



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz

MeteoSchweiz

Fachbericht MeteoSchweiz Nr. 276

Von den Warnungen bis zur Klimatologie – das Thema Hitze an der MeteoSchweiz

MeteoSchweiz



ISSN: 2296-0058

Fachbericht MeteoSchweiz Nr. 276

Von den Warnungen bis zur Klimatologie – das Thema Hitze an der MeteoSchweiz

MeteoSchweiz

Redaktion

Annkatriin Burgstall, Marco Gaia, Regula Gehrig

Autoren

Annkatriin Burgstall, Lionel Fontannaz, Marco Gaia, Regula Gehrig, Urs Graf, Stefanie Gubler, Sven Kotlarski, Daniel Murer, Thomas Schlegel, Cornelia Schwierz, Christoph Spirig

Empfohlene Zitierung:

MeteoSchweiz: 2021, Von den Warnungen bis zur Klimatologie – das Thema Hitze an der MeteoSchweiz, *Fachbericht MeteoSchweiz*, **276**, 65 pp.

Herausgeber:

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz, © 2016

MeteoSchweiz

Operation Center 1
CH-8044 Zürich-Flughafen
T +41 58 460 99 99
www.meteoschweiz.ch

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht ist im Rahmen des MeteoSchweiz internen Projektes «Hitze» (Laufzeit 2019 - 2021) entstanden und fasst die Tätigkeiten und Projekte zusammen, die in den letzten 10 - 15 Jahren an der MeteoSchweiz zum Thema Hitze durchgeführt wurden. Hauptziel des Projektes «Hitze» war es, das Hitzewarnsystem zu überprüfen und neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen anzupassen. Weiter ist ein koordiniertes Vorgehen hinsichtlich der verschiedenen Tätigkeiten an der MeteoSchweiz, inkl. der Aktivitäten zur Koordination mit anderen Bundes- oder kantonalen Ämtern zum Thema Hitze zu ermöglichen. Dies umfasst vor allem eine einheitliche Analyse und Kommunikation der Warnungen und der Klimatologie.

Hitze gilt als ernstzunehmende Naturgefahr, sowohl für die Gesundheit des Menschen als auch für die Infrastruktur und die gesamte Biosphäre. In der Schweiz und in vielen weiteren Teilen der Erde nahm die Hitzebelastung in den letzten Jahrzehnten stark zu. Die IPCC-Klimaszenarien wie auch die CH2018-Klimaszenarien prognostizieren für die Zukunft noch häufigere und intensivere Hitzewellen.

Zahlreiche nationale Wetterdienste betreiben Hitzewarnsysteme, um die Bevölkerung frühzeitig vor einer anstehenden Hitzebelastung warnen und dementsprechend schützen zu können. MeteoSchweiz gibt seit 2004 / 2005 Hitzewarnungen für zwei Warnstufen auf Basis des *Heat Index* heraus, einer kombinierten Grösse aus Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Hierfür stehen den Prognostikern verschiedene numerische und technische Hilfsmittel zur Verfügung. Der verwendete *Heat Index* ist prinzipiell ein geeigneter Hitzeindikator und ermöglicht robuste Warnungen. Dennoch sind mit diesem bisherigen Hitzewarnkonzept einige Nachteile verbunden. Das Konzept wurde im 2004 / 2005 entwickelt und berücksichtigt somit nicht die neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse zur hitzebedingten Mortalität oder zum Einfluss der Nachttemperaturen und sehr kurzer, intensiver Wärmeperioden auf die Gesundheit. Diese Aspekte haben zu einer kritischen Analyse des Hitzewarnsystems geführt. In Zusammenarbeit mit dem Swiss TPH wurde schliesslich die Tagesmitteltemperatur aufgrund der neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse als neuer Hitzeindikator für Warnungen ab 2021 ausgewählt. Mit der Einführung einer Stufe 2 Warnung wird neu auch vor kurzen Hitzebelastungen gewarnt.

Oft sind Hitzewarnsysteme auch an konkrete Hitzemassnahmenpläne geknüpft, was als Hitze-Gesundheits-Warnsystem zusammengefasst wird. In der Schweiz haben die Kantone Genf, Waadt, Freiburg, Neuenburg, Wallis und Tessin ein solches Hitze-Gesundheits-Warnsystem auf Basis der Hitzewarnungen von MeteoSchweiz implementiert. Ein Blick auf verschiedene Nachbarländer der Schweiz zeigt, dass zahlreiche Länder wie Deutschland, Österreich, Frankreich und Italien ebenfalls ein Hitze-Gesundheits-Warnsystem betreiben. Die eigentlichen Hitzewarnungen basieren in diesen Ländern mindestens auf den Variablen Temperatur und Luftfeuchtigkeit, in einigen Ländern werden auch die Windgeschwindigkeit und die Strahlungstemperatur sowie nicht-meteorologische oder physiologische Grössen berücksichtigt.

MeteoSchweiz erstellt verschiedene interne und externe Dienstleistungen zum Thema Hitze, die sowohl als Unterstützung für den Prognosedienst als auch für klimatologische Analysen und die Klimainformation dienen. Beispiele solcher internen Produkte sind die automatisierten Analysen der intensivsten Hitzewellen ab einer bestimmten Dauer oder die empirische Einordnung der täglichen Tagesmittel-, Minimum- und Maximumtemperaturen. Externe Produkte umfassen beispielsweise massgeschneiderte Hitzeprognosen, welche auf Anfrage der kantonalen Behörden von MeteoSchweiz erstellt werden. Aus der Userperspektive von Romandie und Tessin wird deutlich, dass die kantonalen Behörden die wissenschaftliche Begleitung und die Expertise des nationalen Wetterdienstes schätzen. Dies sowohl in der «Planungsphase» hinsichtlich der Definition von Hitzeschutzmassnahmen, als auch während eines Hitzeereignisses, um die Massnahmen zeitgerecht einzusetzen.

Dass das Thema Hitze nicht nur im Warnkontext, sondern auch aus klimatologischer Sicht sehr relevant ist, zeigen die entsprechenden Analysen, die in den letzten Jahren erarbeitet wurden. Diese umfassen auf der einen Seite die zeitliche Entwicklung vergangener Hitzewellen und -ereignisse, beispielsweise im Hinblick auf Häufigkeits- und Intensitätsanalysen heisser Tage und Perioden oder als empirische Einordnung von extremen Temperaturen. Auf der anderen Seite beinhalten die klimatologischen Analysen auch den Blick in die Zukunft bis Ende des 21. Jahrhunderts. Letztere werden unter anderem mithilfe von Klimaszenarien wie den Schweizer Klimaszenarien CH2011 und CH2018 für verschiedene Hitzeindizes verwirklicht, welche eine starke Zunahme der Hitzebelastung in der Schweiz prognostizieren.

Hitzestress stellt eine potenziell grosse gesundheitliche Gefahr für die arbeitende Bevölkerung dar. Daneben kann Hitzestress am Arbeitsplatz auch die wirtschaftliche Produktionsfähigkeit von Unternehmen in vielen Branchen negativ beeinflussen. Um die arbeitende Bevölkerung gezielt und frühzeitig vor einer Hitzebelastung zu schützen und potentielle Produktionseinbussen zu mindern, wurde im Rahmen des europäischen HEAT-SHIELD Projektes neben Klimaszenarien der Hitzebelastung ein Hitze-Früherkennungssystem auf europäischer Skala (Prototyp) entwickelt. Das System erlaubt eine personalisierte Hitzestressvorhersage und gibt Empfehlungen zur besseren Hitzebewältigung am Arbeitsplatz.

Besonders betroffen von starker Hitzebelastung sind die Menschen in den Städten, da sich die meist dicht bebauten städtischen Gebiete überdurchschnittlich stark erhitzen (städtischer Wärmeineleffekt). Basierend auf städtischen und ländlichen Messstationen aus verschiedenen nationalen, kantonalen und universitären Messnetzen wurde die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel in den Städten Basel, Bern, Genf, Lausanne und Zürich genauer analysiert. Ergebnisse zeigen deutlich höhere Werte in den Städten während des ganzen Jahres für alle untersuchten Stationen. Besonders stark ausgeprägt ist der Stadt-Land-Temperaturgradient im Sommer, vor allem in der Nacht.

Im Rahmen des Projektes «Hitze» wurde eine Vergleichsstudie mit verschiedenen potentiellen Hitzeindikatoren für das neue Hitzewarnsystem durchgeführt. Dabei wurden die Unterschiede zu den Hitzewarnungen mit dem *Heat Index* aufgezeigt

Abstract

The present report originates from the MeteoSwiss internal project «heat» (duration 2019 - 2021) and summarizes the activities and projects that were carried out at MeteoSwiss on the subject of heat over the last 10 - 15 years. The main objective of the heat project was to review the heat warning system and adapt it to new scientific findings. Moreover, the project aims at a coordinated approach to the various heat activities at MeteoSwiss, including the coordination with other federal or cantonal offices on the subject of heat. This especially includes a uniform analysis and communication of heat warnings and heat climatology.

Heat is considered a serious natural hazard, for human health, infrastructure and the entire biosphere. In Switzerland and in many other parts of the world, heat stress has strongly increased in recent decades. The IPCC climate scenarios as well as the CH2018 climate scenarios predict even more frequent and intense heat waves in the future.

Numerous national weather services operate heat warning systems to warn the population of imminent heat stress at an early stage and to protect them accordingly. Since 2004 / 2005 MeteoSwiss has been issuing heat warnings for two warning levels based on the heat stress index *Heat Index*, a combined measure of temperature and humidity. For this purpose, forecasters have various numerical and technical tools at hand. The indicator *Heat Index* is generally considered to perform well and enables robust warnings. Nevertheless, there are some disadvantages associated with this former heat warning concept. It was developed in 2004 / 2005 and does not take into account new scientific findings on heat-related mortality (for example the influence of nighttime temperatures and of very short, intense heat periods on health). These aspects led to a critical analysis of the current heat warning system. In collaboration with Swiss TPH, the daily mean temperature was selected as the new indicator for the heat warnings from summer 2021, as it takes into account new scientific findings. By introducing a new level 2 warning, also short and intense heat periods will be warned.

Heat warning systems are often linked to specific heat action plans; together, they form a so-called heat-health warning system. In Switzerland, the cantons of Geneva, Vaud, Fribourg, Neuchâtel, Valais and Ticino have implemented such a heat-health warning system based on the heat warnings of MeteoSwiss. Also various neighboring countries of Switzerland such as Germany, Austria, France and Italy operate a heat-health warning system. The heat warnings in these countries are based on the variables temperature and humidity. In some of them, also wind speed and radiation as well as non-meteorological or physiological variables are taken into account.

MeteoSwiss offers various internal and external services on the subject of heat, supporting not only the forecasting service but also the climate information and climatological analyses. Examples of such internal products are the automated analyses of the most intensive heat waves of a certain duration or the empirical classification of daily mean, minimum and maximum temperatures. External products include, for example, user-tailored heat predictions produced by MeteoSwiss on demand of cantonal authorities. From the user perspective of Western Switzerland and Ticino it becomes clear that the cantonal authorities appreciate the scientific support and expertise of MeteoSwiss. This is true in the «planning phase» with regard to the definition of heat protection measures, as well as during the actual heat event to implement these measures in good time.

Various analyses carried out in recent years show that the heat topic is relevant both in a warning context but also from a climatological point of view. These analyses comprise not only the temporal development of past heat events, for example with regard to their frequency and intensity or in terms of an empirical classification of extreme temperatures. They also include a glimpse into the future until the end of the 21st century. The developed climate scenarios (Swiss climate scenarios CH2011 and CH2018) for various heat indices suggest a strong increase of heat stress in Switzerland.

Heat affects the health and productivity of the working population and can undermine a company's competitiveness in many industries. In order to protect the working population from heat stress and to reduce potential productivity losses, the European project HEAT-SHIELD has developed both a heat warning system on the European scale (prototype) as well as heat stress climate projections. The warning system allows for a personalized heat stress forecast and gives recommendations for better heat management at the workplace.

People living in urban locations are particularly affected by high heat stress, as temperatures in urban environments are generally higher compared to their rural surroundings (i.e. urban heat island effect). The urban heat island characteristics in the cities of Basel, Bern, Geneva, Lausanne and Zurich were analyzed in detail based on urban and rural weather stations from various national, cantonal and university measuring networks. Results show significantly higher values in urban areas throughout the year for all analyzed stations. The urban-rural temperature gradient is particularly pronounced during summer, especially at nighttime.

As part of the "heat" project, a comparative study was carried out, considering different potential heat indicators for the new heat warning system. The study points out the differences in the heat warnings compared to the warnings based on the *Heat Index*.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	V
Abstract	VII
1 Einführung	1
2 Hitzewarnungen im internationalen Kontext	3
2.1 Hitze-Gesundheits-Warnsysteme	3
2.2 Deutschland	4
2.3 Österreich	4
2.4 Frankreich	5
2.5 Italien	6
3 Hitzewarnungen bei MeteoSchweiz von 2004 bis 2020	9
3.1 Heat Index als Hitzeindikator	10
3.2 Die Warnstufen	11
3.3 Zuverlässigkeit von Hitzewarnungen	12
3.4 Numerische und technische Hilfsmittel für die Hitzewarnungen	14
4 Neue Hitzewarnungen bei MeteoSchweiz ab 2021	17
4.1 Tagesmitteltemperatur als neuer Hitzeindikator	17
4.1.1 Die wissenschaftliche Basis des neuen Hitzewarnsystems	18
4.2 Die neuen Warnstufen	19
4.3 Numerische und technische Hilfsmittel für die neuen Hitzewarnungen	21
5 Interne und externe Dienstleistungen zum Thema Hitze	23
5.1 Interne Dienstleistungen	23
5.2 Externe Dienstleistung	25
6 Les interactions avec les autorités cantonales (Cantons de Genève, Vaud et Tessin)	27
7 Die klimatologische Perspektive: Hitze in der Schweiz	31
7.1 Hitze in der Vergangenheit	31
7.1.1 Vorgehen bei der klimatologischen Betrachtung eines Hitzeereignisses	34
7.2 Empirische Einordnung von extremen Temperaturen	37
7.3 Hitze in der Zukunft	38
8 Das Projekt HEAT-SHIELD	41
8.1 Überblick	41

8.2	Hitzeindex und Methodik	41
8.3	Ein Hitze-Früherkennungssystem auf europäischer Skala	43
8.4	Hitzeszenarien auf europäischer Skala	45
9	Hitzebelastung in Städten	47
10	Vergleich von Hitzeindizes	53
10.1	Einleitung	53
10.2	Ausgewählte Hitzestressindizes und Datengrundlage	53
10.3	Stationsspezifische Schwellenwertberechnung	54
10.4	Trefferquoten einzelner Hitzewarntage	56
10.5	Zusammenfassung	58
	Abkürzungen	59
	Literaturverzeichnis	61
	Danksagung	65

1 Einführung

Hitze beeinflusst die Gesundheit und die Leistungsfähigkeit von Menschen und hat einen grossen Einfluss auf die gesamte Biosphäre. Hitzewellen gelten bereits im heutigen Klima als gefährlichste Naturgefahr für die Gesundheit. In den letzten Jahrzehnten nahm die Hitzebelastung in der Schweiz wie auch in vielen weiteren Regionen der Erde stark zu. Dies lässt sich beispielweise an der steigenden Anzahl der Hitzetage erkennen. Gemäss den IPCC-Klimaszenarien und den CH2018-Klimaszenarien werden sie in Zukunft noch intensiver und häufiger auftreten. Die Szenarien gehen davon aus, dass die Temperaturextreme sogar stärker ansteigen werden als die Mitteltemperatur. Dementsprechend werden Hitzewellen weltweit als eine der Gefahren für die Gesundheit der Bevölkerung anerkannt und als solche in den Warnsystemen der nationalen Wetterdienste berücksichtigt.

Um die Bevölkerung frühzeitig vor einer anstehenden Hitzebelastung warnen zu können, implementierte MeteoSchweiz als Folge des Hitzesommers 2003 ein offizielles Hitzewarnsystem, welches in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Gesundheit (BAG) und den kantonalen Gesundheitsdiensten entwickelt wurde. Nach einer Testphase im Jahr 2004, ist seit 2005 die Hitzewarnung Bestandteil des allgemeinen Warnsystems von MeteoSchweiz. 2020 wurde das Hitzewarnsystem überprüft und den neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen angepasst. Informationen von MeteoSchweiz zur Hitzebelastung gehören bereits heute zu den stark nachgefragten Informationen mit grossem Nutzen für die Bevölkerung sowie für die Behörden und werden in Zukunft weiter an Wichtigkeit gewinnen.

Das Thema Hitze ist nicht nur im Warnkontext, sondern auch aus klimatologischer Sicht sehr relevant. Einerseits liefert die Einordnung von Hitzeperioden oder die statistischen Analysen der Hitzeindikatoren eine Beschreibung der Änderungen hitzerelevanter Grössen und Parameter über mehrere Jahrzehnte. Andererseits gibt uns die zukunftsorientierte Perspektive sehr klare Hinweise über die zu erwartenden Veränderungen in Abhängigkeit der verschiedenen Klimaszenarien bis Ende des 21. Jahrhunderts.

Aufgrund der hohen Relevanz des Themenfeldes Hitze wurden an der MeteoSchweiz in den letzten Jahren im Rahmen verschiedener Vorhaben und Projekte zahlreiche Forschungsarbeiten zum Thema Hitze geleistet. Als Beispiel kann man die klimatologischen Untersuchungen zum sogenannten städtischen Wärmeinsel-Effekt nennen. Die zunehmende Hitzebelastung vor allem in Städten und Agglomerationen gilt als eine der zentralen Herausforderungen bei der Anpassung an den Klimawandel, die das Bundesamt für Umwelt (BAFU) in der Strategie des Bundesrates und im Aktionsplan aufgeführt hat. Weitere Beispiele sind die internationale Zusammenarbeit zum Thema «Hitze und Gesundheit» im Projekt HEAT-SHIELD, die Berechnungen und Analysen verschiedener Hitzeindikatoren als wichtiger Bestandteil der neuen Klimaszenarien CH2018 oder die Berechnung von empirischen Wiederkehrperioden der Temperaturextreme. Für die sehr heissen Sommer 2015 und 2018

wurden ausserdem detaillierte MeteoSchweiz Fachberichte mit Analysen aus meteorologischer und klimatologischer Sicht erstellt (MeteoSchweiz, 2016; MeteoSchweiz, 2018).

Der vorliegende Bericht hat das Ziel, die Tätigkeiten und Projekte, die in den letzten 10 - 15 Jahren an der MeteoSchweiz zum Thema Hitze durchgeführt wurden, zusammenzutragen und zu beschreiben. Der Bericht ist im Rahmen des MeteoSchweiz internen Projektes «Hitze» (Laufzeit 2019 - 2021) entstanden, welches im Bereich «Analyse und Prognose» (AP) angesiedelt ist. Aufgabe und Hauptziel dieses Projektes ist es, das aktuelle Hitzewarnsystem zu überprüfen und an neue wissenschaftliche Erkenntnisse anzupassen. Weiter soll das Know-How und die Ergebnisse der verschiedenen Tätigkeiten an der MeteoSchweiz zum Thema Hitze gebündelt werden (inkl. der Aktivitäten zur Koordination innerhalb der MeteoSchweiz und mit anderen Bundes- oder kantonalen Ämtern), um eine einheitliche Analyse und Kommunikation bei der Warnung wie auch bei der Klimatologie sicherzustellen.

2 Hitzewarnungen im internationalen Kontext

2.1 Hitze-Gesundheits-Warnsysteme

Der Klimawandel und insbesondere der damit verbundene Anstieg der Lufttemperatur sind zu einem Hauptanliegen der Gesellschaft geworden. Eine direkte Folge höherer Durchschnittstemperaturen ist die Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Hitzewellen. Im Hinblick auf die zu erwartende weitere Erhöhung der Temperaturen verbunden mit einer Intensivierung der Hitzewellen zählt die Verbesserung und Entwicklung von Hitze-Gesundheits-Warnsystemen («heat-health warning systems», HHWS) zu den Prioritäten der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und der Weltgesundheitsorganisation (WHO). Ein HHWS besteht aus der Kombination eines Hitzewarnsystems mit Hitzemassnahmenplänen («heat-health action plans», HHAPs; WMO und WHO, 2015). Dabei liefert das Hitzewarnsystem die meteorologischen Hitzevorhersagen und wird von einem Wetterdienst betrieben, normalerweise vom nationalen Wetterdienst. Die Hitzemassnahmenpläne hingegen werden von Gesundheitsbehörden auf den verschiedenen institutionellen Ebenen entwickelt und betrieben.

Ein HHWS soll so konzipiert sein, dass es in der Lage ist, Entscheidungsträger und die breite Öffentlichkeit auf drohende gefährliche Hitze aufmerksam zu machen (WMO und WHO, 2015). Hinweise zur Vermeidung negativer gesundheitlicher Folgen, die mit extremen Temperaturen verbunden sind, wie auch Informationen zu strukturellen Massnahmen sind Teil eines solchen HHWS.

