpson 2022). Der Grund für die starken Auswirkungen des Klimawandels auf Hitzewellen liegt unter anderem darin, dass viele der oben beschriebenen Prozesse und Rückkopplungen, welche Hitzewellen antreiben, durch den Klimawandel verstärkt werden (z.B. Domeisen *et al.* 2023).

2.2 Vorhersage von Hitzewellen auf Zeitskalen von Tagen bis Wochen

Ein breites Spektrum an Mechanismen trägt zur Vorhersagbarkeit von Hitzewellen auf Zeitskalen von Tagen bis Wochen bei. Für Zeiträume von wenigen Tagen müssen in einem Vorhersagesystem die atmosphärische Zirkulation und die entsprechenden lokalen Prozesse korrekt dargestellt sein. Auf längeren Zeitskalen von mehreren Wochen müssen grosskalige und oft auch globale Prozesse hinzugezogen werden. Dazu gehören die oben erwähnten grossflächigen Zirkulationsmuster in der Atmosphäre und an der Ozean- und Erdoberfläche. Diese sogenannten Prediktoren helfen, das Zustandekommen einer warmen Temperaturanomalie und die grosskalige Region einer Hitzewelle vorherzusagen, obwohl der tagesgenaue Beginn und die genaue Intensität häufig erst auf Zeitskalen von 1–2 Wochen vorhergesagt werden können (Pyrina und Domeisen 2023). Abbildung 2 zeigt am Beispiel der gleichzeitig in Europa und Nordamerika auftretenden Hitzewellen im Sommer 2021, wie sich die Vorhersage der Hitzewellen über einen Zeitraum von mehreren Wochen entwickelte. Mehrere Wochen im Voraus lässt sich bereits das Potenzial für mehrere Temperaturanomalien erkennen, aber die Vorhersage der örtlichen Entwicklung und der Intensität ist noch ungenau. Bis zu 1–2 Wochen im Voraus sind dann der Ort der Temperaturanomalien sowie der Hinweis auf Temperaturextre-

me klar ersichtlich. Diese Entwicklung der Vorhersage ist typisch für Hitzewellen, die im Vergleich zu Extremregen oder Stürmen wesentlich besser vorhersagbar sind (Vitart und Robertson 2018; Domeisen *et al.* 2022). Dies gilt sogar für die Schweiz mit ihrer komplexen Topographie (Monhart *et al.* 2018). Es besteht daher das Potenzial, Hitzewellen über die derzeit verwendeten Warnzeiträume hinaus vorherzusagen (siehe Abschnitt 4.1).

3 Hitzewellen in der Schweiz

Als Beispiel für die Auswirkungen von Hitzewellen auf die Schweiz nutzen wir hier die Hitzewelle des Sommers 2022. Dieses Extremereignis wirkte sich stark auf die menschliche Gesundheit, auf Wald- und Wasserökosysteme sowie auf die hochalpine Steinschlaggefahr aus. Die gleichzeitige Trockenperiode führte zu ausgetrockneten Böden, die die Landwirtschaft beein-

trächtigten, sowie zu einem Rückgang der Schifffahrt auf Seen und Flüssen aufgrund niedriger Wasserstände und zu einer Verringerung der Stromerzeugung aus Kernenergie aufgrund von limitiertem Kühlwasser.

3.1 Auswirkungen von Hitzewellen auf Bergregionen

Gebirgsregionen sind vom zunehmenden Auftreten von Hitzewellen besonders betroffen: Wiederkehrende und anhaltende extreme Hitze kann zu Felsstürzen aufgrund des Auftauens von Permafrost sowie zu Gletscherabbrüchen führen (Nötzli und Gruber 2005; Lüthi *et al.* 2015, siehe auch Nötzli *et al.* in diesem Band, S. 35). und Menschenleben gefährden. Zudem haben Hitzewellen in hohen Lagen verheerende Auswirkungen auf Gletscher (Thibert *et al.* 2018). Sie führen zum Beispiel zu langfristigen negativen Auswirkungen auf die Massenbilanz von Gletschern (Dadic *et al.* 2013). Hitzewel-

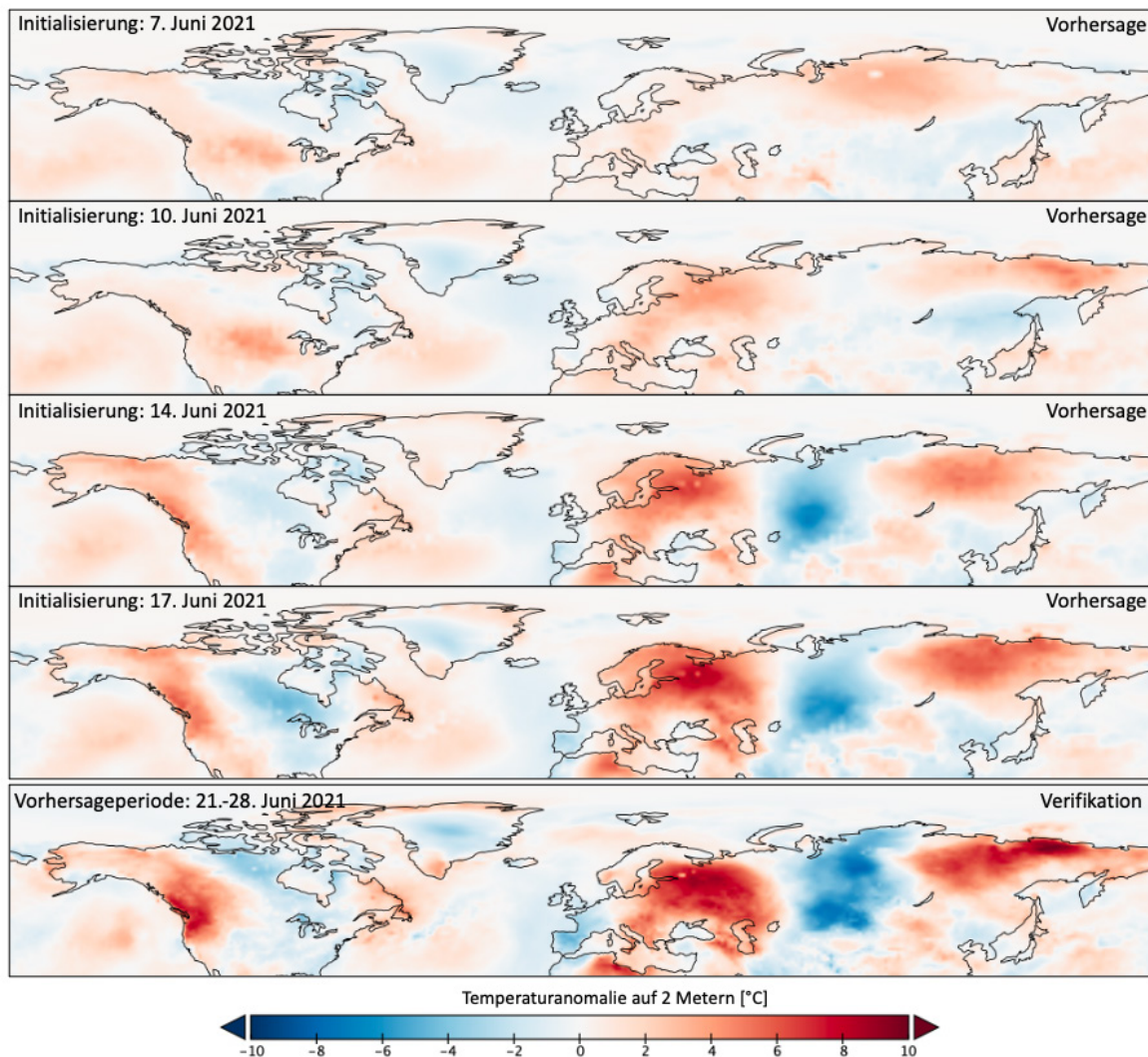


Abb. 2. Entwicklung der Vorhersage gleichzeitig auftretender Hitzewellen. Vorhergesagte Temperaturanomalien (2-Meter-Temperatur in Grad Celsius) für die Hitzeperiode vom 21.–28. Juni 2021, initialisiert am 7., 10., 14., und 17. Juni, sowie die tatsächlichen Temperaturanomalien als Verifikation der Vorhersage in der untersten Grafik. Daten-Vorhersage: ECMWF-Modell. Daten-Reanalyse: ERA5. (Grafik: Modifiziert aus Domeisen *et al.* 2023)