In der Schweiz haben die Kantone Genf, Waadt, Freiburg, Neuenburg, Wallis und das Tessin Hitzemassnahmenpläne auf Basis der Hitzewarnungen der MeteoSchweiz implementiert. Auch im Ausland existieren bereits in zahlreichen Ländern Hitze-Gesundheits-Warnsysteme. Der 2019 erschienene Artikel von Casanueva et al. (2019) gibt einen Überblick über mehr als 15 verschiedene Hitze-Gesundheits-Warnsysteme weltweit mit Fokus auf Europa. Im Sinne eines State-of-the-Art Reviews werden sowohl die Grundlagen für die Erstellung der Hitzewarnungen in den verschiedenen Ländern vorgestellt, als auch geplante Interventionsmassnahmen und ausgewählte Kommunikationskanäle erläutert. Im Artikel wird die grosse Heterogenität zwischen den verschiedenen implementierten Hitze-Gesundheits-Warnsystemen deutlich, insbesondere was die Grundlagen für die Erstellung der Hitzewarnungen betrifft.

In den folgenden Unterkapiteln werden einige für die MeteoSchweiz relevante europäische Hitze-Gesundheits-Warnsysteme beispielhaft erläutert, wobei der Fokus auf den Grundlagen für die Erstellung der Hitzewarnungen liegt. Die nachfolgend genannten Beispielländer sind insofern relevant, als dass sie als direkte Nachbarländer wertvolle (potentielle) Kooperationspartner auf meteorologischer

Ebene darstellen. Für einen umfassenden Überblick wird auf den Artikel von Casanueva et al. (2019) verwiesen.

2.2 Deutschland

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) bewertet das Wärmeempfinden im Freien mit der gefühlten Temperatur (*PT*, *perceived temperature*). Zur Berechnung der gefühlten Temperatur wird ein vollständiges Wärmehaushaltsmodell des menschlichen Körpers eingesetzt. In dieses Modell fliessen meteorologische Grössen wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und mittlere Strahlungstemperatur ein, sowie nicht-meteorologische Grössen wie Bekleidung und Metabolik. Letztere werden mithilfe standardisierter Annahmen in Form des «Klima-Michels» (35 Jahre, 1,75 m, 75 kg, männlich) miteinbezogen, welcher sich mit 4 km/h fortbewegt und den vorherrschenden Temperaturen entsprechend angepasste Kleidung trägt (z.B. kurze Hose und T-Shirt während heisser Temperaturen; Matzarakis et al., 2020).

Der DWD spricht Warnungen für zwei Warnstufen aus (DWD, 2019): bei starker Wärmebelastung und bei extremer Wärmebelastung. Vor einer starken Wärmebelastung wird gewarnt, wenn die gefühlte Temperatur am frühen Nachmittag bei etwa 32 °C oder darüber liegt. Aufgrund von Akklimatisierung ist dieser Schwellenwert variabel. Er kann bei frühen Hitzewellen etwas niedriger und im Hochsommer etwas höher liegen. Eine Warnung wird dann ausgesprochen, wenn der Schwellenwert an mindestens zwei Tagen in Folge überschritten wird, unter Berücksichtigung der nächtlichen Abkühlung. Wird am frühen Nachmittag ein Wert von 38 °C gefühlter Temperatur überschritten, wird vor einer extremen Wärmebelastung gewarnt. Generell werden bei Hitzewarnungen auch ältere Menschen und Stadtbewohner (in Städten mit mehr als 100.000 Einwohner) gezielt berücksichtigt und im Warntext über die entsprechende Hitzebelastung informiert (DWD, 2019).

Es ist zu beachten, dass die genannten Schwellenwerte als Referenz zu verstehen sind, da geringe Variationen vorgenommen werden, um die Warnungen länderspezifisch herausgeben zu können.

2.3 Österreich

In Österreich werden die Hitzewarnungen von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG herausgegeben. Die ZAMG erstellt Hitzewarnungen für unterschiedliche Belastungsstufen auf Basis prognostizierter Werte für die gefühlte Temperatur (*PT*) unter Berücksichtigung der Werte der minimalen Lufttemperatur. Zur Berechnung der gefühlten Temperatur wird das «Klima-Michel-Modell» des DWD eingesetzt, das Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Strahlungstemperatur berücksichtigt (BMGF, 2017). Genauer werden die Warnschwellen auf Basis eines gewichteten Mittels aus Tagesmaximum (PT_{max}) und Tagesmittel der gefühlten Temperatur (PT_{mean}) ermittelt, nämlich $(2 * PT_{max} + PT_{mean}) / 3$. Ab einer *PT* von 30° C (Schwellenwert kann bezirksweise variieren in Abhängigkeit des Temperaturniveaus der vergangenen zwei Wochen; Schwankungsbereich von 30-32 °C) wird von erhöhter Hitzebelastung gesprochen, ab 35 °C (Schwankungsbereich von 34-36 °C) von starker Hitzebelastung und ab 40 °C (Schwankungsbereich von 39-42 °C) von extremer Hitzebelastung (**Abbildung 1**). Die angegebenen Schwellenwerte und Belastungsstufen sind als Richtwerte zu verstehen und können im Bedarfsfall von den Prognostikern editiert werden.

Zusätzliches Warnkriterium ist die 2m-Minimumtemperatur (nicht *PT*). Unter 16 °C Temperaturminimum wird keine Wärmebelastung ausgegeben, unter 20 °C ist maximal erhöhte Wärmebelastung möglich. Ausserdem gilt, dass für prognostizierte Tagesmaximumtemperaturen ≤ 26 °C (2m-Lufttemperatur, nicht *PT*) eine Belastung ausgeschlossen wird und erst ab 33 °C eine extreme Hitzebelastung erreicht werden kann. Für eine prognostizierte Tagesmaximumtemperatur von ≥ 39 °C wird die Belastungsstufe extreme Hitzebelastung erzwungen (Emailkontakt ZAMG, 04.08.2020).

Eine Hitzewarnung erfolgt auf Bezirksbasis und wird dann ausgelöst, wenn für mindestens drei aufeinanderfolgende Tage eine starke Wärmebelastung prognostiziert wird. Ab einer starken Wärmebelastung werden ebenfalls eine Vielzahl an Sanitäts- und Hilfsorganisationen verständigt (BMGF, 2017; Landessanitätsdirektion Wien, 2018; Pollhammer, 2019).


 Hitzebelastung		
<p>Eine längere Phase mit hochsommerlichen Temperaturen in Kombination mit hoher Luftfeuchtigkeit führt zu erhöhter Wärmebelastung des menschlichen Organismus. Bei großer Hitze produziert der Körper mehr Schweiß. Verdunstet der Schweiß auf der Hautoberfläche, kühlt dies die Haut und hilft, die Körpertemperatur trotz Hitze konstant zu halten. Unter extremen Bedingungen wie bei schwülheißem Wetter kann dieses menschliche Kühlsystem überlastet sein, es kommt zu gesundheitlichen Problemen. Ungeeignete Kleidung, Flüssigkeitsmangel sowie Intensität und Dauer von körperlichen Aktivitäten verstärken die Belastung zusätzlich. Vor allem ältere Menschen, chronisch Kranke und Kinder sind betroffen.</p>		
Farbe	Bedeutung	
grün	Keine aktive Wetterwarnung	Es ist derzeit mit keiner Hitzebelastung zu rechnen.
gelb	Vorsicht!	Es ist mit erhöhter Hitzebelastung zu rechnen.
orange	Achtung!!	Es ist mit starker Hitzebelastung zu rechnen.
rot	Gefahr!!!	Es ist mit extremer Hitzebelastung zu rechnen.

Abbildung 1: Ampelsystem für Hitzebelastung in Österreich (Quelle: ZAMG, 2020).

2.4 Frankreich

In Frankreich gilt der «Plan national canicule», der seit 2003 existiert, und jeweils durch das «Ministère des Solidarités et de la Santé» auf Basis wissenschaftlicher Expertise von Météo France aktiviert wird (Ministère des Solidarités et de la Santé, 2019). Das Hitzewarnsystem besteht aus vier Stufen und ist mit einem Ampelsystem gekennzeichnet (**Abbildung 2**). Die Herausgabe von Hitzewarnungen basiert auf dem Mittelwert der Minimal- und Maximaltemperaturen über drei Tage, wobei die Schwellwerte von Departement zu Departement variieren (Casanueva et al., 2019). Neben der Temperatur werden weitere Faktoren betrachtet, die sowohl meteorologischer als auch nicht-meteorologischer Natur sein können, z. B. relative Feuchtigkeit, Dauer der Hitzewelle, Periode des Jahres, Situation der Luftqualität, Situation in den Spitälern, usw. Ab Stufe orange werden Warnbulletins herausgegeben und Behörden informiert (Plan national canicule, 2017; Préfet de l'eure, 2018).

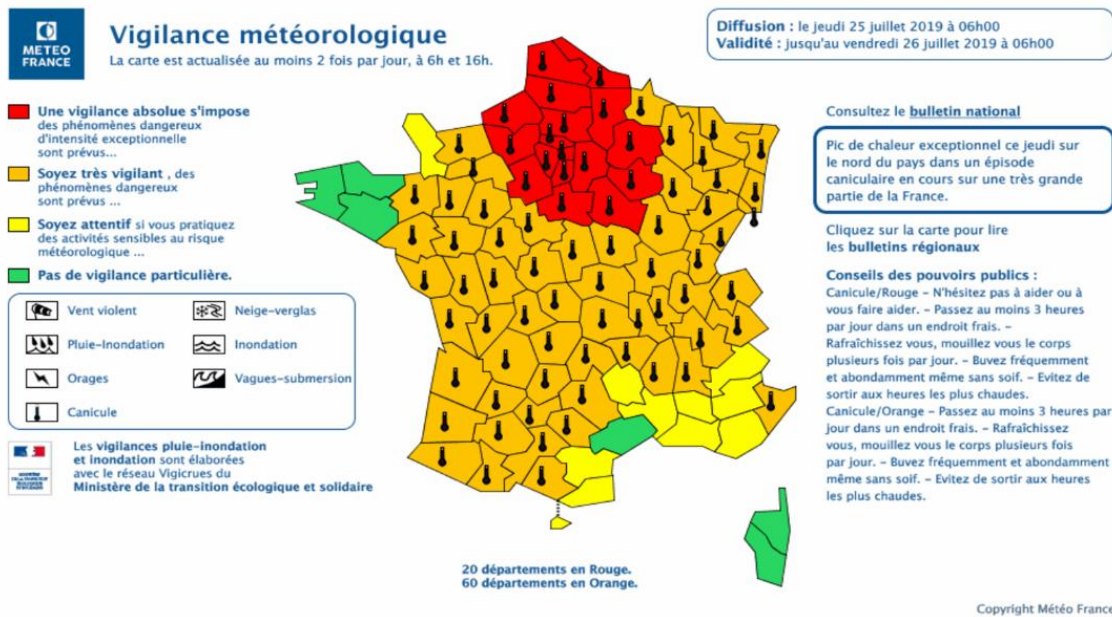


Abbildung 2: Beispiel einer Hitzewarnung in Frankreich (Quelle: Météo France, 2019).

2.5 Italien

In Italien ist die Situation komplexer als in anderen Ländern, da sowohl nationale als auch regionale Wetterdienste existieren. Beschränkt man sich auf die nationale Ebene, werden Hitzewarnungen nicht für Regionen erstellt, sondern für 27 ausgewählte Städte (ab einer Grösse von 250.000 Einwohner). Die Hitzewarnungen werden auf Grundlage des Maximums der sogenannten *apparent temperature* (*Tappmax*; berechnet aus Lufttemperatur und -feuchtigkeit) unter Berücksichtigung eines «air mass based approach» erarbeitet (Casanueva et al, 2019). Für die allgemeine Koordination ist das Gesundheitsministerium zuständig, das technisch vom «Dipartimento di Epidemiologia del SSR Regione Lazio, Centro di competenza del Dipartimento della Protezione Civile» unterstützt wird.

Es werden vier Warnstufen berücksichtigt (**Abbildung 3**), wobei die erste als «Vorwarnung» zu verstehen ist, die zweite als Signal für die Existenz von meteorologischen Bedingungen, die negative Auswirkungen auf die Gesundheit von speziellen Zielgruppen in der Bevölkerung haben können, und erst die dritte Warnstufe eine Warnung auslöst. Für eine Warnung der höchsten Stufe (rot) muss der jeweilige stadt spezifische Schwellenwert für mindestens drei Tage überschritten werden (Ministero della salute, 2019).

Die Kommunikation erfolgt auf Basis der sogenannten «bollini» (kreisförmige Signale, die grün, gelb, orange oder rot sein können; vgl. **Abbildung 3**). Die Medien in Italien nutzen diesen sehr einfachen Kommunikationscode in Verbindung mit einer kurzen Meldung wie «Am Wochenende 'bollino rosso' in zehn Städten», um die wesentlichen Informationen für die Behörden und die Bevölkerung zu übermitteln.

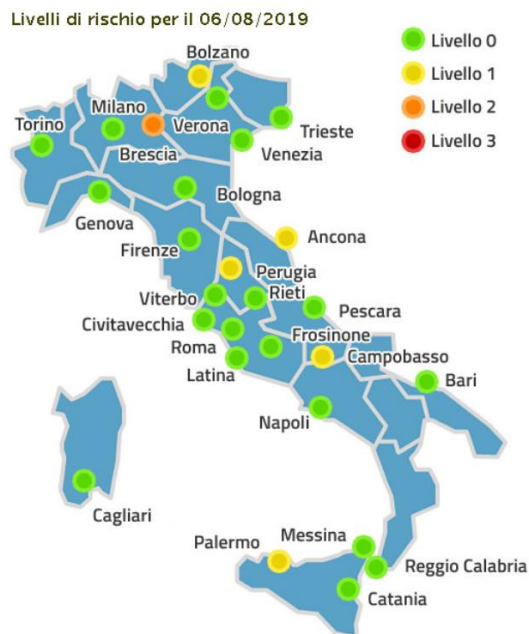


Abbildung 3: Beispiel der Kommunikation des Hitzewarnzustands in Italien, anhand der sogenannten «bollini» (Quelle: Ministero della salute, 2019).

3 Hitzewarnungen bei MeteoSchweiz von 2004 bis 2020

Gemäss Art. 1, Abs. c des meteorologischen Gesetzes (MetG) warnt die MeteoSchweiz vor den Gefahren des Wetters. Im Jahr 2001 führte MeteoSchweiz ein umfassendes Unwetterwarnsystem ein, das die Behörden sowie die Bevölkerung vor Regen-, Schnee- und Windereignissen warnt. Hitzewarnungen kamen im Jahr 2004 hinzu, lokale Gewitterwarnungen ein Jahr später.

In der Folge wurde das Warnsystem bei MeteoSchweiz laufend weiterentwickelt und optimiert. Das heutige Warnsystem der MeteoSchweiz ist in ein mit den anderen Fachstellen des Bundes (Bundesamt für Umwelt, BAFU; WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung, SLF; Schweizerischer Erdbebendienst, SED) koordiniertes Naturgefahren-Warnkonzept eingebettet. Heute warnt MeteoSchweiz die Behörden und die Bevölkerung in allen Landessprachen sowie auf Englisch vor Regen, Schnee, Strassenglätte, Wind, Hitze, Gewitter und Bodenfrost. Dabei werden seit dem Jahr 2013 insgesamt 159 Warnregionen in der Schweiz verwendet, welche mit den Fachstellen BAFU und SLF abgestimmt sind, soweit dies möglich und sinnvoll ist. Gemäss dem nationalen Naturgefahrenwarnkonzept werden die Gefahren in fünf Warnstufen unterteilt, wobei für jedes Phänomen bzw. für jede Warnstufe spezifische Schwellenwerte definiert wurden. Die Bedeutung der verschiedenen Gefahrenstufen ist in **Abbildung 4** beschrieben. Es werden jedoch nicht für alle Phänomene alle Warnstufen verwendet. Hitzewarnungen gab MeteoSchweiz bis 2020 beispielsweise nur in den Gefahrenstufen 3 und 4 heraus. Die Gründe dafür werden im Kapitel 3.2 erläutert. Ab dem Sommer 2021 wird neu auch eine Hitzewarnung der Stufe 2 erstellt.

1	Stufe 1 keine oder geringe Gefahr	Die Wetterentwicklung bleibt innerhalb des für die Jahreszeit üblichen Rahmens. Auch wenn kein Gefahrenhinweis vorliegt, können lokal trotzdem gefährliche Wettersituationen auftreten.
2	Stufe 2 (gelb) Mässige Gefahr	Es wird eine gefährliche Wetterentwicklung erwartet mit Wettererscheinungen, die aber innerhalb des für die Jahreszeit üblichen Intensitätsbereiches liegen.
3	Stufe 3 (orange) Erhebliche Gefahr	Es wird eine gefährliche Wetterentwicklung erwartet mit Wettererscheinungen, die am Rand des für die Jahreszeit üblichen Intensitätsbereiches liegen.
4	Stufe 4 (rot) Grosse Gefahr	Es wird eine gefährliche Wetterentwicklung erwartet mit Wettererscheinungen von ungewöhnlicher Stärke.
5	Stufe 5 (dunkelrot) Sehr grosse Gefahr	Es wird eine gefährliche Wetterentwicklung erwartet mit Wettererscheinungen von ausserordentlich grosser Intensität.

Abbildung 4: Beschreibung der Warnstufen.

Hitzewarnungen werden wie alle anderen Unwetterwarnungen verschickt und verteilt, d.h. Hauptempfänger sind die Behörden und die Bevölkerung. Die Behörden, sowohl auf Bundes- wie auch auf Kantonsebene, werden über das gesicherte Vermittlungssystem VULPUS via Einsatzzentrale der Kantonspolizei informiert. Die Bevölkerung wird über die Webseiten www.meteoschweiz.ch bzw. naturgefahren.ch und via MeteoSwiss App informiert. Auf der MeteoSwiss App können die gewünschten Push-Warmmeldungen gratis abonniert werden. Des Weiteren werden die Hitzewarnungen an verschiedene Bundesämter, z. B. an das Bundesamt für Gesundheit (BAG), das Bundesamt für Strassen (ASTRA) oder das BAFU, an die Medien (Fernseh- und Radiostationen), wie auch an private Wetterdienste übermittelt.

3.1 Heat Index als Hitzeindikator

Seit 2004 und bis 2020 basieren die Hitzewarnungen von MeteoSchweiz auf dem sogenannten *Heat Index (HI)*. Dieser Hitzeindex wurde in den 70er Jahren von Steadman (1979a und b) entwickelt und dient der «National Oceanic and Atmospheric Administration» (NOAA) seit 1979 als Basis für die Hitzewarnungen des amerikanischen Wetterdienstes. Aufgrund der unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen in der Schweiz gegenüber den USA, verwendet MeteoSchweiz nur die ersten zwei Schwellen des amerikanischen Hitzewarnsystems.

Der *Heat Index* berechnet sich aus Temperatur und Luftfeuchte und versucht, die Hitzebelastung auf den menschlichen Körper durch eine Art von gefühlter Temperatur zu beschreiben. Die Hitzewarnungen von MeteoSchweiz basieren demnach nicht nur auf der gemessenen (klassischen) 2 m-Temperatur. Mehr Details und Informationen über die Berechnung des *Heat Index* sind in Rothfusz (1990) zu finden.

Zur Bestimmung des *Heat Index* kann neben der Temperatur entweder die relative Feuchtigkeit oder der Taupunkt verwendet werden. In **Abbildung 5** und **Abbildung 6** kann anhand der Temperatur und der zu dieser Zeit gemessenen Luftfeuchtigkeit (Taupunkt oder relative Feuchte) der entsprechende Wert des *Heat Index* ausgelesen werden.

Eigentlich liegen den aus **Abbildung 5** und **Abbildung 6** resultierenden und für die Warnungen verwendeten Werte eine Lufttemperatur in Grad Fahrenheit zu Grunde. Der Wert eines berechneten *Heat Index* aus der Temperatur in Grad Celsius würde deutlich tiefer und entsprechend deutlich näher an der gemessenen Temperatur liegen. Damit keine Verwechslungsgefahr in der Kommunikation an die Bevölkerung zwischen der gemessenen Temperatur und dem *Heat Index* (gefühlte Temperatur) entsteht, hat man sich bei MeteoSchweiz bewusst für *HI*-Werte entschieden, die der Masseinheit Fahrenheit entsprechen.

Die Berechnung des *Heat Index* ist grundsätzlich ab einer Temperatur von knapp 27 °C (80 °F) und einer relativen Luftfeuchtigkeit ab ca. 30% anwendbar. Zudem ist der *Heat Index* für windschwache Situationen sowie für schattige Lagen konzipiert.

3 Hitzewarnungen bei MeteoSchweiz von 2004 bis 2020

		Temperatur in °C											
		27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
Taupunkt in °C	8	79.6	80.6	81.9	83.2	84.7	86.2	87.9	89.6	91.3	93.1	94.8	96.6
	10	79.9	81	82.2	83.6	85.1	86.7	88.4	90.1	91.9	93.7	95.6	97.4
	12	80.3	81.5	82.8	84.2	85.7	87.4	89.1	90.9	92.7	94.6	96.5	98.5
	14	80.8	82.1	83.5	85	86.6	88.3	90.1	91.9	93.8	95.8	97.8	99.8
	16	81.5	82.9	84.4	86.1	87.8	89.5	91.4	93.3	95.3	97.4	99.4	101.5
	18	82.3	84	85.7	87.5	89.4	91.2	93.2	95.2	97.3	99.4	101.5	103.8
	20	83.3	85.4	87.4	89.4	91.4	93.5	95.6	97.7	99.9	102	104.3	106.5
	22	84.6	87.2	89.6	91.9	94.2	96.4	98.7	100.9	103.2	105.5	107.8	110.1
	24	86.2	89.5	92.5	95.2	97.8	100.3	102.7	102.7	107.4	109.8	112.2	114.6

Abbildung 5: Heat Index, berechnet aus der Lufttemperatur und dem Taupunkt.