len begünstigen zudem Waldbrände (Schwartz *et al.* 2015, siehe auch Pezzatti *et al.* in diesem Band, S. 61) und können – in Kombination mit weiteren klimatischen Veränderungen – die Gefahr von Naturgefahren erhöhen (Gruber und Häberli 2007; Bunner *et al.* 2024). Dies hat zum Beispiel der Marmolata-Eisfall im Sommer 2022 gezeigt, bei dem in den Dolomiten elf Bergsteiger ums Leben kamen und weitere acht schwer verletzt wurden. Auch die Berge in der Schweiz sind stark betroffen: Gewisse alpine Regionen müssen immer häufiger wegen Steinschlag und anderen temperaturbedingten Gefahren für den Tourismus geschlossen werden. Ganze Dörfer sind durch Steinschlag und Rutschungen gefährdet. Angesichts dieser Folgen könnten verlässliche Hitzewellenwarnungen dazu beitragen, hochgelegene Gebiete in den Bereichen Tourismus (Ebner *et al.* 2021), Infrastruktur, Wasserkraftmanagement mit entsprechenden Naturgefahrenwarnungen vorzubereiten.

3.2 Auswirkungen von Hitzewellen im Schweizer Mittelland

In tieferen Lagen kann die menschliche Gesundheit durch Hitzewellen stark beeinträchtigt werden, was zu Todesfällen, gesundheitlichen Problemen und Arbeitsausfällen führen kann, insbesondere bei der gefährdeten Bevölkerung (siehe Beitrag Huber in diesem Band, S. 31). Im Schweizer Mittelland, aber auch in Gebirgstälern wie dem Wallis, sind die gesundheitlichen Folgen von Hitzewellen am stärksten ausgeprägt. Heutzutage kann fast 1 % aller Todesfälle weltweit direkt auf Hitze zurückgeführt werden, wobei vor allem die ältere Bevölkerung, Menschen mit chronischen Krankheiten, Kinder und schwangere Frauen betroffen sind (Zhao *et al.* 2021). Einer von drei hitzebedingten Todesfällen kann dabei auf den Klimawandel zurückgeführt werden (Vicedo-Cabrera *et al.* 2021). Dieser Effekt wird sich im Zuge des Klimawandels zusammen mit den aktuellen Trends in der Bevölkerungsentwicklung und der Urbanisierung weiter verstärken (Gasparrini *et al.* 2017). Auch in Europa haben die jüngsten Hitzewellen zu einer starken Übersterblichkeit geführt (Fouillet *et al.* 2006; Vicedo-Cabrera *et al.* 2016).

In der Schweiz waren Hitzewellen trotz der Bemühungen um öffentliche Gesundheitsmassnahmen in den letzten zehn Jahren für mehr als 180 Todesfälle pro Jahr verantwortlich (De Schrijver *et al.* 2022). Jüngste Studien für die Schweiz deuten darauf hin, dass Hitze auch für ein erhöhtes Risiko von Krankenhausaufenthalten aufgrund von Herz-Kreislauf-Erkrankungen und psychischen Störungen (Bundo *et al.* 2021; Schulte *et al.* 2021) sowie für Suizide (Bär *et al.* 2022) verantwortlich sein könnte. Hitze hat auch erhebliche Auswirkungen auf die Arbeitsproduktivität (Stalhandske *et al.* 2022), zum Beispiel für Menschen, die keinen Zugang zu Klimaanlage haben oder im Freien arbeiten, wie im Infrastruktur- oder Landwirtschaftssektor (Casanueva *et al.* 2020).

4 Vorbereitung auf Hitzewellen

Da Hitzewellen im Zuge des Klimawandels noch häufiger auftreten werden, ist es von entscheidender Bedeutung, ihr Auftreten verlässlich vorhersagen zu können und die betroffenen Sektoren und die Bevölkerung rechtzeitig zu warnen. Zu den kurzfristigen Vorbereitungsmaßnahmen auf Zeitskalen von Tagen bis Wochen gehören die Bereitstellung von Kühlzentren, die Kontaktaufnahme mit der gefährdeten Bevölkerung, die Bereitstellung von Trinkwasser oder die zeitliche Planung und Verlegung von Arbeiten im Freien. Eine längere Vorlaufzeit durch eine frühzeitige Information oder Warnung kann einer Gemeinde helfen, sich besser auf Hitzewellen vorzubereiten. Es ist dabei wichtig, dass Warnungen über die reine Vorhersage der Hitzeextreme hinausgehen, sondern auch die Auswirkungen berücksichtigen (Merz *et al.* 2020; White *et al.* 2017; 2022). Auf grösseren Zeitskalen, von Monaten bis Jahren, müssen Aktionspläne für den Hitzeschutz ausgearbeitet werden, um sicherzustellen, dass die Verantwortlichen rechtzeitig die entsprechenden Massnahmen ergreifen können. Auf Zeitskalen von mehreren Jahren müssen schliesslich städtebauliche Massnahmen getroffen und Gebäude entsprechend aus- oder umgerüstet werden.