		Temperatur in °C											
		27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
Relative Feuchtigkeit in %	30	79.6	80.8	82.2	83.8	85.5	87.5	89.6	91.9	94.4	97.1	100	103
	35	79.9	81.2	82.8	84.5	86.5	88.6	91	93.7	96.5	99.5	102.8	106.3
	40	80.4	81.8	83.5	85.4	87.6	90.1	92.8	95.8	99	102.5	106.2	110.2
	45	80.8	82.5	84.4	86.6	89.1	91.8	94.9	98.3	101.9	105.8	110	114.5
	50	81.4	83.2	85.4	87.9	90.7	93.9	97.3	101.1	105.2	109.6	114.4	119.5
	55	81.9	84.1	86.6	89.4	92.6	96.2	100.1	104.3	108.9	113.9	119.2	124.9
	60	82.5	85	87.9	91.9	94.7	98.7	103.1	107.9	113.1	118.6	124.6	130.9
	65	83.2	86.1	89.3	93	97.1	101.6	106.5	111.9	117.6	123.8	130.4	
	70	83.9	87.2	90.9	95.1	99.7	104.7	110.2	116.2	122.6	129.5		
	75	84.7	88.4	92.6	97.3	102.5	108.2	114.2	120.9	128			
	80	85.5	89.8	94.5	99.8	105.6	111.9	118.7	126				

Abbildung 6: Heat Index, berechnet aus der Lufttemperatur und der relativen Feuchtigkeit.

3.2 Die Warnstufen

MeteoSchweiz warnte bis 2020 mit Hilfe des *Heat Index* vor Hitzewellen, wenn die in der **Tabelle 1** aufgeführten Kriterien erfüllt wurden (MeteoSchweiz, 2016):

Tabelle 1: Warnschwellen für Hitzewarnungen bei MeteoSchweiz.

Hitzewelle	Warnstufe 3	Warnstufe 4
<i>Heat Index (HI)</i>	<i>HI > 90</i> an mindestens drei aufeinanderfolgenden Tagen	<i>HI > 93</i> an mindestens fünf aufeinanderfolgenden Tagen

Dabei wurde nur in den Warnstufen 3 (orange; erhebliche Gefahr) und 4 (rot; grosse Gefahr) gewarnt, wobei die in der **Tabelle 1** definierten Schwellenwerte nicht auf Wiederkehrperioden basieren. Bei der Einführung der Hitzewarnungen im Jahre 2004 hatte man ursprünglich nur eine Warnstufe festgelegt. 2012 wurde dann auch die Stufe 4 eingeführt. Eine Stufe 5 wurde bisher nicht eingeführt, da man davon ausgegangen ist, dass eine noch extremere Hitzewelle von grösserem Ausmass als

diejenige im Sommer 2003 in der Schweiz wenig wahrscheinlich ist. Vor einer Hitzewelle der Stufe 2 wurde bis 2020 auch nicht gewarnt. Sowohl für die Warnstufe 2 wie auch für die Warnstufe 5 wurden also bis 2020 noch keine Warnschwellen definiert.

Normalerweise gab MeteoSchweiz ihre Hitzewarnungen nur für Höhenlagen unterhalb von 600 m ü.M. aus, da oberhalb dieser Höhe die Schwellen des *Heat Index* nicht flächig erreicht wurden. Im Fall einer Hitzewelle wurden also nicht alle Warnregionen der Schweiz gewarnt. Die für eine Hitzewarnung vorgegebenen Regionen sind in der **Abbildung 7** dargestellt.



Abbildung 7: Warnregionen (grün), für welche Hitzewarnungen ausgegeben wurden.

3.3 Zuverlässigkeit von Hitzewarnungen

In der Regel sind Hitzewellen in der Schweiz sehr gut und relativ frühzeitig vorhersagbar, da die Vorhersage der Temperatur und der synoptischen Situationen, die zu einer Hitzewelle führen können, eine relativ hohe Vorhersagezuverlässigkeit haben. Die Vorhersage der (lokalen) Feuchtigkeit hingegen ist weniger zuverlässig, weil oft kleinräumige Einflüsse eine Rolle spielen, was in verschiedenen Regionen zu Unsicherheiten in der genauen Bestimmung von Beginn und Ende der Hitzewelle führen kann.

In der **Tabelle 2** sind die Hitzewarnungen aufgelistet, die MeteoSchweiz in den letzten zehn Jahren auf Basis des Warnsystems mit dem *Heat Index* ausgegeben hat. In der Interpretation der Tabelle muss man berücksichtigen, dass für eine Hitzewelle auch mehr als eine Warnung herausgegeben werden kann, falls Beginn- und Endzeit in den verschiedenen Teilen des Landes nicht gleich sind. Hitzewarnungen wurden in den letzten zehn Jahren durchschnittlich irgendwo in der Schweiz etwa 2 - 3 Mal (Warnstufe 3) bzw. weniger als 1 Mal (Warnstufe 4) pro Jahr herausgegeben. Die Trefferquote lag dabei bei rund 90%, die Falschalarmrate bei rund 10% (Zahlen für die gesamte Schweiz). Im Vergleich dazu lag in den letzten fünf Jahren die Trefferquote über alle Unwetterwarnungen ab Warnstufe 3 hinweg bei rund 85%, die Falschalarmrate um 22%.

3 Hitzewarnungen bei MeteoSchweiz von 2004 bis 2020

Tabelle 2: Liste der ausgegebenen Hitzewarnungen zwischen 2009 und 2020. Die Verlängerung von Warnungen wurden als eine Warnung behandelt.

*Der Begriff Region sagt nicht genau, wo und in welchem Ausmass der betroffenen Fläche die Warnung galt. Es bedeutet lediglich, dass irgendwo dort eine entsprechende Warnung ausgegeben wurde (Ost= Deutschschweiz, West= Westschweiz und Wallis, Süd= Alpensüdseite).

Jahr	Region*	von	bis	Warnstufe
2009	West, Süd	18.08.2009	21.08.2009	3
2010	Ost	01.07.2010	03.07.2010	3
	Süd	04.07.2010	11.07.2010	3
	Ost	09.07.2010	11.07.2010	3
2011	Süd	19.08.2011	24.08.2011	3
2011	West	19.08.2011	24.08.2011	3
	Ost	21.08.2011	24.08.2011	3
2012	Süd	18.08.2012	23.08.2012	3
	West	18.08.2012	24.08.2012	3
	Ost	18.08.2012	22.08.2012	3
2013	Ost, West	17.06.2013	20.06.2013	3
	Süd, West	25.07.2013	28.07.2013	3
	Ost, West	26.07.2013	28.07.2013	3
	Süd	02.08.2013	06.08.2013	3
2014	-	-	-	-
2015	Ost, West, Süd	01.07.2015	07.07.2015	4
	Süd	14.07.2015	18.07.2015	3
	Süd	18.07.2015	24.07.2015	4
	West	20.07.2015	22.07.2015	3
	Süd	05.08.2015	08.08.2015	3
2016	West	19.07.2016	21.07.2016	3
2017	Süd	20.06.2017	25.06.2015	3
	Ost	20.06.2017	23.06.2015	3
	West	22.06.2017	24.06.2017	3
	West, Ost	06.07.2017	08.07.2017	3
	Süd	01.08.2017	05.08.2017	4
	West	02.08.2017	05.08.2017	3
2018	Süd	26.07.2018	05.08.2018	3
	West, Ost	30.07.2018	08.08.2018	3
	Süd	06.08.2018	08.08.2018	3
2019	Ost, West, Süd	24.06.2019	01.07.2019	3
	West, Ost	25.06.2019	01.07.2019	4
	Süd	25.06.2019	02.07.2019	4

	Süd	22.07.2019	26.07.2019	3
	West, Ost	23.07.2019	26.07.2019	3
2020	Süd	28.07.2020	02.08.2020	3
	West	30.07.2020	01.08.2020	3
	Süd, Ost	08.08.2020	12.08.2020	3
	West	09.08.2020	12.08.2020	3

3.4 Numerische und technische Hilfsmittel für die Hitzewarnungen

Für die Erstellung einer Hitzewarnung standen und stehen den Prognostikern in den Wetterdiensten in Locarno, Genf und Zürich auch für das neue Hitzewarnsystem verschiedene numerische Hilfsmittel zur Verfügung. Speziell zu erwähnen sind:

- Für die langfristige Einschätzung (zwischen 15 und 30 Tage) die monatlichen Ensemble-Prognosen des Europäischen Zentrums für Mittelfristvorhersagen (EZMW) in Reading, die zweimal pro Woche neu berechnet werden. Anhand eines dedizierten Postprocessings werden sie in Form von Diagrammen auf einer MeteoSchweiz internen webbasierten Plattform wie dem Model Browser dargestellt.
- Für die mittelfristige Einschätzung (zwischen 5 und 15 Tage) die 15-Tage Ensemble-Prognosen des EZMW, die zweimal pro Tag neu berechnet werden, normalerweise in Form von Meteorogrammen.
- Für die Einschätzung zwischen 3 und 5 Tagen kommen sowohl die COSMO-E Prognose (insbesondere die Prognose des *Heat Index*) wie auch der Extrem Forecast Index (EFI) vom EZMW zum Einsatz. Eine Erklärung des EFI ist auf den Webseiten von EZMW zu finden (z.B. <https://confluence.ecmwf.int/display/FUG/Interpretation+of+EFI+and+SOT>).
- Für die kurzfristige Entwicklung (1 bis 2 Tage) kann der *Heat Index* aus dem COSMO-1 und COSMO-E (Lokalmodelle der MeteoSchweiz) abgerufen werden.

Die genannten numerischen Hilfsmittel stehen sowohl auf der Visualisierungsplattform der Prognosedienste (NinJo System) als auch auf der internen MeteoSchweiz Web-Plattform Model Browser und auf der EZMW Webseite zur Verfügung.

Als Unterstützung für die Erstellung der Hitzewarnung stand dem Prognostiker ein Heat Index Tool (**Abbildung 8**) zur Verfügung. Dieses berechnete für verschiedene Standorte den *Heat Index* für die nächsten zehn Tage anhand der numerischen Prognosemodellwerte für Temperatur und Taupunkt (Datengrundlage ist das MOS-MIX, eine statistisch nachbearbeitete Vorhersage des DWD). Der Prognostiker sah somit auf einen Blick den räumlichen und zeitlichen Verlauf des *Heat Index*. Falls der Prognostiker den Vorschlägen dieser Vorhersage nicht genügend vertraute, hatte er die Möglichkeit die Werte manuell zu editieren, was beispielsweise verwendet wurde, um eine bessere regionale oder zeitliche Konsistenz zu erhalten. Überschritt der *Heat Index* die im Kapitel 3.2 definierten Schwellenwerte, erschien der bestimmte Tag entsprechend der Warnstufe eingefärbt (orange für Warnstufe 3, rot für Warnstufe 4).

3 Hitzewarnungen bei MeteoSchweiz von 2004 bis 2020

Standorte	Do 16.04.	Fr 17.04.	Sa 18.04.	Sa 19.04.	So 20.04.	today	Mi 22.04.	Do 23.04.	Fr 24.04.	Sa 25.04.	So 26.04.	
Basel	74	55	91	91	92	84	73	66	66	64	53	Keine Warnung nötig
Murnau	58	57	92	91	85	66	92	64	63	61	55	Keine Warnung nötig
Interlaken	66	56	51	92	95	92	72	66	63	66	55	Warnung Stufe 3 empfohlen
Kloten	71	56	54	62	65	60	72	63	64	63	57	Keine Warnung nötig
Luzern	70	53	51	95	94	95	72	63	64	68	57	Warnung Stufe 3 empfohlen
Glarus	63	58	50	61	95	95	96	96	68	96	55	Warnung Stufe 3 empfohlen
Chur	76	58	54	65	94	95	96	96	96	68	57	Warnung Stufe 4 empfohlen

Abbildung 8: Heat Index Tool bei MeteoSchweiz.

Da der *Heat Index* mit der Tagesmaximaltemperatur berechnet wurde, handelt es sich ebenfalls um einen Tagesmaximalwert. Er enthielt keine Information, über welche Zeitspanne dieser Wert erreicht wurde. Informationen zu den Tagesminimumtemperaturen, d.h. vor allem während der Nacht, wurden im Warnkonzept 2004 - 2020 nicht berücksichtigt.

4 Neue Hitzewarnungen bei MeteoSchweiz ab 2021

Die Erfahrungen der letzten Jahre zeigen, dass sich das aktuelle Hitzewarnkonzept bewährt hat. Der verwendete Hitzestress-Index *Heat Index (HI)* ist prinzipiell geeignet und ermöglicht robuste Warnungen.

Dennoch sind mit dem aktuellen Hitzewarnkonzept einige Nachteile verbunden, die sich vor allem aus dem Alter des Systems ergeben. Heute liegen neue wissenschaftliche Erkenntnisse zur hitzebedingten Mortalität vor, die zum Beispiel den Einfluss der Nachttemperatur oder von kurzen, intensiven Wärmeperioden auf die Gesundheit aufzeigen (Ragetti et al., 2017). Zusätzlich bestand das Bedürfnis von MeteoSchweiz die internen Warnabläufe zu vereinfachen und die Koordination zwischen der meteorologischen und der klimatologischen Kommunikation zum Thema Hitze zu optimieren. All diese Aspekte, insbesondere aber der Wunsch, neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu verwerten, haben zu einer kritischen Analyse des aktuellen Hitzewarnsystems geführt.

Das neue Hitzewarnkonzept soll die Stärken des *HI*-basierten Systems aufrechterhalten und ist als dessen Weiterentwicklung zu verstehen. Die Hitzewarnungen sollen weiterhin als Weckruf für Bevölkerung und Behörden dienen und berücksichtigen neu Analysen zur Mortalität durch Swiss TPH (Schweizerische Tropen- und Public Health-Institut Basel). Das Hitzewarnsystem mit dem neu gewählten Hitzeindikator soll leicht verständlich sein, um eine einfache Kommunikation mit den Behörden und der breiten Bevölkerung zu gewährleisten. Es soll dual aufgebaut sein und neben den allgemeinen Hitzewarnungen in Zukunft auch nutzerspezifische Hitzeprognosen enthalten. Letztere können auf verschiedenen Hitzeindikatoren und Schwellenwerten basieren, die massgeschneidert für die jeweiligen Nutzergruppen angepasst sind. Die allgemeine Hitzewarnung wird ab Sommer 2021 eingeführt und ist der Fokus der nachfolgenden Ausführungen.

4.1 Tagesmitteltemperatur als neuer Hitzeindikator

Das neue Hitzewarnsystem beruht ab Sommer 2021 neu auf der mittleren Tagestemperatur (*Tmean*). Bei der Entwicklung des neuen Hitzewarnkonzeptes war uns wichtig, ein leicht verständliches Warnsystem zu generieren, das eine einfache Kommunikation an die Behörden und die breite Bevölkerung zulässt. Dies wird mit *Tmean* der Fall sein (die Kommunikation des bisher verwendeten *HI* hat sich oft als schwierig erwiesen). *Tmean* stellt zudem eine sehr robuste Grösse dar und berücksichtigt die Hitzebelastung während der ganzen 24 Stunden eines Tages. Sie ist nicht von einzelnen Temperaturspitzen abhängig wie heute der *HI*. Mit der Wahl von *Tmean* als Hitzeindikator wird daher auch die Temperatur in der Nacht berücksichtigt. Nächtliche Temperaturen sind besonders relevant für die menschliche Gesundheit. Falls die Nächte nicht ausreichend kühl sind, kann sich der Körper kaum erholen und die Hitzebelastung schlechter verkraften (Ragetti et al., 2017). Zudem schaffen wir mit *Tmean* die Basis für eine zukünftige bessere Berücksichtigung der besonderen Temperaturbedingungen in den Städten, die sich vor allem hinsichtlich der nächtlichen Temperaturen vom meist kühleren Umland unterscheiden (städtischer Wärmeinseleffekt). Weiter können wir mit *Tmean* klimatologische Analysen über einen langen Zeitraum erstellen. *Tmean* Messdaten stehen

als homogene und kontinuierliche Temperaturzeitreihen über einen Zeitraum von mehr als 100 Jahren für zahlreiche Stationen in der Schweiz zur Verfügung. Dies ermöglicht eine Indexberechnung ab 1864 (Start systematischer Messungen in der Schweiz) bzw. 1901 (Daten für viele Stationen verfügbar) und somit das Erstellen von klimatologischen Analysen, wie beispielsweise die Einordnung und Änderung von Hitzeereignissen über einen längeren Zeitraum. Dies ist speziell wichtig im Hinblick auf die zukünftige Klimaänderung. Für die Klimatologie und die Warnungen kann somit der gleiche Indikator verwendet werden, was eine einheitliche Kommunikation ermöglicht.

4.1.1 Die wissenschaftliche Basis des neuen Hitzewarnsystems

Die Entwicklung des neuen Hitzewarnsystems wurden wissenschaftlich durch Swiss TPH (Prof. Dr. M. Rössli und Dr. M. Ragetti) begleitet. Die Schwellenwerte und Kriterien des neuen Hitzewarnkonzeptes liegen epidemiologischen Auswertungen durch Swiss TPH zugrunde, die massgeschneidert für die Schweiz vorliegen (verglichen mit dem aktuellen Warnsystem basierend auf *HI*, das aus den USA «importiert» und angepasst wurde). Berücksichtigt werden somit die Auswirkungen der mittleren Tagestemperatur auf die Mortalität in der Schweiz. Die verwendeten Mortalitätsdaten stammen von der Swiss National Cohort und liegen für die Jahre 2003 bis 2016 vor. Epidemiologisch-gestützte Warnkriterien ermöglichen uns die Ausgabe von Impact-basierten Warnungen, um das Gesundheitssystem und die Bevölkerung effektiv vor einer bevorstehenden Hitzeperiode warnen und schützen zu können. Ab einer Temperatur von 25°C bzw. 27°C steigt die Sterblichkeitsrate schweizweit durchschnittlich um 18% bzw. 37% im Vergleich zur schweizweiten mittleren Temperatur von 17°C (\approx Optimaltemperatur). Die Zunahmen der Sterblichkeitsraten berücksichtigen verzögerte Effekte bis 7 Tage nach der Schwellwertüberschreitung (Lags 0-7), da ein Todesfall auch mit gewissem zeitlichen Versatz nach einem heissen Tag eintreten kann (Ragetti et al., in Vorbereitung).

Die Intensität einer Hitzeperiode wird durch Swiss TPH als relevanter für die Auswirkungen auf die Mortalität eingeschätzt als die Dauer einer Hitzeperiode. Wir berücksichtigen die Dauer zur Abgrenzung der neuen Stufe 2 Warnungen zu Stufe 3 bzw. Stufe 4 Warnungen, jedoch nicht mehr zur Abgrenzung von Stufe 3 zu Stufe 4 Warnungen. Je höher die Temperatur ist, desto stärker sind die Auswirkungen auf die Mortalität. Aus diesem Grund unterscheidet sich die Stufe 3 Warnung von der Stufe 4 neu ausschliesslich über die Intensität der Warnschwelle. Es gilt jedoch zu beachten, dass die Dauer im Sinne der kumulierenden verzögerten Effekte dennoch eine Rolle spielt, wenn auch eine untergeordnete.

Die allgemeine Hitzewarnung beruht mit *Tmean* nun auf einem rein temperaturbasierten Index. Neben der Temperatur hat auch die Feuchtigkeit einen Einfluss auf das Wohlbefinden des Menschen, jedoch gemäss verschiedener Studien im Schweizer Klima nicht auf die Mortalität. In der Arbeit von Ragetti et al. (2017) ist der Zusammenhang der Mortalitätsrate mit rein temperaturbasierten Indizes wie der maximalen Tagestemperatur (*Tmax*) und mit der *apparent temperature*, einem kombinierten Index aus Temperatur und Luftfeuchte, sehr ähnlich. Armstrong et al. (2019) zeigen, dass sich ein Zusammenhang zwischen der Luftfeuchtigkeit und einer erhöhten Mortalität nicht nachweisen lässt, dies in vielen Ländern inklusive der Schweiz. Demnach schätzen wir die Information der Luftfeuchte für Hitzewarnungen in der Schweiz als weniger relevant ein als die Temperatur. Indirekt ist die Luftfeuchte jedoch auch in *Tmean* durch die nächtliche Temperatur enthalten, die bei hoher Luftfeuchte weniger stark absinkt.

4.2 Die neuen Warnstufen

Die Hitzewarnung wird weiterhin auf Basis von offiziellen Warnregionen herausgegeben. Die verschiedenen Warnstufen sind schweizweit einheitlich, d.h. es werden wie im heutigen System keine differenzierten regionalen Schwellen verwendet, und anhand von folgenden vordefinierten Kriterien und Schwellen festgelegt (**Abbildung 9**).

Hitzewelle	Warnstufe 2	Warnstufe 3	Warnstufe 4
Tagesmitteltemperatur (Tmean)	$T_{\text{mean}} \geq 25 \text{ °C}$ an mindestens einem Tag	$T_{\text{mean}} \geq 25 \text{ °C}$ an mindestens drei aufeinanderfolgenden Tagen	$T_{\text{mean}} \geq 27 \text{ °C}$ an mindestens drei aufeinanderfolgenden Tagen

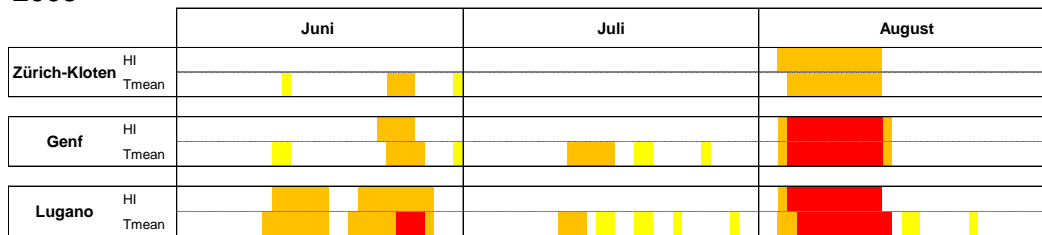
Abbildung 9: Schwellenwerte des neuen Hitzewarnsystems für die Hitzewarnungen für Behörden und Bevölkerung basierend auf der mittleren Tagestemperatur (Tmean) für die Stufe 2 (gelb, mässige Gefahr), Stufe 3 (orange, erhebliche Gefahr) und Stufe 4 (rot, grosse Gefahr) Warnungen).

Neu wird auch eine Warnstufe 2 (gelb, mässige Gefahr) eingeführt, um kurze Wärmeperioden ab einem Tag warnen zu können. Die wissenschaftlichen Analysen durch Swiss TPH zeigen, dass bereits ab einem Tag mit hohen Temperaturen die Mortalitätsrate ansteigt. Das bisherige *HI*-basierte Warnsystem erlaubte es nicht, Wärmephasen kürzer als drei Tage zu warnen. Die Einführung einer Stufe 2 wird diese Lücke füllen. Gemäss des nationalen Warnkonzeptes für die Naturgefahren werden die Warnungen der Stufe 2 nicht als Unwetterwarnungen eingestuft und somit nicht durch die offiziellen, gesicherten Kanäle an die Kantone verteilt. Sie belasten die kantonalen Behörden also nicht zusätzlich. Sie stehen jedoch der Bevölkerung und allen anderen Interessierten via MeteoSwiss App zur Verfügung (und werden weiter auch auf www.meteoschweiz.ch und www.naturgefahren.ch publiziert). Die Warnstufen 3 und 4 werden wie bisher über das gesicherte Vermittlungssystem VULPUS an die Behörden, sowohl auf Bundes- wie auch auf Kantonsebene via Einsatzzentrale der Kantonspolizei, vermittelt.

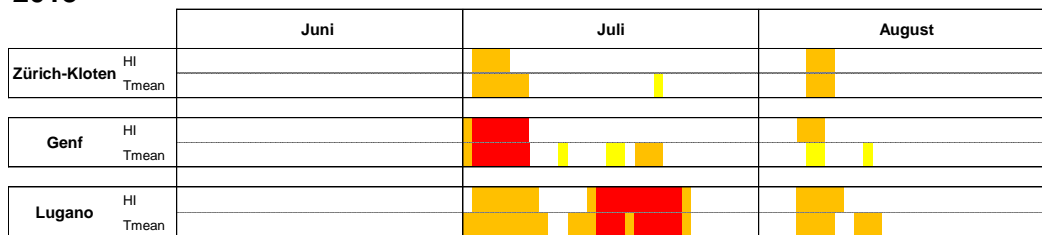
Analysen für verschiedene Jahre in der Vergangenheit zeigen, dass pro Sommer i.d.R. zwei bis fünf Stufe 2 Warnungen pro Warnregion herausgegeben werden. Die Anzahl und Frequenz der ausgegebenen Hitzewarnungen der Stufe 3 und 4 bleiben ungefähr in der Grössenordnung wie heute, so dass die vorgeschlagenen Änderungen kaum Auswirkungen für die Kantone haben werden. Die Analysen für verschiedene Jahre in der Vergangenheit zeigen zudem, dass alle signifikanten Hitzewellen der Vergangenheit auch mit dem neuen Hitzewarnkonzept identifiziert und gewarnt worden wären.

Abbildung 10 zeigt als Beispiel die warnrelevanten Situationen für die Sommer 2003, 2015 und 2018 in Zürich-Kloten, Genf und Lugano auf Basis des *Heat Index* und *Tmean*. Die in der Abbildung angegebenen Warnungen basieren jeweils auf Messdaten und können von den tatsächlich herausgegebenen Warnungen abweichen, weil diese nicht für einzelne Stationen herausgegeben werden, sondern für die Warnregionen, die mehrere Lokalitäten enthalten.

2003



2015



2018

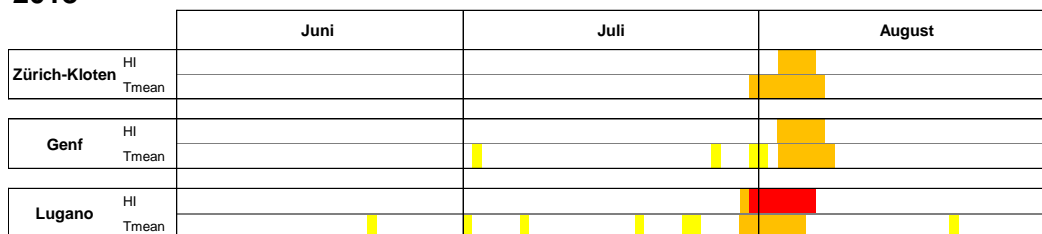


Abbildung 10: Warnrelevante Situationen (Stufe 2: gelb, nur mit Tmean; Stufe 3: orange; Stufe 4: rot) in den Sommern 2003, 2015 und 2018 für drei Stationen in der Schweiz (Zürich-Kloten, Genf, Lugano) basierend auf Messdaten des Heat Index (HI) und der Tagesmitteltemperatur (Tmean).

Mit dem neuen Hitzewarnsystem gibt MeteoSchweiz Hitzewarnungen in der Regel für Höhenlagen unterhalb von 800 m ü.M. aus. Auswertungen zeigen, dass die Schwellenwerte oberhalb dieser Höhe nicht flächig erreicht werden. In **Abbildung 11** sind die Regionen hervorgehoben, für welche vor Hitze gewarnt wird.

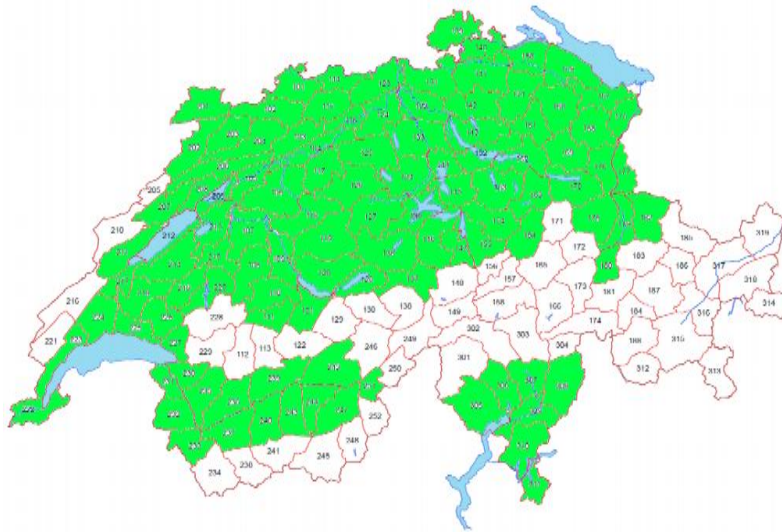


Abbildung 11: Warnregionen (grün), für welche im neuen Hitzewarnsystem Hitzewarnungen ausgegeben werden.

4.3 Numerische und technische Hilfsmittel für die neuen Hitzewarnungen

Im neuen Hitzewarnsystem stehen den Prognostikern von MeteoSchweiz für die Erstellung einer Hitzewarnung grundsätzlich dieselben numerischen Hilfsmittel zur Verfügung wie in Kapitel 3.4 beschrieben. Dies gilt insbesondere für langfristige (zwischen 15 und 30 Tagen) sowie für mittelfristige (zwischen 5 und 15 Tagen) Einschätzungen.

Für Einschätzungen zwischen 3 und 5 Tagen stehen nicht mehr COSMO-E Prognosen, sondern Prognosen aus COSMO-2E zur Verfügung (insbesondere die probabilistische Prognose von T_{mean}). Der Extrem Forecast Index EFI vom EZMW kommt weiterhin zum Einsatz.

Für die kurzfristige Entwicklung der nächsten 1 bis 2 Tage lösen die Prognosen aus dem probabilistischen COSMO-1E Modell jene vom deterministischen COSMO-1 Modell ab.

Zusätzlich stellt ein webbasiertes Visualisierungstool ein weiteres Hilfsmittel dar, das mit Daten aus Data4web arbeitet (Datengrundlage ist bis 2022 das MOS-MIX des DWD, dann werden die Daten aus Data4web und Postprocessing sein). Es zeigt für vordefinierte Referenzstationen die vorhergesagten Werte der mittleren Tagestemperatur T_{mean} , der Tagesmaximal- sowie der Tagesminimaltemperatur für die nächsten 5 Tage.

Das Tool enthält eine Logik, nach welcher die folgenden 5 Tage gemäss den Warnschwellen eingefärbt werden. Liegt die mittlere Tagestemperatur T_{mean} an 1 oder 2 Tagen über der Schwelle von 25 °C, so wird der entsprechende Tag gelb (Warnstufe 2) eingefärbt. Wird die Schwelle von 25 oder 27 °C an drei oder an mehr aufeinanderfolgenden Tagen erreicht oder überschritten, so werden die Tage orange (Warnstufe 3) oder rot (Warnstufe 4) eingefärbt. Das Tool berücksichtigt dabei auch kurze «Unterbrechungen» einer Hitzephase von 1 Tag, die nicht in der Lage sind, die Warnstufe zu beeinflussen.

Basierend darauf werden für vordefinierte Makroregionen (**Abbildung 12**) Warnvorschläge erzeugt, die im Warnausgabetool NinJo angezeigt und durch die Prognostiker bearbeitet werden können. Sie werden nicht automatisch versendet. Pro Makroregion werden meist zwischen 2 und 5 Referenzstationen verwendet. Sind die Warnkriterien an mindestens 50% dieser Stationen erfüllt, wird ein Warnvorschlag generiert.

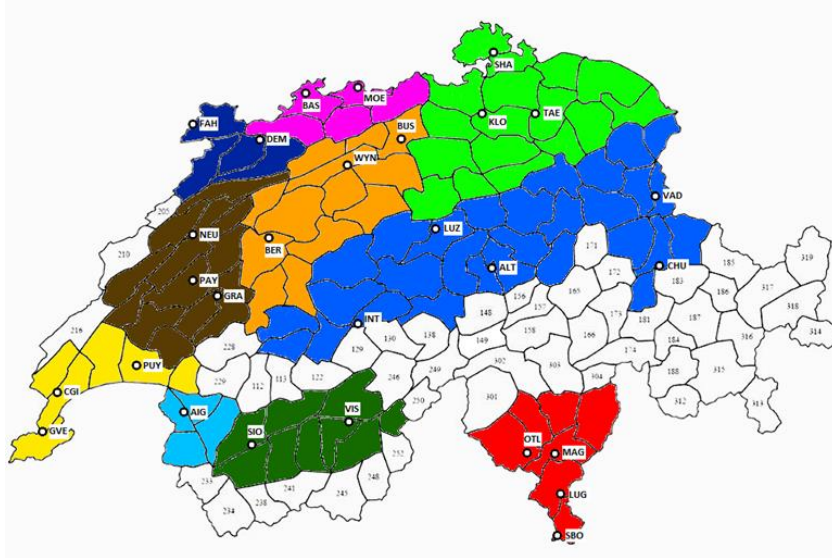


Abbildung 12: Vordefinierte Makroregionen, für welche vom System Hitzewarnvorschläge erzeugt werden.

5 Interne und externe Dienstleistungen zum Thema Hitze

5.1 Interne Dienstleistungen

An der MeteoSchweiz stehen verschiedene interne Produkte zum Thema Hitze zur Verfügung, die sowohl als Unterstützung für die Arbeit der Prognosedienste wie auch für klimatologische Analysen entwickelt wurden. Diese Produkte sind auf den MeteoSchweiz-internen webbasierten Plattformen wie dem Climate Browser oder dem Model Browser verfügbar. Beispiele solcher Produkte sind:

- Mittelwerte und Maximalwerte für verschiedene Messstationen ab 1981 für folgende Hitzeindizes (vgl. Kapitel 10.2):
 - *apparent temperature* (Buzan et al., 2015; Steadman, 1984),
 - *discomfort index* (Coccolo et al., 2016),
 - *effective temperature* (Coccolo et al., 2016),
 - *humidex* (Buzan et al., 2015),
 - *wet bulb globe temperature (simplified)*, Buzan et al., 2015; *shade*, Bernard und Pourmoghani, 1999; *sun*, Liljegren et al., 2008),
 - *wet bulb temperature* (Stull, 2011),jeweils in monatlicher, saisonaler oder jährlicher Granularität.
- Automatische Analysen der intensivsten Hitzeperioden (über 3, 5, 7, 10 oder 14 Tage) pro Jahr ab Messbeginn für verschiedene Messstationen (**Abbildung 13**). Die Hitzeperioden werden in dem internen MeteoSchweiz-Tool (Climate Analysis Tool, CAT, `evoclim/cold.heat.wave.plot`) auf Basis der Maximal-, Minimal- und Mitteltemperaturen aufgezeigt.

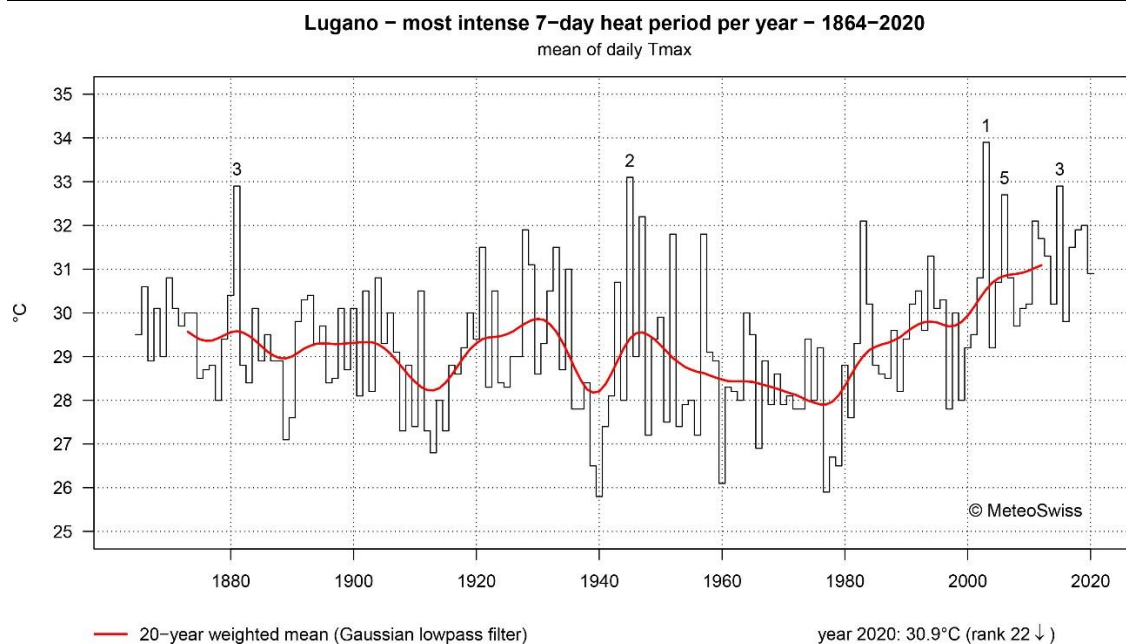


Abbildung 13: Automatische Analyse der intensivsten Hitzeperioden über 7 Tage pro Jahr ab 1864 für Lugano berechnet mit der Tagesmaximumtemperatur.

2019 wurde zusätzlich ein Auswertungstool erarbeitet, mit dem die empirische Einordnung der täglichen Minimum-, Maximum- und Mitteltemperatur automatisch erfolgt. Detailliertere Informationen finden sich in Kapitel 7.2. Weitere klimatologische Auswertungstools werden in Kapitel 7.1 vorgestellt.

Neben den *Heat Index* und *Tmean* Prognosen, die den Prognostikern aus den numerischen und probabilistischen COSMO-1E und COSMO-2E Modellen bei jedem Lauf zur Verfügung stehen, werden seit Sommer 2019 weitere Hitzeindizes berechnet. Diese werden basierend auf der EZMW-Ensemble Prognose zweimal pro Woche für die nächsten sechs Wochen berechnet. Die ausgewählten Hitzeindizes (**Tabelle 3**) sind: *Heat Index*, *effective temperature*, *wet bulb temperature*, *wet bulb globe temperature (simplified, shade, sun)*.

Tabelle 3: Verwendete Hitzeindizes mit jeweiligem Schwellenwert (Quelle: Burgstall et al., 2019).

Hitzeindex	Schwellenwert
<i>Heat Index (HI)</i>	90,0 °F / 93,0 °F
<i>effective temperature (effT oder effectiveTemp)</i>	25,4 °C
<i>wet bulb temperature (wbt)</i>	22,0 °C
<i>simplified wet bulb globe temperature (swbgt)</i>	25,4 °C
<i>wet bulb globe temperature in the shade (wbgts shade oder wbgts.shade)</i>	24,8 °C
<i>wet bulb globe temperature in the sun (wbgts sun oder wbgts.sun)</i>	27,6 °C

Was in **Abbildung 14** dargestellt wird, ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Indizes einen vordefinierten Schwellenwert erreichen, der als Basis für eine Hitzewarnung dienen könnte. Für die Schwellenwerte wurden Daten verschiedener Hitzeindizes von 28 Stationen für den Zeitraum 1981 - 2017 gemittelt und entsprechen dem Vorkommen eines *HI* zwischen 88 und 92°F (**Tabelle 3**, Burgstall et al., 2019). Die Grundidee hinter dieser Entwicklung und Darstellung ist es, mehr Erfahrung im Prognosedienst bezüglich des Verhaltens dieser verschiedenen Hitzeindizes zu gewinnen.

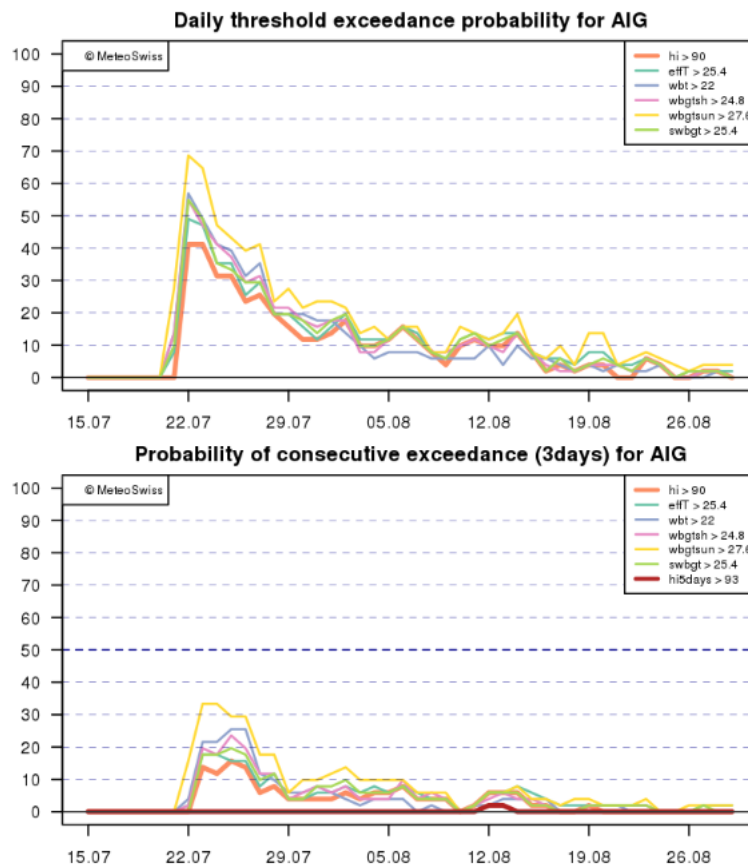


Abbildung 14: Wahrscheinlichkeitsverlauf für verschiedene Hitzeindizes, dass der vordefinierte Schwellenwert (siehe **Tabelle 3**) für die Herausgabe einer Hitzewarnung erreicht wird.