4.1 Hitzewarnungen in der Schweiz

Nach der europäischen Hitzewelle im Sommer 2003 haben die kantonalen Behörden in der Schweiz Strategien zum Schutz der Bevölkerung vor extremer Hitze umgesetzt. Allerdings haben nur die Kantone Genf, Waadt und Tessin (Burgstall *et al.* 2021) umfassende Hitzewarnpläne eingeführt. Diese haben dazu beigetragen, gesundheitliche Beeinträchtigungen in diesen Kantonen zu reduzieren. Somit ist aber weiterhin ein grosser Teil der Schweizer Bevölkerung nicht ausreichend vor Hitze geschützt, da diese Regionen ausschliesslich auf die auf nationaler Ebene definierten Gesundheitsmassnahmen (z.B. Hitzewarnungen von MeteoSchweiz, siehe Huber 2025 in diesem Band, S. 31) angewiesen sind und daher keinen Zugang zu regional ausgearbeiteten Hitzeaktionsplänen haben (Ragetti und Rösli 2019).

Die gesellschaftlichen Auswirkungen von Hitzewellen könnten durch regionenspezifische Warnungen weiter abgemildert werden. Normalerweise werden Hitzewellenwarnungen in der Schweiz rund 24 Stunden im Voraus herausgegeben. Falls die Vorhersagbarkeit eine ausreichend sichere Aussage erlaubt, werden Warnprognosen der Öffentlichkeit – und in leicht abgewandelter Form den Behörden – bis zu 120 Stunden im Voraus zur Verfügung gestellt. Es muss aber überprüft werden, ob die hohe Vorhersagbarkeit speziell von Hitzewellen einen noch längeren Warnhorizont erlaubt. Verbesserungen bei der langfristigen Vorhersage von Hitzewellen können zudem Informationen für die Vorhersage von Trockenheit liefern (Scherrer *et al.*

2022), speziell für das in Vorbereitung befindliche nationale System zur Früherkennung und Warnung des Bundes vor Trockenheit. Das entsprechende Vorhersagesystem für Trockenheit wird seitens MeteoSwiss, Swisstopo und BAFU im Mai 2025 lanciert, um handlungsrelevante Informationen über Trockenheitsrisiken mehrere Wochen im Voraus zu liefern (siehe Beitrag Zappa *et al.* in diesem Band, S. 13 und Bjørnsen *et al.*, S. 87).

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Wir verstehen mittlerweile gut, wie Hitzewellen zustande kommen, sehen aber bei den lokalen und regionalen Entstehungsprozessen für Hitzewellen Potenzial für ein besseres Verständnis. Das Gleiche gilt für den Einfluss von Fernwirkungen, welche für die langfristigen Prognosen von mehreren Wochen bis Monaten notwendig sind. Insgesamt ist jedoch klar, dass Hitzewellen durch den Klimawandel stark zunehmen und eine Vorbereitung auf Hitzewellen deshalb unabdingbar ist. Durch die hohe Vorhersehbarkeit von Hitzewellen, die weit über den aktuellen operationellen Warnhorizont von wenigen Stunden bis Tagen hinaus geht (siehe Abschnitt 4.1), wäre es grundsätzlich möglich, Warnungen auch auf längeren Zeithorizonten herauszugeben. Es ist daher dringend notwendig zu verstehen, ob und mit wieviel Vorlaufzeit solche Warnungen in Zukunft auch auf längeren Zeitskalen von mehreren Tagen bis Wochen herausgegeben werden können und sollen, welche Konsequenzen solche Warnungen für die Bevölkerung in der Schweiz haben und welche Massnahmen und Anpassungen solche Warnungen in den verschiedenen Sektoren bewirken.