5.2 Externe Dienstleistung

Neben den Hitzewarnungen, welche MeteoSchweiz den Behörden sowie der Bevölkerung zur Verfügung stellt, werden auf Anfrage der kantonalen Behörden massgeschneiderte Hitzeprognosen erstellt. Diese sind im Gegensatz zu den Hitzewarnungen kostenpflichtig. Derzeit erhalten diese Dienstleistungen die Gesundheitsämter der Westschweizer Kantone, des Kantons Tessin sowie des Kantons Wallis. Die Hitzeprognosen werden während der Sommerperiode täglich von den jeweiligen für die Region zuständigen Prognosezentren (in diesem Fall Genf bzw. Locarno-Monti) erstellt. Die Hitzeprognosen sind massgeschneidert auf die Bedürfnisse der Gesundheitsämter angepasst und

wurden in den letzten Jahren in direktem Dialog mit diesen entwickelt. Für die deutschsprachigen Kantone werden aktuell keine kundenspezifischen Hitzepronosen erstellt.

Für den Kanton Tessin wird täglich eine Prognose der Minimal- und Maximaltemperatur sowie des *Tmean* für die nächsten fünf Tage für drei ausgewählte Standorte im Kanton Tessin (Magadino, Lugano, Stabio) herausgegeben. Für die Erstellung wird ein dediziertes Hitzetool verwendet, das die Daten aus der internen MeteoSchweiz Data4web heranzieht.

Für die Westschweizer Kantone und den Kanton Wallis wird durch das Prognosezentrum in Genf täglich eine Temperaturvorhersage für die nächsten sieben Tage für bestimmte Standorte (Genf, Sion, Delémont, Aigle) erstellt. Diese wird zusammen mit der Temperaturentwicklung der vergangenen zehn Tage als graphischer Verlauf dargestellt und enthält zudem eine in textlicher Form beschriebene Einschätzung über mögliche Hitzeperioden.

Obwohl die zwei Dienstleistungen für die Gesundheitsämter des Kantons Tessin bzw. der Westschweizer Kantone sowie des Kantons Wallis nicht genau gleich aussehen, werden sie für sehr ähnliche Zwecke genutzt, nämlich um die Temperatur- und Hitzeentwicklung für die nächsten Tage verfolgen und rechtzeitig die in kantonalen Hitzeplänen vordefinierten Massnahmen umsetzen zu können. In den jeweiligen kantonalen Hitzeplänen sind Massnahmen vorgesehen, die bereits vor dem Erreichen des Schwellenwertes für eine Hitzewarnung umzusetzen sind, wie z.B. eine präventive Vorinformation für kritische Infrastrukturen (Altersheime, Spitäler, usw.). Die von den Prognosezentren in Locarno-Monti und Genf erstellten Dienstleistungen sind in den «grauen» Situationen besonders nützlich und werden von den Gesundheitsämtern geschätzt. Gemeint sind meteorologische Situationen, während denen die Hitzeschwelle nicht genügend flächendeckend erreicht wird oder knapp nicht erreicht wird, aber dennoch vereinzelt erste Hitzebelastungen auftreten können.

6 Les interactions avec les autorités cantonales (Cantons de Genève, Vaud et Tessin)

Suite à la canicule extraordinaire de 2003, les autorités sanitaires du Cantons du Tessin et de Genève ont pris contact avec les centres régionaux de MétéoSuisse de Locarno et de Genève au cours du printemps 2004 afin d'établir une stratégie pour le suivi des vagues de chaleur. En effet les autorités cantonales avaient géré les vagues de chaleur exceptionnelles de l'été 2003 sur la seule base des prévisions générales diffusées par MétéoSuisse. Le système d'avertissement de MétéoSuisse à cette époque ne comportait pas de suivi des vagues de chaleur. L'expérience faite pendant l'été 2003 a donc mis en évidence la nécessité d'un soutien météorologique pour les autorités cantonales et la mise en place d'un outil d'aide à la décision.

Dès l'été 2004 MétéoSuisse a rapidement mis en place un système d'avertissement expérimental des vagues de chaleur. Cette phase expérimentale a pu être implémentée dans les meilleurs délais et de manière interactive grâce aux étroits contacts au niveau régional entre les autorités cantonales et MétéoSuisse. Cette approche collaborative a permis à MétéoSuisse de développer un système d'avertissement des vagues de chaleur répondant aux besoins des cantons et de recueillir dès l'été 2004 une expérience pratique avant l'élargissement de cette veille canicule à toute la Suisse.

Afin de répondre à des exigences de fiabilité et de robustesse nécessaire à tout système d'avertissement destiné aux autorités, les « indice de chaleur » alors disponibles ont été analysés. Le choix s'est finalement porté sur l'« indice de chaleur » de la NOAA (Heat Index) avec un seuil de déclenchement fixé à au moins trois jours consécutifs d'« indice de chaleur » supérieur ou égal à 90.

L'expérience de l'été 2004 fût positive et le système d'avertissement a donc été étendu à toute la Suisse. Dans le même temps la collaboration avec les cantons romands et le Canton du Tessin s'est poursuivie afin d'améliorer la gestion des vagues de chaleur.

La mise en place d'un système d'avertissement n'était qu'un premier pas. Au Sud des Alpes, le Canton du Tessin a rapidement pris conscience qu'il était nécessaire d'élaborer un plan canicule cantonal, afin de coordonner les efforts (expertises, communication, logistique) pour au final assurer une protection efficace de la population (par ex. cibler les personnes à risque). Le groupe GOS&A (Gruppo operativo salute e ambiente) a été spécialement créé pour permettre un travail interdisciplinaire entre des experts du domaine de la santé, de la protection de la population et de l'environnement, incluant MétéoSuisse. Ce plan cantonal a été mise à jour sur la base des expériences acquises d'une année à l'autre.

MétéoSuisse a su accompagner le canton et le GOS&A en mettant à disposition son expertise et son savoir-faire, notamment lors de contact avec des parties prenantes spécifiques, comme par exemple le domaine du bâtiment, mais aussi en apportant son soutien scientifique lors de conférences de presse conjointes. Après plus de 15 ans le GOS&A continue de gérer les évolutions du plan d'action cantonale. Le site www.ti.ch/calurasenzapaura donne une idée du contenu du plan d'action cantonal tessinois. MétéoSuisse continue d'apporter son soutien et son expertise au Canton du Tessin, notamment en fournissant des avertissements pendant la saison estivale, des prévisions spécifiques sur l'évolution de la température, mais aussi au travers de briefing météorologiques réguliers.

En Suisse romande, la collaboration a débuté entre MétéoSuisse et le canton de Genève dès 2004, puis s'est élargie au canton de Vaud, deux cantons à forte composante urbaine. Ces cantons ont aussi développé des plans cantonaux de gestion des canicules (Genève en 2005, Vaud en 2009). Afin de mieux anticiper les vagues de chaleur et en réponse à une demande du canton de Vaud, MétéoSuisse a élaboré une prévision canicule quotidienne (prévision à 8 jours des températures maximales) diffusé de juin à septembre (**Abbildung 15**). Cette prévision permet encore aujourd'hui aux médecins cantonaux de Suisse romande d'informer le plus précocement possible les divers services de santé et les établissements médico-sociaux (EMS). Cette prévision spécifique montre l'importance de l'étroite collaboration et le partage d'expertise entre les autorités cantonales et les centres régionaux de MétéoSuisse.

Depuis 2009, les cantons de Genève et Vaud organisent annuellement aux moins deux séances du « groupe de canicule » de chaque canton. Une séance préparatoire (fin de l'hiver, début du printemps) et une séance de débriefing en automne auxquelles sont invités des médecins du service des urgences, des responsables d'établissement hospitalier, des représentants de commune, des responsables de la protection de la population, les services de la qualité de l'air, des pompes funèbres et MétéoSuisse. Jusqu'à ce jour les cantons de Neuchâtel, Fribourg, Jura et Valais, moins urbains, n'ont pas manifesté le besoin d'organiser de telle rencontre.

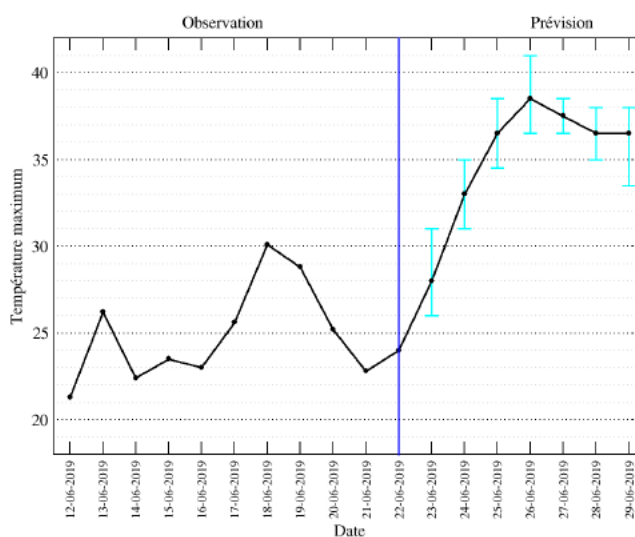
L'impact de la mise en œuvre des plans d'action cantonaux a été analysé pour les étés 2015 et 2018 par le SWISS TPH (BAFU, 2019; Ragettli, et al. 2016; Ragettli et Rösli, 2019). Les résultats ont été positifs en mettant en évidence une diminution des décès dans les cantons qui disposent de plans d'action, vis-à-vis des cantons qui ne disposent pas de tels plans d'actions. Un résultat encourage, et très positif, indirectement aussi pour MétéoSuisse.

Bulletin météorologique du samedi 22 juin



Prévision pour les 7 prochains jours : une canicule assez marquée est en vue pour toute la semaine prochaine.
Température minimale du jour : 15°.
Température minimale du lendemain : 14°.
Perspective au-delà de J+7 : les prévisions d'ensemble donnent une probabilité assez élevée que la vague de chaleur se prolonge au-moins jusqu'à dimanche avec des indices de chaleur dépassant 93.

date émission: 22 06 2019



En cas de canicule, veuillez vous référer à l'avis canicule. Ce bulletin n'est pas un avis officiel de canicule mais est une prévision de température maximum pour la Romandie.
Les valeurs de températures maxima inférieures à 18° ne sont pas indiquées pour des raisons de lisibilité.

Office fédéral de météorologie et de climatologie
MétéoSuisse
7bis, avenue de la Paix, 1211 Genève 2.
Téléphone confidentiel : 058 460 99 66

Abbildung 15: Exemple de prévision canicule quotidienne (prévision à 8 jours des températures maximales) pour le Canton de Vaud.

7 Die klimatologische Perspektive: Hitze in der Schweiz

7.1 Hitze in der Vergangenheit

Im Zuge des Klimawandels sind in der Schweiz die Sommertemperaturen deutlich angestiegen. Gegenüber der vorindustriellen Periode 1871-1900 (Begert et al., 2018) liegen die aktuellen Temperaturen im Sommerhalbjahr um rund 2 °C höher. Schweizweit traten vier der fünf wärmsten Sommerhalbjahre seit 2003 auf, wobei die Jahre 2003 und 2018 mit Abstand die höchsten Temperaturen aufwiesen (**Abbildung 16**).

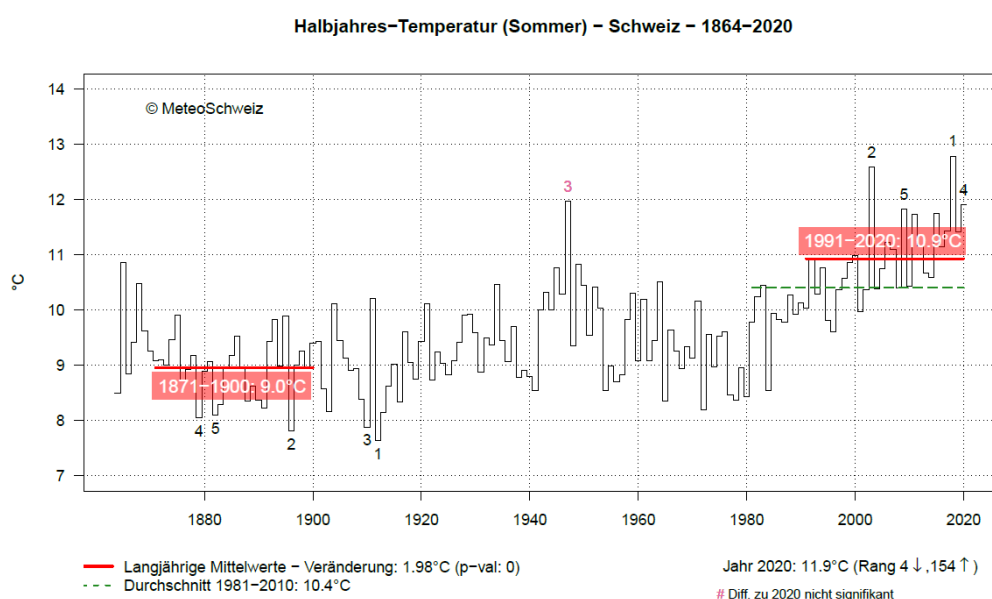


Abbildung 16: Verlauf der Sommerhalbjahrestemperatur in der Schweiz seit 1864.

Für die Hitzethematik ist zentral, ob sich auch die Häufigkeit und Intensität der heissen Tage sowie der Mehrtagesperioden der Temperaturmaxima, – mittel und –minima geändert haben. Scherrer et al. (2016) zeigen beispielsweise, dass heisse Tage (berechnet mit dem 99% Perzentil der T_{max} , T_{x99p}) heute doppelt so häufig auftreten und zudem auch heisser wurden. Ebenso nahm die Anzahl von Hitzetagen ($T_{max} \geq 30$ °C) an den Messstationen zu, wie beispielhaft anhand der Entwicklung der Anzahl Hitzetage in Basel (**Abbildung 17**) klar ersichtlich wird.

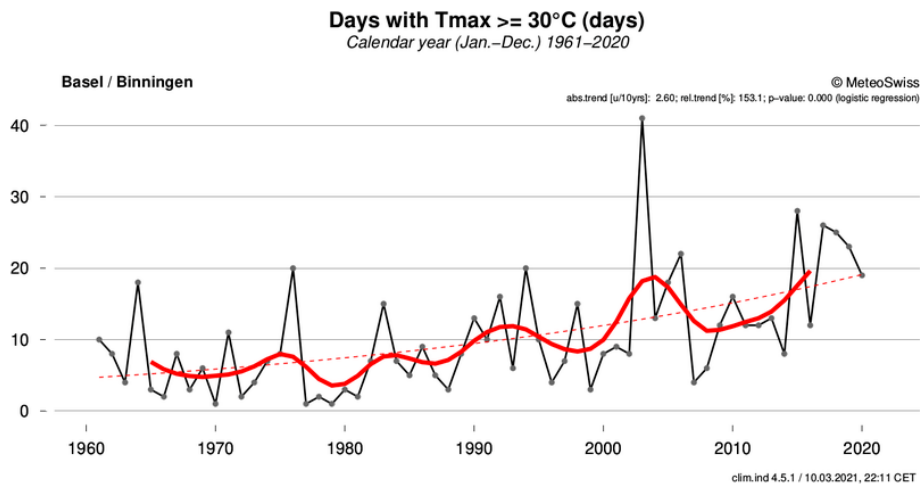


Abbildung 17: Entwicklung der Anzahl Hitzetage pro Jahr in Basel für die Periode 1961–2020.

Ähnlich sieht es aus, wenn die längsten Hitzeperioden pro Jahr mit einer Tagesmitteltemperatur von 25 °C oder mehr betrachtet werden. So traten zum Beispiel in Zürich-Fluntern Hitzeperioden mit mindestens einem Tag mit einer mittleren Tagestemperatur von 25 °C oder höher in den letzten drei Jahrzehnten weitaus häufiger auf verglichen mit zuvor. Gleichzeitig sind die Hitzeperioden deutlich länger geworden (**Abbildung 18**).

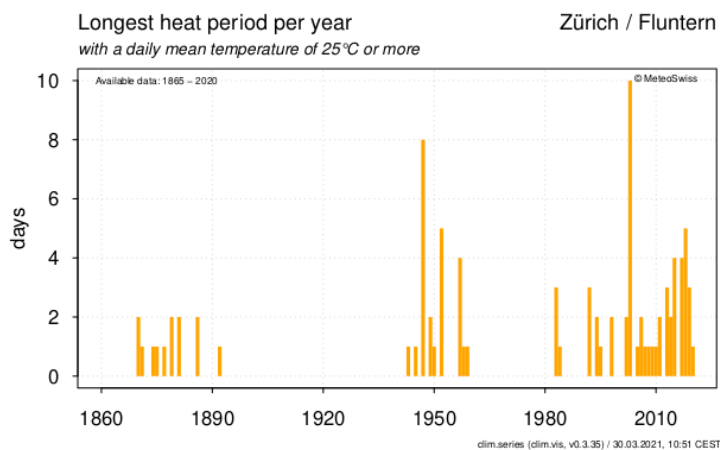


Abbildung 18: Auftreten der längsten jährlichen Hitzeperiode mit einem Tagesmittelwert von 25 °C oder mehr an der Station Zürich-Fluntern seit 1865.

Neben der Länge und Intensität von Hitzeperioden ist auch das Auftreten im Jahresgang von Interesse. **Abbildung 19** (oben) zeigt exemplarisch am Beispiel der Messstation Genf-Cointrin, dass in den letzten Jahrzehnten eine Tendenz zu einem früheren Auftreten des ersten Zeitpunktes im Jahr festzustellen ist, an dem ein Tagesmaximum von 30 °C erstmals überschritten wurde. Für das erste Auftreten von Stufe 2 Hitzewarnungen im Jahr, i.e. der Zeitpunkt im Jahr, an dem die Tagesmitteltemperatur von 25 °C erstmals überschritten wurde, zeigt sich diese Entwicklung weniger deutlich (**Abbildung 19**, unten).

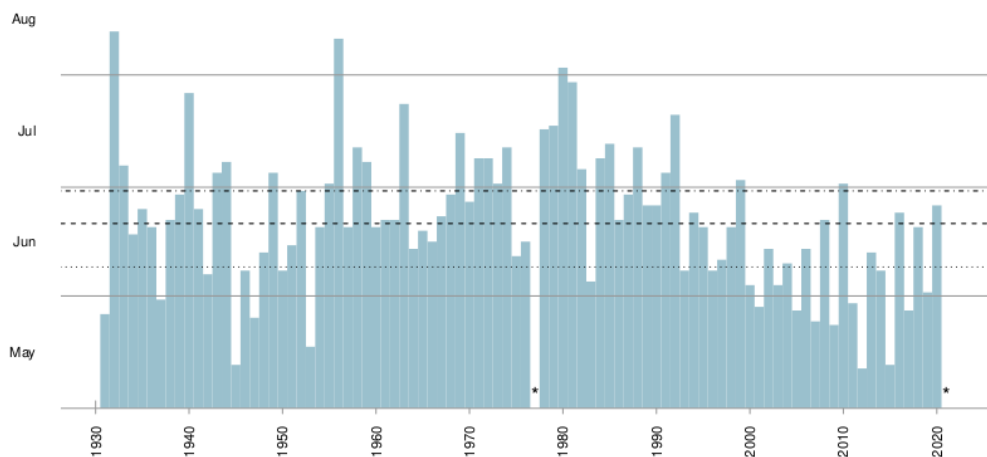
First occurrence: Dog day ($ths_{200dx} \geq 30^\circ\text{C}$), Genève / Cointrin

Annual counting period: 01.01.–31.12.; Current period is incomplete: 01.01.2021–04.05.2021; Reference: 1981–2010; (*) missing data

Earliest date: 11.05.2012
 Latest date: 12.08.1932

--- 30% before 09.06. - - 50% before/after 21.06. - · - 30% after 30.06.

© MeteoSwiss



first.last.ts (first.last, v0.7.1) / 05.05.2021, 11:17 CEST

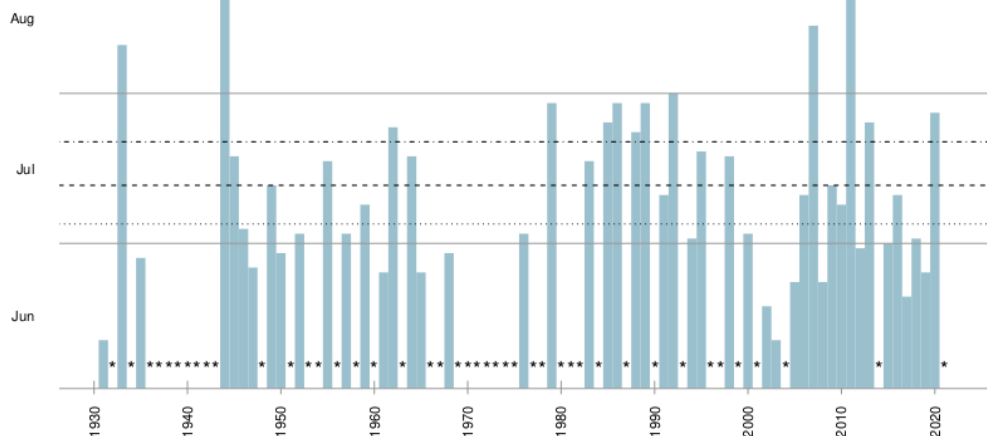
First occurrence: $ths_{200d0} \geq 25^\circ\text{C}$, Genève / Cointrin

Annual counting period: 01.01.–31.12.; Current period is incomplete: 01.01.2021–04.05.2021; Reference: 1981–2010; (*) missing data

Earliest date: 11.06.1931, 11.06.2003
 Latest date: 23.08.1944

--- 30% before 05.07. - - 50% before/after 13.07. - · - 30% after 22.07.