Während die Schweiz gut gerüstet ist, was die Auswirkungen des Klimawandels und die Vorhersage von Extremereignissen betrifft, können die entsprechenden Warnungen und der Warnhorizont noch weiter verbessert werden, sowohl seitens der Forschung, als auch seitens der Behörden. Es ist daher wichtig, das Verständnis von Hitzewellen, deren Vorhersage sowie die Vorhersage ihrer Auswirkungen rasch voranzutreiben. Nur so können wir kurz- und mittelfristig mit den klimabedingten Veränderungen Schritt halten und die negativen Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölkerung möglichst gering halten. Langfristig kann aber nur eine Senkung der Treibhausgasemissionen auf Null dafür sorgen, dass der Klimawandel gestoppt wird und seine Auswirkungen nicht aus dem Ruder laufen, während wir uns an die bereits realisierten Änderungen anpassen.

6 Literatur

- Allen C.D., Breshears D.D., McDowell N.G. (2015) On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere* 6: 1–55
- Auffhammer M., Baylis P., Hausman C.H. (2017) Climate change is projected to have severe impacts on the frequency and intensity of peak electricity demand across the United States. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114: 1886–1891.
- Bär S., Bundo M., de Schrijver E., Müller T., Vicedo Cabrera A.M. (2022) Suicides and ambient temperature in Switzerland: A nationwide time-series analysis. *Swiss medical weekly*, 152 (w30115).
- Benthuyssen J.A., Oliver E.C.J., Chen K., Wernberg T. (2020) Editorial: Advances in Understanding Marine Heatwaves and Their Impacts. *Front. Marine Sci.* 7: 1301.
- Bercos-Hickey E., O'Brien T.A., Wehner M.F., Zhang L., Patricola C.M., Huang, H. ... (2022) Anthropogenic contributions to the 2021 Pacific Northwest heatwave. *Geophys. Res. Lett.* 49: 23, e2022GL099396.
- Bezák N., Mikoš M. (2020) Changes in the compound drought and extreme heat occurrence in the 1961–2018 period at the European scale. *Water* 12, 12: 3543.
- Bieli M., Pfahl S., Wernli H. (2015) A Lagrangian investigation of hot and cold temperature extremes in Europe. *Quarterly J. Royal Meteorol. Soc.* 141, 686: 98–108.
- Bjørnsen A., Fischer A., Hüsler F., Lienert C., McCarthy M., Muccione V., Rüegger M. (2025) Dialog zur Bewältigung extremer Trockenheit in der Schweiz. In: Bjørnsen A. (Red.) *Forum für Wissen 2025: Extremes*. WSL Ber. 164, 87–98.
- Bloomfield H., Suitters C., Drew D. (2020) Meteorological drivers of European power system stress. *J. Renew. Energy* 2020.
- Brás T.A., Seixas J., Carvalhais N., Jägermeyr J. (2021) Severity of drought and heatwave crop losses tripled over the last five decades in Europe. *Environ. Res. Lett.*
- Brunner M., Jacquemart M., Weber S. (2024) Wie verändern sich Risiken im Alpenraum in Bezug auf hydrologische und gravitative Naturgefahren? *For. Wiss.* 157: 21–24. doi.org/10.55419/wsl:38150
- Bundo M., de Schrijver E., Federspiel A., Toreti A., Xoplaki E., Luterbacher J., ... (2021) Ambient temperature and mental health hospitalizations in Bern, Switzerland: A 45-year time-series study. *PloS one*, 16: 10, e0258302.
- Burgstall A., Fontannaz L., Gaia M., Gehrig R., Graf U., Gubler S., ... (2021) Von den Warnungen bis zur Klimatologie – das Thema Hitze an der Meteo-Schweiz, Kapitel 6: Les interactions avec les autorités cantonales (Cantons de Genève, Vaud et Tessin), *Fachbericht MeteoSchweiz*, 276: 65.
- Campbell S., Remenyi T.A., White C.J., Johnston F.H. (2018) Heatwave and health impact research: A global review. *Health & Place* 53: 210–218.
- Casanueva A., Kotlarski S., Fischer A.M., Flouris A.D., Kjellstrom T., Lemke B., ... (2020) Escalating environmental summer heat exposure – a future threat for the European workforce. *Reg. Environ. Chang.* 20, 2: 1–14. doi.org/10.1007/s10113-020-01625-6