© MeteoSwiss



first.last.ts (first.last, v0.7.1) / 05.05.2021, 11:16 CEST

Abbildung 19: Erstes Auftreten eines Hitzetages ($T_{max} \geq 30^\circ\text{C}$) und einer Stufe 2 Warnung ($T_{mean} \geq 25^\circ\text{C}$) im Jahr an der Station Genf-Cointrin seit 1931. Ein * bedeutet, dass im entsprechenden Jahr kein Hitzetag bzw. keine Warnstufe 2 aufgetreten ist.

Der Begriff Hitzewelle

Der Begriff Hitzewelle wurde an der MeteoSchweiz bislang nicht einheitlich definiert und wird unterschiedlich interpretiert und angewendet. Auch im WMO Dokument, das Richtlinien zur Definition und zum Monitoring von extremen Wetter- und Klimaereignissen enthält (WMO, 2016), wird ersichtlich, dass es keine einheitliche Definition gibt, sondern diese immer stark von der Anwendung abhängt (z. B. Klimamonitoring, Gesundheitsgefährdung, Arbeiten im Freien etc.; siehe auch de Freitas und Grigorieva, 2015).

Ab Sommer 2021 spricht MeteoSchweiz von einer «Hitzewelle», wenn das Warnkriterium der Stufe 3 überschritten wird, d.h. wenn mindestens drei Tage in Folge eine Tagesmitteltemperatur von 25 °C oder höher in einer Region vorliegt.

Bei einem Zeitraum mit hohen Temperaturen, die aber nicht die Kriterien von mindestens einer Stufe 3 Warnung erreichen, spricht MeteoSchweiz von einer «Hitzeperiode», einer «Periode mit hohen Temperaturen» oder von «heissen Tagen».

7.1.1 Vorgehen bei der klimatologischen Betrachtung eines Hitzeereignisses

Allgemeines

Die klimatologische Betrachtung und Einordnung von Hitzetagen und -perioden wurde an der MeteoSchweiz bis Sommer 2020 ausschliesslich auf der Basis von gemessenen Werten der Tagesmaxima durchgeführt. Analysen der gefühlten Temperatur nach *HI* oder anderen Hitzeindikatoren wurden nicht, oder zumindest nicht standardmässig, getätigt. Dies hat im Wesentlichen folgende Gründe:

- Viele Hitzeindikatoren, wie auch der *Heat Index (HI)*, verwenden meist stündliche Eingangsgrößen, welche im Messnetz der MeteoSchweiz «erst» seit ~1981 vorliegen. Auswertungen, die hingegen nur auf Tagesmaximumtemperaturen basieren, sind über einen deutlich längeren Zeitraum ab 1864 vorhanden.
- Die Kommunikation von Hitzeereignissen mit Hilfe der Tagesmaximumtemperaturen ist intuitiver als die Verwendung von komplexen Indikatoren.

Der Vorteil des neuen Hitzeindikators Tagesmitteltemperatur ab Sommer 2021 liegt darin, dass nun auch eine klimatologische Einordnung von Hitzewarnperioden gemacht werden kann. Ab 2021 werden bei klimatologischen Betrachtungen neben der Tagesmaximumtemperatur nun auch die Tagesmitteltemperatur und die Tagesminimumtemperatur berücksichtigt. Dazu wurden verschiedene CATs angepasst. Für die Kommunikation von Hitzeereignissen wird neu nicht nur die Tagesmaximum-, sondern auch die Tagesminimumtemperatur verwendet. Auf die Tagesmitteltemperatur wird in der Klimakommunikation weitestgehend verzichtet, da sie für die Bevölkerung keine gebräuchliche Grösse ist.

Vorgehen bei der Betrachtung von Hitzeperioden

Bisher wurde jede Hitzeperiode individuell betrachtet. Die Auswertungen richteten sich nach der erwarteten bzw. der effektiven Dauer der Hitzeperiode. Dadurch kann auf die Besonderheiten der aktuellen Situation oder auf das Klima eines Gebietes eingegangen werden. So wurde zum Beispiel im Juni 2017 die Anzahl der 5-Tagesperioden mit einem mittleren T_{max} von ≥ 30 °C ausgewertet. Im Sommer 2015 waren es die 7-Tages- und im Sommer 2018 10-Tagesperioden (MeteoSchweiz, 2016; MeteoSchweiz, 2018). Für spezielle Studien, wie den BAFU-Hitzebericht, wurde zusätzlich auch die 14-Tagesperiode ausgewertet (BAFU, 2016).

Abbildung 20 zeigt exemplarisch anhand des Hitzesommers 2018 wie die Dauer der Hitzeperiode festgelegt wird. Die Schwierigkeiten, eine Hitzeperiode räumlich und zeitlich festzulegen, wird klar ersichtlich und auch die damit verbundene Problematik, solche Entscheide vollständig zu automatisieren. Im Sommer 2018 wurde schliesslich als Kompromiss für die Alpennordseite die Phase der intensivsten Periode auf zehn Tage festgelegt, auch wenn für einzelne Landesteile andere Periodenlängen ebenfalls denkbar gewesen wären. Für die Alpensüdseite hingegen wurde aufgrund vergleichbarer Überlegungen eine Periodenlänge von 16 Tagen festgelegt. Anschliessend wurde mit Hilfe eines eigens für Periodenanalysen entwickelten Tools (CAT evoclim) für verschiedene Stationen die gewählte 10-Tagesperiode ausgewertet (**Abbildung 21**).

	SMA	KLO	BAS	GVE	SIO	BER	LUZ	NEU	
	<div style="display: flex; justify-content: space-between; font-size: small;"> Tagesmaximum 30 Grad und höher Tagesmaximum 29 bis 29.9 Grad Tagesmaximum unter 29 Grad </div>								
									Nordseite
12.08.2018	29.7	30.9	29.8	31.1	30.7	30	28.3	30.7	
11.08.2018	24.5	25.6	25.1	25.5	27.2	24.8	24.3	25.5	
10.08.2018	22.5	23	24.9	25.6	26.7	24.9	22.5	25.5	
09.08.2018	31.4	32.1	28.6	21.6	27.4	26.7	29.7	25.6	
08.08.2018	29.3	32.1	30.8	32.2	31.2	30	27.9	29.6	9 bis 11 Tage Entscheid: 10 Tage
07.08.2018	32.7	32.5	34.3	33.8	32.8	31.7	31.1	31.5	
06.08.2018	33.4	34.6	34.3	34.8	35.4	33	32	30.9	
05.08.2018	33.5	35	33.2	34.3	36.2	33.1	34.4	33.8	
04.08.2018	33.4	34.7	34.8	32.4	35.6	33	34	32.9	
03.08.2018	32.7	35.1	34.4	32.6	34.4	32.8	33.4	34	
02.08.2018	30.2	32.2	31.9	31	32.3	30.7	31	31.4	
01.08.2018	33.4	35.6	31.3	34.3	35.5	32	32.2	32	
31.07.2018	34.6	35.7	34.5	33.4	35.9	33.3	33.9	32.4	
30.07.2018	32.8	34.4	34	32.7	34.9	32.1	33.1	31.7	
29.07.2018	29.9	31.7	32	31.3	31	29	30.6	28.6	ganze heisse Periode 16 Tage
28.07.2018	23.5	23.3	26.2	23.5	24.2	21.6	24.9	21.9	
27.07.2018	31.6	32.7	33	33.1	35	31.1	31.8	30.9	
26.07.2018	31.9	32.5	33	32.8	34.8	32	32	31.9	
25.07.2018	31.1	33	33.1	30.8	32.6	29.8	31.3	30.2	
24.07.2018	30.2	31.7	32.2	31.6	32.3	30.8	28.8	28.9	
23.07.2018	25.5	27.5	27.5	27.8	30.8	26.6	25.6	26.9	
22.07.2018	22.9	26.9	27.2	26.6	28.3	25.4	24.5	25.7	
21.07.2018	20.5	22.1	22.5	23.9	23.7	21.1	21.1	20	

Abbildung 20: Festlegung der Dauer der Hitzeperiode im Sommer 2018 für die Alpennordseite.

Die Häufung von Hitzesommern in den letzten Jahren und die relativ aufwändige Art der Analysen haben dazu geführt, dass für ausgewählte Dauerstufen (3-,5-,7-,10-, 14-Tage) Analysen wie in **Abbildung 21** seit 2018 für T_{max} , T_{min} und neu auch für T_{mean} regelmässig automatisiert erstellt und im internen MeteoSchweiz Climate Browser zur Verfügung gestellt werden.

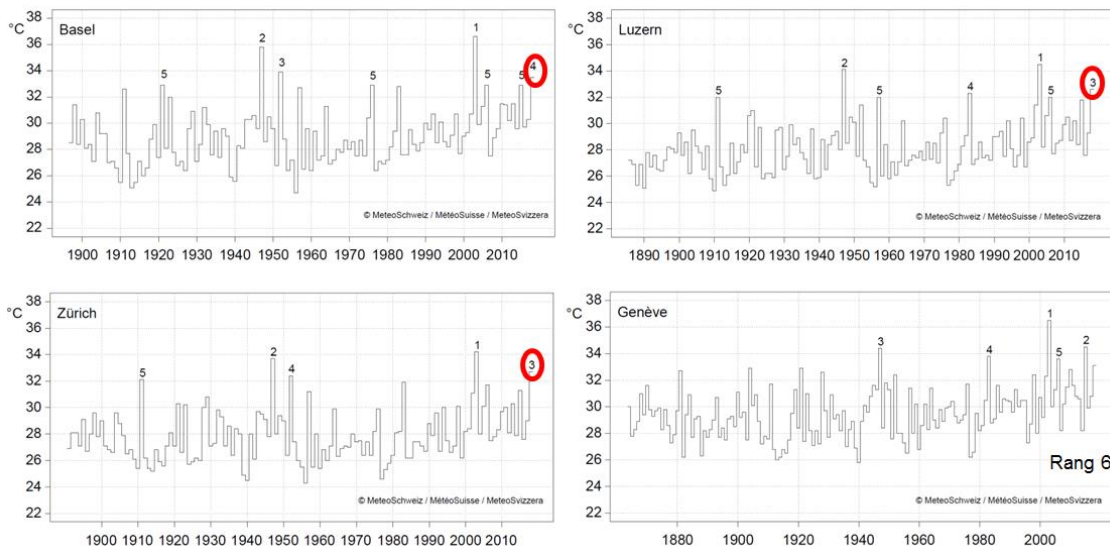


Abbildung 21: Analyse der intensivsten 10-tägigen Hitzeperiode für ausgewählte Stationen auf der Alpennordseite. Gezeigt wird das Mittel der täglichen T_{max} während dieser Periode und der Rang des Sommers 2018 in der Klimatologie, sowie die übrigen obersten fünf Ränge.

Es wurden vereinzelt auch weiterführende Analysen durchgeführt im Sinne von «Anzahl Tage mit einer Tagesmaximumtemperatur von mindestens 30 °C», oder die «längste Periode mit Tagen über einer Tagesmaximumtemperatur von mindestens 30 °C».

Betrachtung von Einzeltagen

Zusätzlich zu den Analysen von Hitzeperioden als Ganzes interessieren die Höchstwerte einzelner Tage, insbesondere die Fragestellung, ob es sich um absolute Rekorde handelt. Als Informationsquelle stehen im «Data Ware House» (interne Datenbank; DWH) von MeteoSchweiz Rekordwertlisten zahlreicher Stationen zur Verfügung (**Abbildung 22**). Die Basis für die Analysen bilden homogenisierte Tagesmaximum-, Tagesminimum-, oder Tagesmitteltemperaturreihen. Ergänzend wird auch das erste und letzte Auftreten von Hitzetagen systematisch ausgewertet.

Name	Rang	Datum	Rekordwert
Bern / Zollikofen	1	07.07.2015	36.8
Bern / Zollikofen	2	13.08.2003	36.8
Bern / Zollikofen	3	29.07.1947	35.7
Bern / Zollikofen	4	25.07.2019	35.4
Bern / Zollikofen	5	09.08.2003	35.4
Bern / Zollikofen	6	28.07.1921	35.4
Bern / Zollikofen	7	13.07.1949	35.1
Bern / Zollikofen	8	30.07.1947	35.1
Bern / Zollikofen	9	10.08.2003	35.0
Bern / Zollikofen	10	24.07.2019	34.9

Name	Rang	Datum	Rekordwert
Bern / Zollikofen	1	07.07.2015	27.7
Bern / Zollikofen	2	05.07.2015	27.2
Bern / Zollikofen	3	27.06.2019	27.0
Bern / Zollikofen	4	05.07.1952	26.9
Bern / Zollikofen	5	27.07.1947	26.8
Bern / Zollikofen	6	19.07.1871	26.8
Bern / Zollikofen	7	25.07.2019	26.7
Bern / Zollikofen	8	07.08.2015	26.7
Bern / Zollikofen	9	04.07.2015	26.6
Bern / Zollikofen	10	30.06.2019	26.5

Abbildung 22: Die zehn höchsten Temperaturmaxima (links) und Temperaturmittelwerte (rechts) in Bern seit Messbeginn 1864 bis 2020.

7.2 Empirische Einordnung von extremen Temperaturen

Aussagen zur Häufigkeit eines aussergewöhnlichen Wetterereignisses sind für MeteoSchweiz sehr wichtig. Schon seit längerem werden an der MeteoSchweiz für Niederschlag und Windböen empirische Wiederkehrperioden und Extremwertanalysen berechnet und täglich aktualisiert. Im Rahmen des Hitzeprojektes wurde eine relative Einordnung von (dem Datum und Jahr entsprechenden) extrem warmen und kalten Temperaturen vorgenommen, sowohl für Tagesmittel, -maxima und -minima als auch für mehrtägige Hitze- und Kälteperioden.

Die gemessene Temperatur an einer Messstation hat ausgeprägte jahreszeitliche Schwankungen, sowohl im Mittelwert als auch in der Varianz. Zudem wird für die letzten Jahrzehnte eine deutliche Erwärmung beobachtet. Für eine Aussage zur Seltenheit eines bestimmten Ereignisses müssen diese unterschiedlichen Klimabedingungen deshalb relativ zueinander vergleichbar gemacht werden. Zu diesem Zweck werden in einem ersten Schritt die Temperaturdaten vom Trend bereinigt. In einem zweiten Schritt wird eine schiefe t-Verteilung an die Tagesdaten angepasst, wobei die Parameter der Verteilung als Funktion des Kalendertages variieren. Diese Abhängigkeit wird durch eine harmonische Funktion zweiten Grades modelliert. Die Modellierung erlaubt es, die vorhandenen täglichen Temperaturdaten in eine Standard-Normalverteilung zu transformieren und damit die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses im Klima zum Zeitpunkt der Messung (Jahr, Kalendertag) zu beurteilen.

Extrem warm war zum Beispiel der 07.07.2015 mit täglichen Maximaltemperaturen im Mittelland zwischen 31 und fast 40 °C (**Abbildung 23**, links). Im Bezug zu den erwarteten Werten zu diesem Zeitpunkt waren die Messungen so aussergewöhnlich wie man sie, je nach Standort, einmal in 3 - 8 Jahren, respektive 15 - 30 Jahren oder noch seltener erwarten würde.

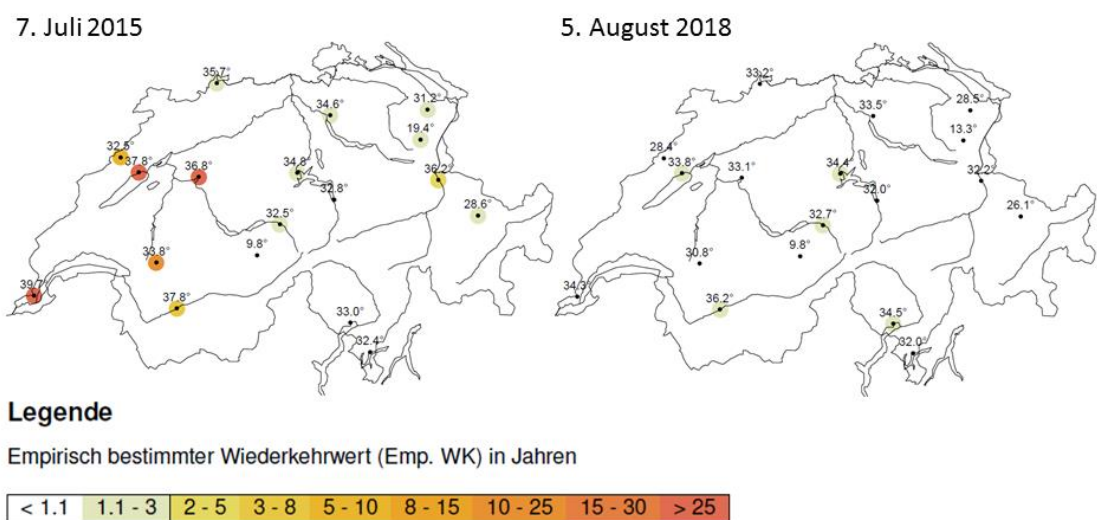


Abbildung 23: Gemessene Maximaltemperatur und entsprechende empirische Wiederkehrperiode am 07.07.2015 (links) und am 05.08.2018 (rechts). Die empirischen Wiederkehrperioden wurden aus der Referenzperiode 1961-2018 bestimmt.

Andererseits sind Tagesmaxima, wie sie im Sommer 2018 gemessen wurden, im heutigen Klima jährlich bis maximal dreijährlich zu erwarten (illustriert am Beispiel des 05.08.2018, **Abbildung 23**, rechts). Karten mit dem empirischen Wiederkehrwert für die Tagesmaximum-, Tagesmittel- und Tagesminimumtemperatur für verschiedene Dauerstufen (1, 3, 5, 7, 10, 14 Tage) werden täglich mit dem CAT event.eval erstellt und im Climate Browser dargestellt.

7.3 Hitze in der Zukunft

Die Zunahme der Hitzebelastung auf dem Gebiet der Schweiz in den vergangenen Jahrzehnten (siehe Kapitel 7.1) wird sich aller Voraussicht nach auch in Zukunft fortsetzen. Bereits die nationalen Schweizer Klimaszenarien CH2011 (CH2011, 2011) haben deutlich die für das 21. Jahrhundert projizierte Entwicklung hin zu einem wärmeren Klima und vermehrtem Auftreten von heissen Temperaturextremen aufgezeigt. Diese Entwicklung wurde durch die 2018 veröffentlichten CH2018 Klimaszenarien (CH2018, 2018) bestätigt und bezüglich Informationen zur künftigen Hitzebelastung noch detaillierter aufgearbeitet.

Generell wird für die Schweiz bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine weitere Zunahme der Jahresmitteltemperatur von +0,6 - 1,9 °C (Szenario mit starkem Klimaschutz) bzw. von +3,3 - 5,4 °C (Szenario ohne Klimaschutz) erwartet (**Abbildung 24**). Während des Sommers ist gegenüber dem Jahresmittel mit einem noch stärkeren Anstieg der Mitteltemperaturen zu rechnen (+0,7 - 2,4 °C bzw. +4,1 - 7,2 °C). Verstärkt durch positive Rückkoppelungsmechanismen über ausgetrockneten Böden werden die höchsten im Laufe eines Jahres zu erwartenden Temperaturen sogar noch deutlicher ansteigen und zwar um +0,7 - 3,2 °C (Szenario mit starkem Klimaschutz) bzw. +3,9 - 8,7 °C (Szenario ohne Klimaschutz).

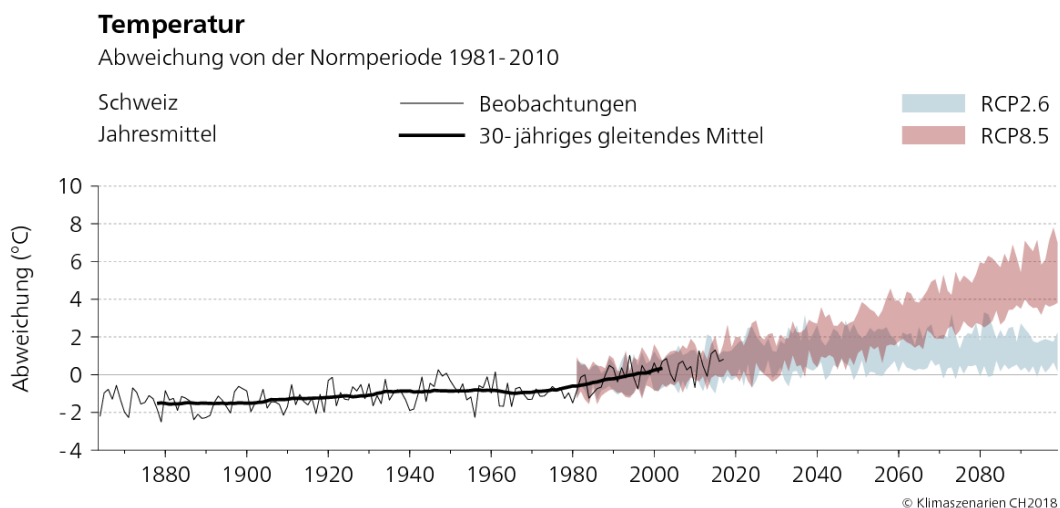


Abbildung 24: Projizierte Entwicklung der Schweizer Jahresmitteltemperatur (Abweichung gegenüber der Norm 1981-2010) für ein Szenario mit starkem Klimaschutz (blau, RCP2.6) sowie ein Szenario ohne Klimaschutz (violett, RCP8.5).

Vor allem im Falle eines Szenarios ohne expliziten Klimaschutz werden diese erwarteten Temperaturänderungen in vielen Regionen mit einem deutlichen Anstieg der Hitzebelastung einhergehen.

Exemplarisch zeigt **Abbildung 25** hierzu die räumliche Verteilung der Anzahl an Hitzetagen pro Jahr (Tage mit einer Maximaltemperatur von mehr als 30 °C) über dem Gebiet der Schweiz im heutigen Klima (1981 - 2010) sowie Ende Jahrhundert (Szenario ohne Klimaschutz). Über weiten Teilen der Schweiz wird sich die mittlere Anzahl an Hitzetagen verdrei- bis vervierfachen. Treten im Schweizer Mittelland heute im Schnitt verbreitet 5 - 10 Hitzetage pro Jahr auf, so werden Ende Jahrhundert Häufigkeiten von mehr als 30 Tagen pro Jahr erwartet. In Tallagen der Westschweiz sowie des Tessins muss mit noch grösseren Häufigkeiten von zum Teil mehr als 40 Tagen pro Jahr gerechnet werden. Hier könnte also jeder zweite Sommertag eine Maximaltemperatur von über 30 °C aufweisen. Nicht berücksichtigt ist in diesen Projektionen der Einfluss der städtischen Wärmeinsel, der in dicht bebauten Stadtgebieten eine noch grössere Hitzebelastung bewirken kann.

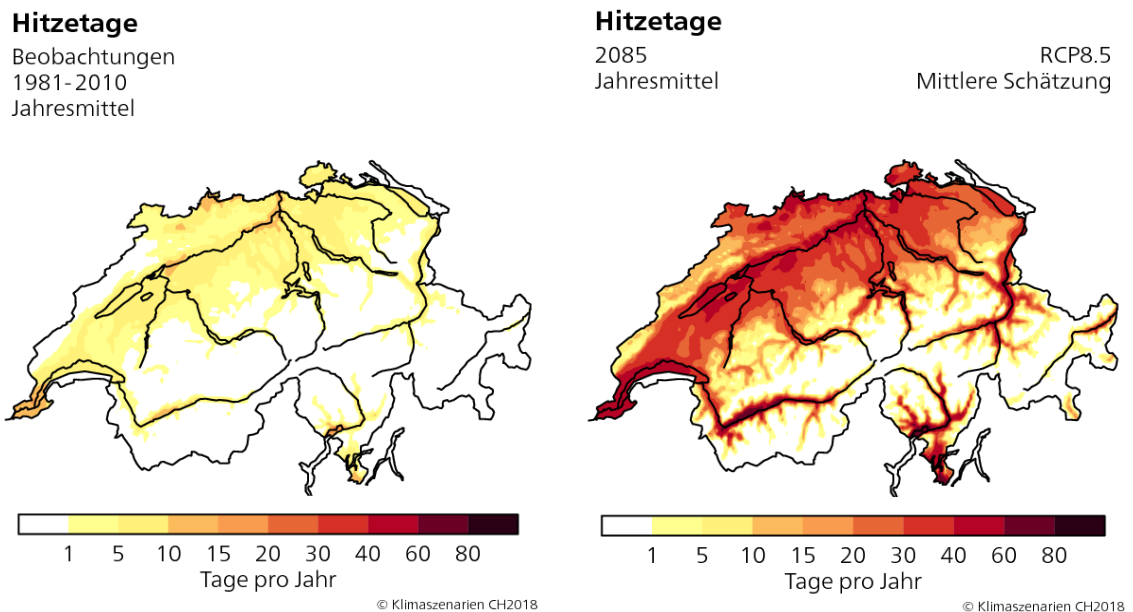


Abbildung 25: Heutige (1981-2010, links) und zukünftige (um 2085, rechts) Verteilung der Anzahl an Hitzetagen (Tage mit einer Maximaltemperatur von mehr als 30 °C) über dem Gebiet der Schweiz. Der Zukunftsprojektion liegt ein Szenario ohne Klimaschutz (RCP8.5) sowie die mittlere Schätzung des verwendeten Klimamodell-Ensembles zugrunde.

Wie in den vorangegangenen Kapiteln ausgeführt, ist neben der Temperatur auch die Luftfeuchte ein wichtiger Parameter zur Beurteilung der Hitzebelastung des menschlichen Organismus. In den CH2018 Klimaszenarien wurde die Feuchttemperatur *TW* (*wet bulb temperature*; auch *wbt*) als Hitzestressindikator, der Lufttemperatur und Luftfeuchte in einer Zahl kombiniert, ausgewählt. Die durchgeführten Analysen, beispielhaft für vier Standorte in der Schweiz und für ein Szenario ohne Klimaschutz in **Abbildung 26** gezeigt, ergeben einen deutlichen Anstieg der Hitzebelastung im Laufe des 21. Jahrhunderts. So wird in Zürich ein kritischer Bereich mit Feuchttemperaturen von über 22 °C im heutigen Klima nur in wenigen Jahren erreicht oder überschritten. In Zukunft ist jedoch regelmässig und ab Mitte Jahrhundert in jedem Jahr mit solch kritischen Verhältnissen zu rechnen. In Lugano und Genf treten Werte über 22 °C bereits heute regelmässig auf. In Zukunft werden jedoch deutlich extremere Verhältnisse und maximale sommerliche Feuchttemperaturen von zum Teil mehr als 26 °C erwartet.

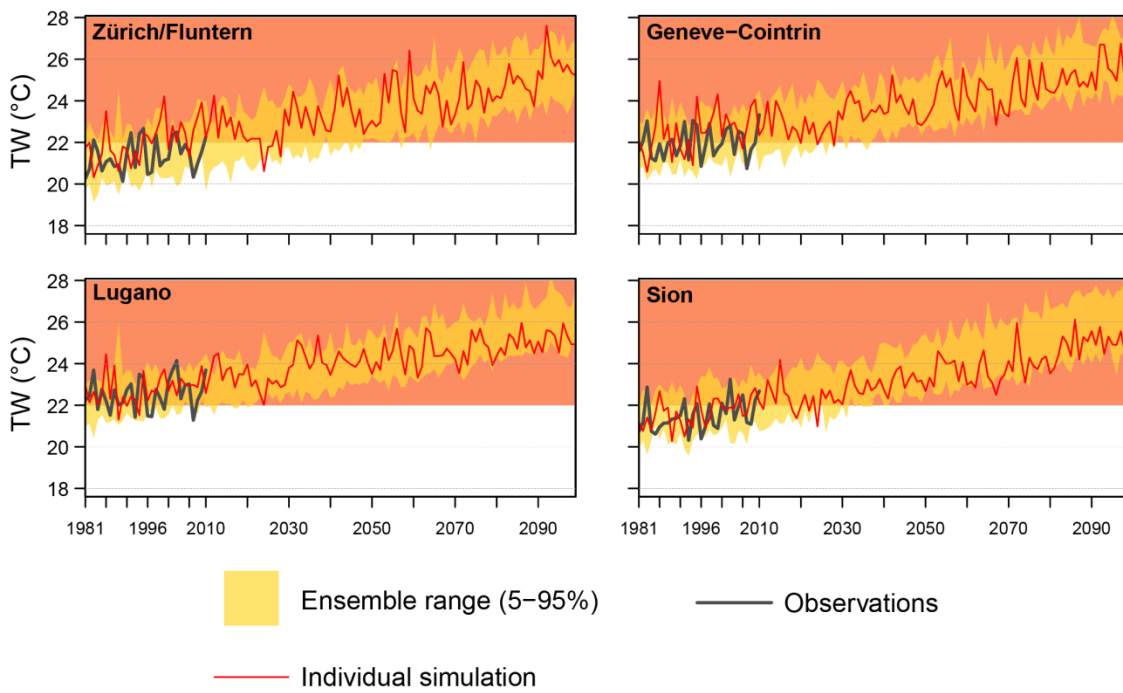


Abbildung 26: Beobachtete (grau) und für ein Szenario ohne Klimaschutz projizierte (gelb) Entwicklung der maximalen sommerlichen Feuchttemperatur TW an den Stationen Zürich-Fluntern, Genf-Cointrin, Lugano und Sion. Der gelbe Bereich zeigt den Modellunsicherheitsbereich, die rote Linie eine Einzelsimulation. Der rot unterlegte Hintergrund kennzeichnet einen gesundheitlich kritischen Bereich mit einer Feuchttemperatur von mehr als 22 °C.

8 Das Projekt HEAT-SHIELD

8.1 Überblick

Hitzestress stellt eine potenziell grosse gesundheitliche Gefahr dar, mit Bedeutung für viele gesellschaftliche und wirtschaftliche Sektoren. In vielen Regionen ist bereits heute ein deutlicher negativer Einfluss auf die Gesundheit zu beobachten (siehe z.B. Casanueva et al., 2019 und Referenzen darin; Ragettli et al., 2017). Neben rein gesundheitlichen Aspekten kann Hitzestress am Arbeitsplatz aber auch für wirtschaftliche Produktionseinbussen verantwortlich sein. Dieser Effekt wird mit dem projizierten Klimawandel und insbesondere mit der erwarteten Klimaerwärmung zunehmen und die Entwicklung von Anpassungsstrategien zum Schutz der arbeitenden Bevölkerung erfordern. Zentral hierfür sind Kenntnisse über die klimatischen und nicht-klimatischen Einflussfaktoren auf Hitzestress und verlässliche Hitze-Prognosen auf allen zeitlichen Skalen.

Das europäische HEAT-SHIELD Projekt, gefördert durch das HORIZON 2020 Forschungsprogramm, stösst in diese Lücke mit dem Ziel, die Anfälligkeit der arbeitenden Bevölkerung gegenüber Hitzestress zu verringern und geeignete Anpassungsstrategien zu entwickeln (www.heat-shield.eu). HEAT-SHIELD betrachtet explizit fünf strategische wirtschaftliche Sektoren, die zusammengenommen circa 50% der europäischen Arbeitnehmerschaft repräsentieren: Transportwirtschaft, Baugewerbe, industrielle Produktion, Tourismus und Landwirtschaft. Das Projekt verfolgt einen durchweg interdisziplinären Ansatz mit Teilnehmern und Partnern aus unterschiedlichen Fachdisziplinen wie Klimatologie, Human-Biometeorologie und Physiologie sowie aus Politik, Verwaltung, Wirtschaft und Organisationen der Zivilgesellschaft. Die Rolle der MeteoSchweiz ist es dabei, die meteorologischen und klimatologischen Grundlagen, die von den Projektpartnern verwertet werden, bereitzustellen und zu bewerten.

8.2 Hitzeindex und Methodik

Zur Beschreibung von Hitzestress steht potentiell eine grosse Anzahl von Indizes zur Verfügung (siehe Kapitel 10.2). Aus diesen wurde für die Analysen in HEAT-SHIELD die *wet bulb globe temperature* (*wbgt*) als zu betrachtender Hitzeindex ausgewählt. Die *wbgt* ist das am weitesten verbreitete Mass für Hitzestress am Arbeitsplatz und lässt sich aus meteorologischen Grössen, die standardmässig an Klimastationen gemessen und von Wetter- und Klimamodellen berechnet werden, ableiten. Die *wbgt* ist zudem mithilfe internationaler Standards (z.B. ISO Normen) auf verschiedene spezifische Arbeitsumgebungen anwendbar. In HEAT-SHIELD wird die *wbgt* in zwei Varianten berechnet: (1) *wbgt* im Schatten bzw. im Gebäudeinneren (Berücksichtigung von Lufttemperatur und Luftfeuchte; *wbgt.shade*) und (2) *wbgt* in der Sonne bzw. ausserhalb von Gebäuden (zusätzliche Berücksichtigung von direkter Sonnenstrahlung; *wbgt.sun*).

sichtigung von solarer Einstrahlung und Windgeschwindigkeit; *wbgt.sun*). Existierende *wbgt*-Schwellenwerte zur Identifikation von Hitzestress (bei Überschreitung eines bestimmten *wbgt*-Wertes) wurden dabei im Rahmen von HEAT-SHIELD angepasst unter Berücksichtigung der spezifischen Arbeitsbelastung (niedrig bis hoch) und des persönlichen Grades der Akklimatisierung (Ist die betroffene Person die bestehenden klimatischen Verhältnisse gewöhnt oder nicht?). So kann ein *wbgt*-Wert über 27 °C zum Beispiel als hohe Hitzebelastung für schlecht akklimatisierte Arbeitnehmer mit mittlerer Arbeitsbelastung interpretiert werden. Die entsprechende Verhaltensempfehlung in einem solchen Fall wäre eine Reduktion der effektiven Arbeitszeit auf 15 Minuten pro Stunde und eine Flüssigkeitsaufnahme von mindestens einem Liter.

Bei Vorhandensein der entsprechenden Messungen kann die *wbgt* für die Vergangenheit (in der Schweiz in der Regel seit circa 1981) und Gegenwart direkt aus Messwerten an Klimastationen angenähert werden. Für Vorhersagen und Projektionen (siehe Kapitel 8.3 und 8.4) wird auf numerische Wetter- und Klimamodelle zurückgegriffen. Problem ist hierbei allerdings die grobe räumliche Auflösung der Modellinformation (typische Gitterzellen haben eine Kantenlänge von mehreren Kilometern), die noch keine Aussagen für die lokale (Stations-)Skala zulässt. Ausserdem stellen numerische Modelle immer nur ein vereinfachtes Abbild der Realität dar und sind in der Regel mit systematischen Fehlern behaftet. In HEAT-SHIELD wird dieser Problematik mit einer statistischen Nachbearbeitung der Modellinformationen begegnet. Diese erlaubt ein Herunterbrechen der Modellinformation auf die lokale Skala sowie eine Korrektur systematischer Modellfehler. Die verwendete Methode namens «Quantile Mapping» (QM) führt hierzu eine verteilungsbasierte Korrektur der Modellausgabe durch (siehe **Abbildung 27**): Die simulierte Verteilung von Tagesmittel- und Tagesmaximum-Werten mehrerer meteorologischer Variablen in einem historischen Referenzzeitraum (gelb) wird mit der beobachteten Verteilung im gleichen Zeitraum (schwarz) verglichen. Aus diesem Vergleich wird eine verteilungsbasierte Fehlerkorrektur entwickelt, die jeden simulierten Wert in einen korrigierten Wert übersetzt. Im historischen Referenzzeitraum entspricht die Verteilung der korrigierten Werte (rot gestrichelt) angenähert der beobachteten Verteilung. In einem zweiten Schritt kann die so kalibrierte Fehlerkorrektur auf die Modellprognosen und -projektionen für die Zukunft angewandt werden. QM wird im HEAT-SHIELD Projekt auf identische Art und Weise wie auch in den CH2018 Klimaszenarien verwendet, was unter anderem eine unabhängige Anwendung der Fehlerkorrektur auf die einzelnen meteorologischen Grössen (Temperatur, Feuchte etc.) bedeutet. Erst nach dieser univariaten Korrektur wird die *wbgt* aus dem korrigierten Modelloutput berechnet. Weitere Informationen zur Methodik sind dem CH2018 Technischen Bericht (CH2018, 2018) und Casanueva et al. (2020) zu entnehmen. Als Beobachtungsreferenz dienen Messungen an mehr als 1000 europäischen Stationen und nach Anwendung der Fehlerkorrektur sind Prognosen und Projektionen der *wbgt* für jede dieser Stationen verfügbar.

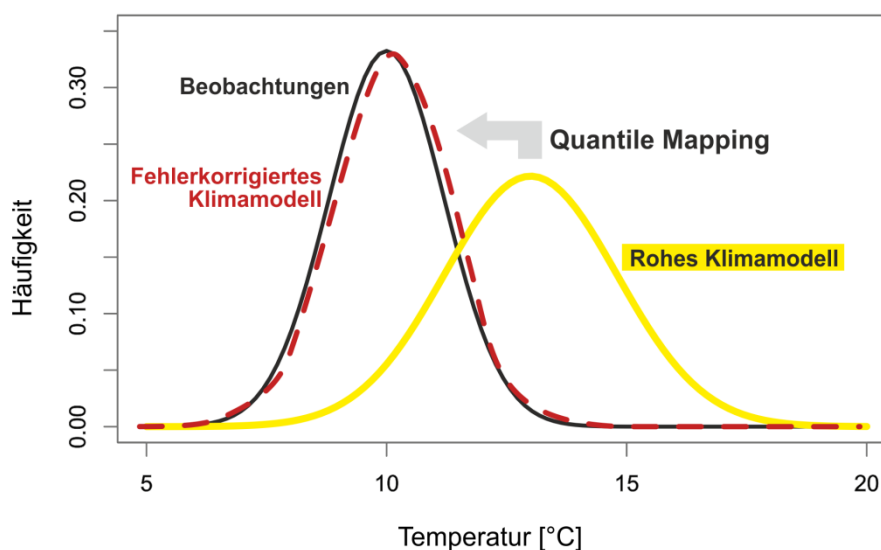


Abbildung 27: Schematische Illustration der Funktionsweise von «Quantile Mapping» (QM), hier als Beispiel für die meteorologische Grösse Temperatur: Der fehlerbehaftete und gitterzellbasierte Output eines Wetter- oder Klimamodells (gelb) wird so korrigiert, dass die Verteilung der korrigierten Modellwerte (rot gestrichelt) in einem historischen Referenzzeitraum angenähert der beobachteten Verteilung an Stationen entspricht. In einem zweiten Schritt wird die so kalibrierte Fehlerkorrektur auf die Zukunftsprognosen und -projektionen der gleichen Modelle angewendet.

8.3 Ein Hitze-Früherkennungssystem auf europäischer Skala

MeteoSchweiz hat für HEAT-SHIELD ein System entwickelt, welches die erwarteten Werte des Hitzeindex *wbgt* möglichst frühzeitig vorhersagen soll. Als Basis dienen die Langfristvorhersagen des EZMW (www.ecmwf.int). Zweimal pro Woche rechnet das EZMW Vorhersagen für vier Wochen in die Zukunft, die sogenannten «extended range forecasts», welche Modellvorhersagen mit einer Maschenweite von etwa 36 km liefern. Es handelt sich dabei um Ensemblevorhersagen. Das heisst, eine einzelne Vorhersage besteht aus vielen einzelnen Modellläufen, welche sich nur leicht in den Anfangsbedingungen unterscheiden, die Differenzen liegen aber alle innerhalb der Unsicherheit der Beobachtungen (begrenzte Anzahl Messungen, mögliche Messfehler). In den ersten Tagen der Vorhersage liegen die einzelnen Modellläufe noch nahe beieinander, die Streuung der Ensemblevorhersage nimmt aber aufgrund des chaotischen Charakters der Atmosphäre mit der Vorhersagedauer rasch zu. Wetterprognosen im üblichen Sinn, also Vorhersagen von Einzelereignissen und Zeitverläufen an bestimmten Ortschaften, sind deshalb auf wenige Tage beschränkt, darüber hinaus können aber aus der Ensemblevorhersage Tendenzen für die Witterung in grösseren Regionen abgeleitet werden.

Damit Vorhersagen über 7 - 10 Tage hinaus möglich werden, müssen die Vorhersagemodelle gut kalibriert werden. Dafür berechnet das EZMW parallel zu den eigentlichen Vorhersagen jeweils einen Satz von Nachhersagen, wobei mit dem gleichen Modell für das gleiche Startdatum Vorhersagen für die letzten 20 Jahre nachgerechnet werden. Die Nachhersagen und die entsprechenden Beobachtungen an Messstationen werden in HEAT-SHIELD verwendet, um mit «Quantile Mapping» (QM,

siehe Kapitel 8.2) die gitterzellbasierten Modellvorhersagen für die über 1000 Beobachtungsstandorte in Europa zu korrigieren. Die für die *wbgt* benötigten Vorhersagen von Temperatur, Feuchte, Strahlung und Windgeschwindigkeit werden nun als Tageswerte einzeln korrigiert und daraus für alle Beobachtungsstandorte eine *wbgt*-Ensemble-Vorhersage berechnet. Daraus können für diese Orte die Wahrscheinlichkeiten des Auftretens von gesundheitsschädigenden *wbgt*-Werten im kommenden Monat abgeschätzt werden. **Abbildung 28** zeigt ein Beispiel einer Vorhersage, wie sie im Prototyp des Hitze-Früherkennungssystems von HEAT-SHIELD publiziert wird (<https://heatshield.zonalab.it>). Auf der Karte wird das Hitzesisiko in 7 -13 Tagen nach dem Ausgabedatum angezeigt anhand der Wahrscheinlichkeit, dass in jener Woche der *wbgt*-Schwellenwert von 27 °C überschritten wird.