- Dadic R., Mott R., Lehning M., Carenzo M., Anderson B., Mackintosh A. (2013) Sensitivity of turbulent fluxes to wind speed over snow surfaces in different climatic settings. *Adv. Water Res.* 55: 178–189, doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.06.010
- De Schrijver E., Bundo M., Ragettli M.S., Sera F., Gasparrini A., Franco O.H., ... (2022) Nationwide analysis of the heat-and cold-related mortality trends in Switzerland between 1969 and 2017: the role of population aging. *Environ. health perspec.* 130, 3: 037001.
- Domeisen D.I.V., White C.J., Muñoz Á.G., Hilla Afargan-Gerstman H. (2022) Advances in the subseasonal prediction of extreme events: Relevant case studies across the globe. *Bull. American Meteorol. Soc.* doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0221.1
- Domeisen D.I.V., Eltahir E.A., Fischer E.M., Knutti R., Perkins-Kirkpatrick S.E., Schär C., ... (2023) Prediction and projection of heatwaves. *Nat. Rev. Earth Environ.* 4, 1: 36–50.
- Duchez A., Frajka-Williams E., Josey S.A., Evans D.G., Grist J.P., Marsh R., ... (2016) Drivers of exceptionally cold North Atlantic Ocean temperatures and their link to the 2015 European heat wave. *Environ. Res. Lett.* 1: 074004, doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074004
- Ebi K.L., Capon A., Berry P., Broderick C., de Dear R., Prof Havenith G., ... (2021) Hot weather and heat extremes: health risks. *The Lancet* 398: 698–708.
- Ebner P.P., Premier V., Koch F., Marin C. (2021) Evaluating a prediction system for snow management. *Cryosphere* 15, 8: 3949–3973. doi.org/10.5194/tc-15-3949-2021
- Fouillet A., Rey G., Laurent F., Pavillon G., Bellec S. (2006) Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. *International archives of occupational and environmental health* 80, 16–24.
- Gasparrini A., Guo Y., Sera F., Vicedo-Cabrera A.M., Huber V., Tong S., ... (2017) Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. *The Lancet Planetary Health* 1, 9: e360–e367.
- Gruber S., Haeberli W. (2007) Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *J. Geophys. Res-Earth* 112, F2. doi.org/10.1029/2006JF000547
- Hao Z., Hao F., Singh V.P., Zhang X. (2018) Changes in the severity of compound drought and hot extremes over global land areas. *Enviro. Res. Lett.* 13, 12: 124022.
- Hoegh-Guldberg O., Jacob D., Taylor T., Bindi M., Brown S. (2018) Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems. In *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. In: Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.-O., Roberts D., Skea J., ... (eds.). In Press. (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018).
- Huber N. (2025) Auswirkungen der Hitze auf die Gesundheit. In: Björnson A. (Red.) *Forum für Wissen 2025: Extremes*. WSL Ber. 164, 31–34.
- IPCC (2021) Summary for Policymakers. In: Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., ... (eds.) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Jiménez-Estevé B., Domeisen D.I. (2022) The role of atmospheric dynamics and large-scale topography in driving heatwaves. *Quarterly J. Royal Meteorol. Society.* 148, 746: 2344–2367.
- Libonati R., Geirinhas J.L., Silva P.S., Russo A., Rodrigues J.A., (2022) Assessing the role of compound drought and heatwave events on unprecedented 2020 wildfires in the pantanal. *Environ. Res. Lett.* 17: 015005
- Lüthi R., Gruber S., Raveland L. (2015) Modelling transient ground surface temperatures of past rockfall events: towards a better understanding of failure mechanisms in changing periglacial environments. *Geografiska Annaler: Series A, Phys. Geogr.* 97, 4: 753–767.
- McKinnon K.A., Rhines A., Tingley M.P., Huybers P. (2016) Long-lead predictions of eastern United States hot days from Pacific sea surface temperatures. *Nat. Geosci.* 9: 389–394. doi.org/10.1038/ngeo2687
- McKinnon K.A., Simpson I.R. (2022) How unexpected was the 2021 Pacific Northwest heatwave? *Geophys. Res. Lett.* 49, 18: e2022GL100380.
- Merz B., Kuhlicke C., Kunz M., Pittore M., Babeyko A., ... (2020) Impact Forecasting to Support Emergency Management of Natural Hazards. *Rev. Geophys.* doi.org/10.1029/2020RG000704
- Miralles D.G., Gentile P., Seneviratne S.I., Teuling A.J. (2019) Land-atmospheric feedbacks during droughts and heatwaves: state of the science and current challenges. *Annals New York Acad. Sci.* 1436, 1: 19–35.
- Monhart S., Spirig C., Bhend J., Bogner K., Schär C., Liniger M.A. (2018) Skill of subseasonal forecasts in Europe: Effect of bias correction and downscaling using surface observations. *J. Geophys. Res.: Atmospheres* 123, 15: 7999–8016.
- Nguyen M., Wang X., Chen D. (2010) An investigation of extreme heatwave events and their effects on building and infrastructure.
- Nötzli J., Gruber S. (2005) Alpinen Permafrost–ein Überblick. *Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt* 70: 111–121.
- Nötzli J., Peter A., Hählen N., Phillips M. (2025) Verborgenes Eis in den Schweizer Alpen: der Permafrost taut immer schneller. In: Björnson A. (Red.) *Forum für Wissen 2025: Extremes*. WSL Ber. 164, 35–47.
- Perkins S., Alexander L., Nairn J. (2012) Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells. *Geophys. Res. Lett.* 39.
- Perkins-Kirkpatrick S., Lewis S. (2020) Increasing trends in regional heatwaves. *Nat. commun.* 11: 1–8.
- Pezzatti G.B., Conedera M., Ferrioli D., Ghiringhelli A., Ballmer M., Beyeler S. (2025) Waldbrände im Klimawandel: ist die Schweiz bereit? In: Björnson A. (Red.) *Forum für Wissen 2025: Extremes*. WSL Ber. 164, 61–72.

- Pfahl S., Wernli H. (2012) Quantifying the relevance of atmospheric blocking for co-located temperature extremes in the Northern Hemisphere on (sub-) daily time scales. *Geophys. Res. Lett.* 39: 12.
- Pyrina M., Domeisen D.I. (2023) Subseasonal predictability of onset, duration, and intensity of European heat extremes. *Quarterly J. Royal Meteorol. Soc.* 149, 750: 84–101.
- Ragettli M.S., Rösli M. (2019) Hitzeaktionspläne zur Prävention von hitzebedingten Todesfällen-Erfahrungen aus der Schweiz. *Bundesgesundheitsblatt-Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz* 62, 5: 605–611.
- Raymond C., Matthews T., Horton R.M. (2020) The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance. *Sci. adv.* 6, eaaw1838
- Russo E., Domeisen D.I. (2023) Increasing intensity of extreme heatwaves: the crucial role of metrics. *Geophys. Res. Lett.* 50, 14: e2023GL103540.
- Ribeiro A.F.S., Russo A., Gouveia C.M., Páscoa P., Zscheischler J. (2020) Risk of crop failure due to compound dry and hot extremes estimated with nested copulas. *Biogeosc.* 17: 4815–4830.
- Scherrer S.C., Hirschi M., Spirig C., Maurer F., Kotlarski S. (2022) Trends and drivers of recent summer drying in Switzerland. *Environ. Res. Commun.* 4, 2: 025004.
- Schulte F., Rösli M., Ragettli M.S. (2021) Heat-related cardiovascular morbidity and mortality in Switzerland: a clinical perspective. *Swiss medical weekly*, 37.
- Schwartz M.W., Butt N., Dolanc C.R., Holguin A., Moritz M.A., M. P. North, H. D. Safford, N. L. Stephenson, J. H. Thorne, van Mantgem P.J. (2015) Increasing elevation of fire in the Sierra Nevada and implications for forest change. *Ecosphere* 6: 7.
doi.org/10.1890/ES15-00003.1
- Seneviratne S.I., Corti T., Davin E.L., Hirschi M., Jaeger E.B. (2010) Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth Sci. Rev.* 99: 125–161.
- Seneviratne S.I., Zhang X., Adnan M., Badi W., Dereczynski C., Luca A.D., ... (2021) Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In: Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., ... (eds.) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, S. 1513–1766.
doi.org/10.1017/9781009157896.013
- Seo E., Lee M.I., Jeong J.H., Koster R.D., Schubert S.D., Kim H.M., ... (2019) Impact of soil moisture initialization on boreal summer subseasonal forecasts: mid-latitude surface air temperature and heat wave events. *Climate dynamics* 52: 1695–1709.
- Stalhandske Z., Nesa V., Zumwald M., Ragettli M.S., Galimshina A., Holthausen N., ... (2022) Projected Impact of Heat on Mortality and Labour Productivity under Climate Change in Switzerland. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 22, 2531–2541.
- Thibert E., Sielenou P.D., Vionnet V., Eckert N., Vincent C. (2018) Causes of Glacier Melt Extremes in the Alps Since 1949. *Geophys. Res. Lett.* 45, 2: 817–825.
doi.org/10.1002/2017gl076333
- Vicedo-Cabrera A.M., Scovronick N., Sera F., Royé D., Schneider R., Tobias A., ... (2021) The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nat. clim. chang.* 11, 6: 492–500.
- Vicedo-Cabrera A.M., Ragettli M.S., Schindler C., Rösli M. (2016) Excess mortality during the warm summer 2015 in Switzerland. *SMW* 146:w14379.
- Vitart F., Robertson A.W. (2018) The sub-seasonal to seasonal prediction project (s2s) and the prediction of extreme events. *npj Clim. Atmosph. Sci.* 1, 1–7.
- White C., Domeisen D.I.V., Acharya N., Adefisan E.A., Anderson M.L., Aura S., ... (2022) Advances in the application and utility of subseasonal-to-seasonal predictions. *Bull. American Meteorol. Soc.*
doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0224.1
- White C.J., Carlsen H., Robertson A.W., Klein R.J.T., Lazo J.K. (2017) Potential applications of subseasonal-to-seasonal (S2S) predictions. *Meteorol. Appl.* 24: 315–325.
- Wulff C.O., Greatbatch R.J., Domeisen D.I.V., Gollan G., Hansen F. (2017) Tropical forcing of the summer East Atlantic pattern. *Geophys. Res. Lett.* 44: 1083–1088.
doi.org/10.1002/2017GL075493
- Zappa M., Nikolaus Karger D., Hüsler F. (2025) EXtreme Trockenheit in der Schweiz: Regionale und lokale Perspektiven einer globalen Herausforderung. In: Bjørnsen A. (Red.) *Forum für Wissen 2025: Extremes*. WSL Ber. 164, 13–21.
- Zhao Q., Guo Y., Ye T., Gasparrini A., Tong S., Overcenco A., ... (2021) Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modelling study. *The Lancet Planetary Health* 5, 7: e415–e425.
- Zscheischler J., Martius O., Westra S., Bevacqua E., Raymond C., Horton R.M., ... (2020) A typology of compound weather and climate events. *Nat. Rev. Earth Environ.* 1–15
- Zschenderlein P., Fink A.H., Pfahl S., Wernli H. (2019) Processes determining heat waves across different European climates. *Quarterly J. Royal Meteorol. Soc.* 145, 724: 2973–2989.

Danksagung

Daniela Domeisen dankt Ana Vicedo-Cabrera (Uni Bern) für hilfreiche Diskussionen über die gesundheitlichen Auswirkungen von Hitze, Michael Lehning (EPFL/SLF) für Diskussionen zu alpinen Risiken von Hitzewellen, Saskia Willemse und Irina Mahlstein (MeteoSchweiz) für Diskussionen zum Thema Hitzewarnungen der MeteoSchweiz, Adel Imamovic und Christoph Spirig (MeteoSchweiz) für Diskussionen zur Vorhersage von Hitze und Dürre in der Schweiz, und Maria Pyrina (ECMWF/ETHZ) und Dominik Büeler (MeteoSchweiz/ETHZ) für die Zusammenarbeit im Rahmen des Projekts «HEATaware» wp.unil.ch/atmos/projects/heataware, dem CROSS-Programm für finanzielle Unterstützung für diese Forschung, sowie Matthias Röthlisberger, Gian-Kasper Plattner und Astrid Bjørnsen für hilfreiche Kommentare zu diesem Artikel.

Abstract

Heatwaves in a changing climate: Are we prepared?

Heatwaves pose a major challenge worldwide, partly because these extreme events can have serious impacts on human health. Climate change has greatly increased the intensity, duration and frequency of heatwaves in most regions of the world. Simulations with climate models project that the further increase in greenhouse gases in the atmosphere, such as CO₂, will make such extremes even more likely. In order to reduce the negative effects of heatwaves, it is therefore important to be able to predict the occurrence of heatwaves on different time scales. With the help of such predictions, people at risk and affected sectors can be warned at an early stage and appropriate measures can be taken. While predictions and warnings of heatwaves can save lives in the short term, only climate change mitigation will reduce the consequences of heatwaves for people, infrastructure and ecosystems in the long term»

Keywords: Heatwaves, forecast, climate change, health, warning



Diese Publikation ist Open Access und alle Texte und Fotos, bei denen nichts anderes angegeben ist, unterliegen der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0. Sie dürfen unter Angabe der Quelle frei vervielfältigt, verbreitet und verändert werden.