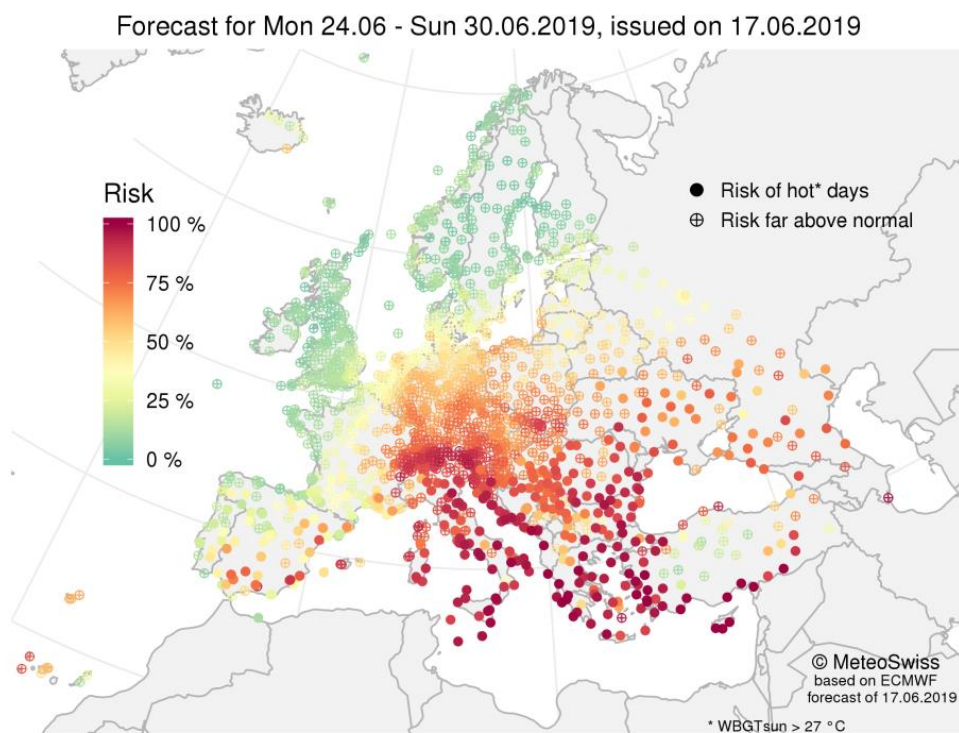


Abbildung 28: Beispiel einer HEAT-SHIELD Vorhersage vom 17.06.2019 (Wochenübersicht). Die Farben der ausgefüllten Punkte zeigen die maximalen Wahrscheinlichkeiten des Überschreitens der *wbgt* von 27 °C für die Tage vom 24.-30.06.2019, jene der anderen Punkte die Wahrscheinlichkeit von abnormal hohen *wbgt*-Werten.

Auf der Webseite des HEAT-SHIELD Prototyps können nun personalisierte Vorhersageinformationen abgerufen werden, indem man sich auf der Seite registriert und verschiedene Details wie Angaben zur körperlichen Aktivität (leicht bis sehr gross), der Arbeitsumgebung (drinnen oder draussen) oder der Kleidung macht. Als Ergebnis wird eine Hitzestressvorhersage als Monatskalender produziert, welche das persönliche Hitzestressrisiko für die kommenden Wochen anzeigt (**Abbildung 29**). Zusätzlich werden Massnahmen zur besseren Bewältigung der Hitze angegeben, beispielsweise vermehrtes Trinken, wobei die empfohlene Menge aus der erwarteten Hitzebelastung und den persönlichen Angaben bestimmt wird.

8 Das Projekt HEAT-SHIELD

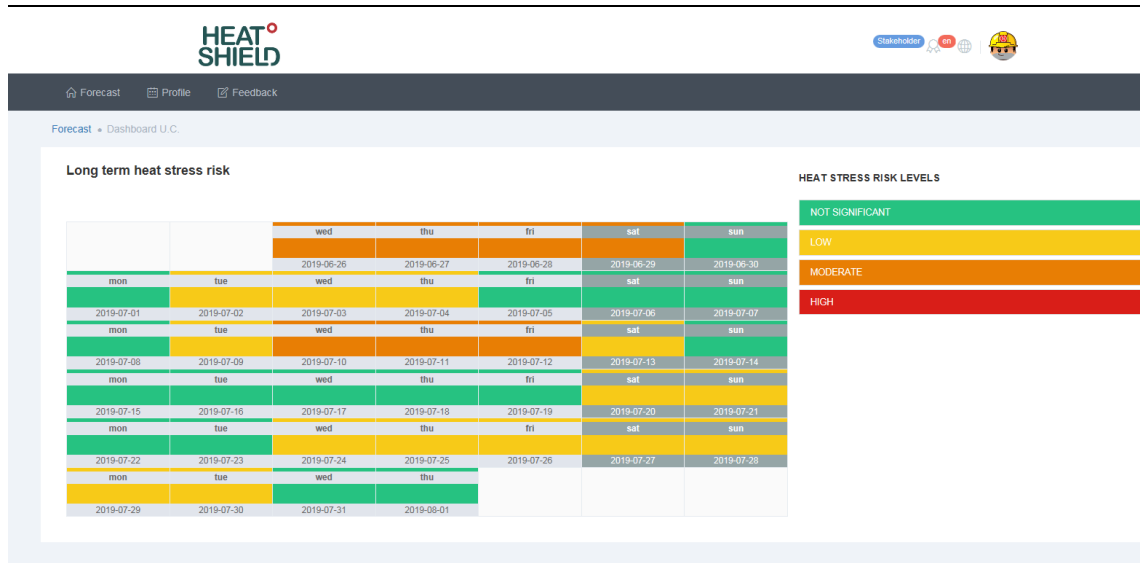


Abbildung 29: Personalisierte Vorhersage des Hitzestress im HEAT-SHIELD Hitze-Früherkennungssystem in Form eines gefärbten Monatskalenders. Das Risiko (grün für geringes, rot für hohes Risiko) wird aufgrund der Hitzevorhersage und persönlichen Angaben wie körperliche Aktivität, Arbeitsort oder Kleidung abgeschätzt.

8.4 Hitzeszenarien auf europäischer Skala

Zur Quantifizierung des Hitzestressrisikos im langjährigen Klimawandelkontext bis zum Ende des 21. Jahrhunderts kombiniert HEAT-SHIELD ein umfassendes Ensemble regionaler Klimaprojektionen aus dem EURO-CORDEX Projekt (www.euro-cordex.net; räumliche Auflösungen von 12 bzw. 50 km und Abdeckung des gesamten europäischen Kontinents) mit der oben beschriebenen Fehlerkorrekturmethode «Quantile Mapping». Die so erhaltenen Projektionen der *wbgt* ergeben je nach Emissionsszenario, also je nach Annahme des zukünftigen menschlichen Treibhausgasausstosses, einen europaweiten Anstieg der *wbgt* und damit des Hitzestressrisikos um 1,4 - 4,5 °C bis zum Ende des Jahrhunderts. Damit einhergehend wird die Anzahl der Sommertage mit hohem Hitzestress - hier als Tage mit einer maximalen *wbgt* von über 27 °C - deutlich ansteigen. Im heutigen Klima wird dieser Schwellenwert im Schatten in der Regel nur selten erreicht, lediglich in Südeuropa treten Häufigkeiten von mehr als 10 Tagen pro Jahr auf (**Abbildung 30**, obere Reihe). Für das starke RCP8.5 Emissionsszenario, das von einer weiterhin ungebremsten Emission von Treibhausgasen durch den Menschen ausgeht, werden in weiten Teilen Südeuropas gegen Ende Jahrhundert mehr als 40 Hitzestresstage pro Sommer im Schatten erreicht. Für Hitzestress in der Sonne (**Abbildung 30**, untere Reihe) ergeben sich jeweils noch grössere Häufigkeiten, da hier die Sonneneinstrahlung direkt mitberücksichtigt wird. In weiten Teilen Zentral- und Südeuropas, inklusive tiefgelegenen Regionen der Schweiz, können gegen Ende Jahrhundert unter dem RCP8.5 Szenario mehr als 50 Hitzestresstage pro Jahr in der Sonne auftreten, d.h. mehr als jeder zweite Sommertag würde mit extremer Hitzebelastung einhergehen (siehe auch Casanueva et al., 2020). Diese ersten Ergebnisse werden in HEAT-SHIELD derzeit weiter ausgewertet und mit demographischen Daten (z.B. Altersstruktur der arbeitenden Bevölkerung oder Besiedlungsdichte) kombiniert.

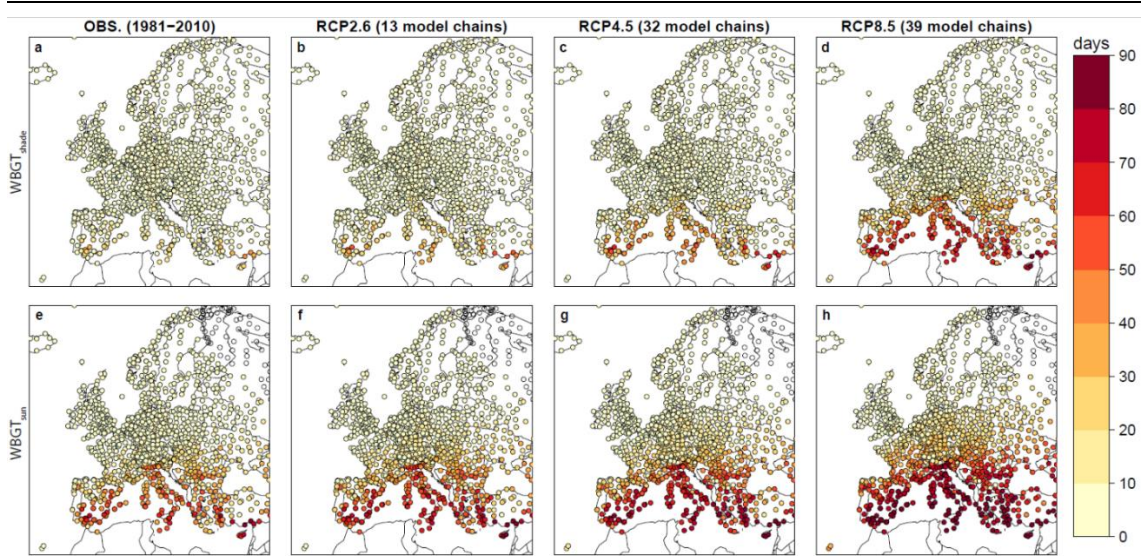


Abbildung 30: Beobachtete (1981-2010) und zukünftige (2070-2099) Anzahl der Sommertage pro Jahr mit einem *wbggt*-Wert über 27 °C. Obere Reihe (a-d): *wbggt* im Schatten (*wbggt.shade*). Untere Reihe (e-h): *wbggt* in der Sonne (*wbggt.sun*). Die drei rechten Spalten basieren auf dem EURO-CORDEX Modellensemble und berücksichtigen von links nach rechts ein tiefes (RCP2.6; b und f), ein mittleres (RCP4.5; c und g) sowie ein hohes (RCP8.5; d und h) Emissionsszenario.

9 Hitzebelastung in Städten

Die Temperatur in Städten ist im Allgemeinen und besonders in der Nacht höher als auf dem Land. Dieser Effekt wird als städtische Wärmeinsel (engl. «Urban Heat Island», UHI) bezeichnet und ist eine Folge des durch die Bebauung veränderten Wärme- und Wasserhaushaltes der Stadt. Zu den allgemeinen Einflussfaktoren auf die Temperaturunterschiede gehören die geographische Breite und Lage im Relief wie auch die Entfernung zu grösseren Gewässern (Vogt und Parlow, 2011). Lokal wird die Stärke der städtischen Wärmeinsel von der Albedo, dem Versiegelungsgrad, den Gebäudehöhen, dem Vegetationsanteil sowie der Wärmekapazität der Bausubstanzen beeinflusst (Vogt und Parlow, 2011). Der Effekt der städtischen Wärmeinsel zeigt sich vor allem abends und in der Nacht, da die Wärme in den Städten länger gespeichert wird und sie sich dadurch langsamer abkühlen. Während der Mittagszeit sind die Temperaturunterschiede im Vergleich mit dem Umland meist nicht sehr gross. Allgemein sind die Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Land bei windschwachen, strahlungsreichen Wetterlagen am grössten (z.B. Kuttler, 2009).

MeteoSchweiz betreibt selbst keine Messstationen in den Städten. Mit städtischen Messstationen von Partnernetzen können jedoch Angaben über die Ausbildung der städtischen Wärmeinsel gemacht werden. Eine klimatologische Analyse der städtischen Wärmeinsel wurde mit 16 städtischen Partnerstationen in den fünf grössten Schweizer Städten, Basel, Bern, Genève, Lausanne und Zürich erstellt (Gehrig et al., 2018). Als Masszahl für die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel wurde die Temperaturdifferenz der städtischen minus der ländlichen Station berechnet. Als ländliche Vergleichsstationen wurden SwissMetNet-Stationen von MeteoSchweiz verwendet. Inzwischen konnten mit verschiedenen Messnetzbetreibern Verträge über Partnerschaften abgeschlossen werden, so dass MeteoSchweiz auf Daten einiger städtischen Messdaten zugreifen kann.

Die städtische Wärmeinsel ist in allen untersuchten Städten während des ganzen Jahres vorhanden. Maxima werden im Sommer erreicht, vor allem in den Nächten (siehe beispielhaft **Abbildung 31**).

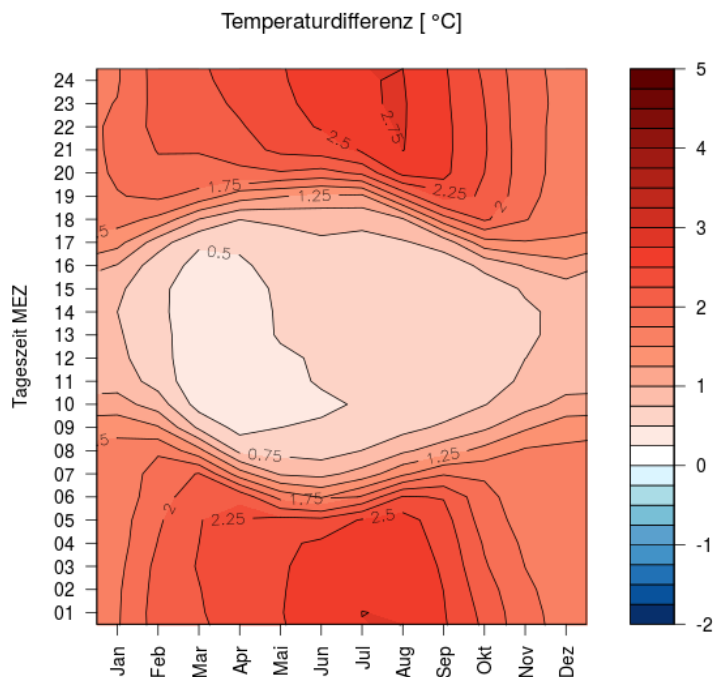


Abbildung 31: Temperaturdifferenzen (städtisch minus ländlich) basierend auf Stundenwerten für die Stationen Zürich Kaserne (NABEL) und Zürich Affoltern, dargestellt als Thermoisoplethen (Linien gleicher Temperaturdifferenz) für die Tageszeit im Jahresverlauf (Daten: 1991-2016; Quelle: Gehrig et al., 2018).

Die Nachttemperaturen sind in den meisten Stadtzentren im Mittel im Sommer um über 2 °C höher als auf dem Land. In weniger dicht bebauten Gebieten sind sie zwischen 1 und 2 °C höher (**Abbildung 32**). Für das 99%-Perzentil liegt die Nachttemperatur in den Städten bis zu 5 - 6 °C höher, im Maximum (nicht in Abbildung enthalten) werden an den untersuchten Stationen sogar 6 - 7 °C höhere Nachttemperaturen verzeichnet. In den wärmsten Nächten sinkt die Temperatur in den Stadtzentren nicht unter 24 - 25 °C ab. Die Tagesmaxima der Lufttemperatur sind in den meisten Städten im Mittel bis 1 °C höher als auf dem Land (**Abbildung 33**).

9 Hitzebelastung in Städten

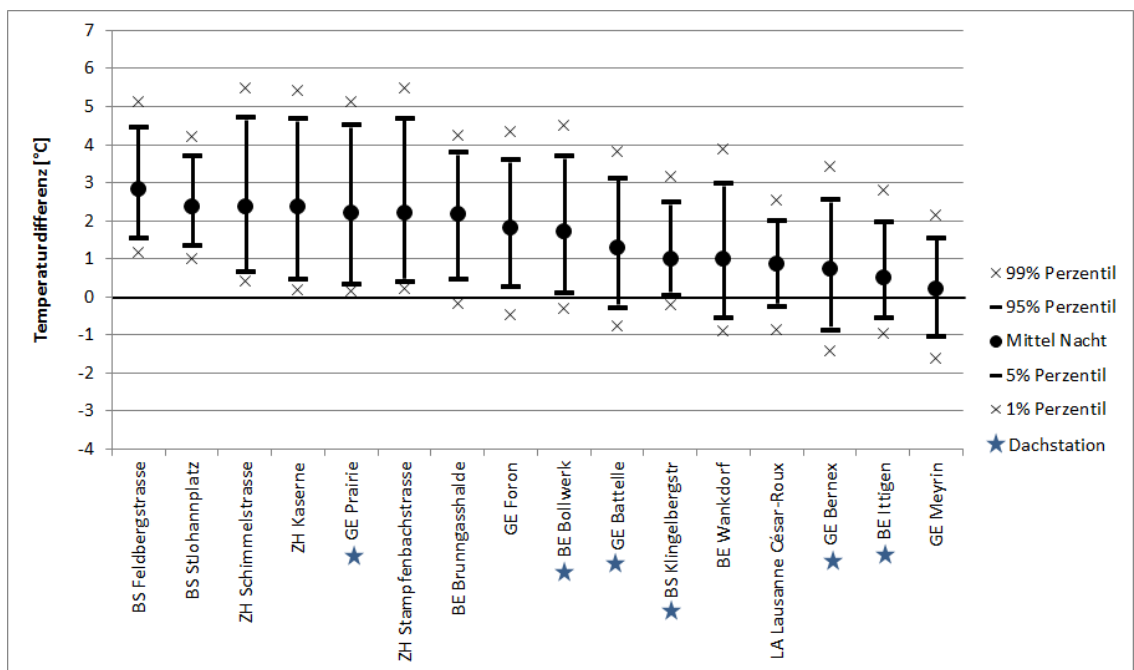


Abbildung 32: Verteilung aller stündlichen Temperaturdifferenzen während der Nacht (19:00-06:00 mitteleuropäische Zeit; MEZ) für die Sommermonate Juni, Juli und August an allen Stationspaaren städtisch minus ländlich. Dargestellt sind Mittelwert und die 1%, 5%, 95% und 99%-Perzentilwerte. Die Länge der untersuchten Datenreihe pro Station ist unterschiedlich (Quelle: Gehrig et al., 2018).

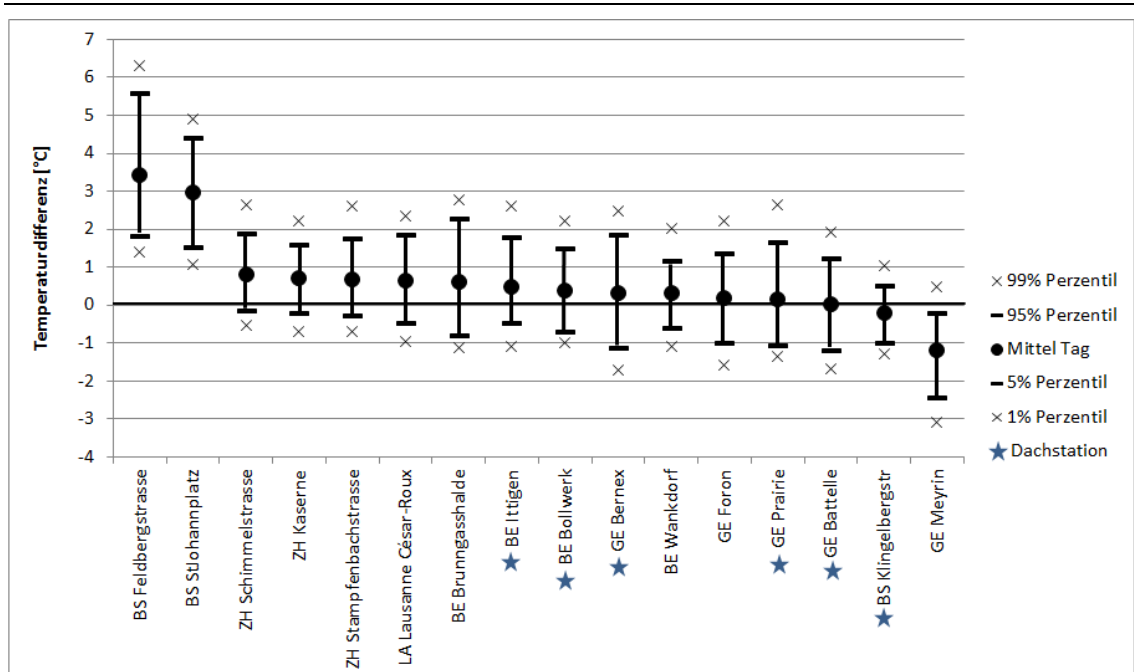


Abbildung 33: Verteilung aller stündlichen Temperaturdifferenzen während des Tags (7:00-18:00 mitteleuropäische Zeit; MEZ) für die Sommermonate Juni, Juli und August an allen Stationspaaren städtisch minus ländlich. Dargestellt sind Mittelwert und der 1%, 5%, 95% und 99%-Perzentilwerte. Die Länge der untersuchten Datenreihe pro Station ist unterschiedlich (Quelle: Gehrig et al., 2018).

Die Anzahl der Tropennächte ist in den Städten deutlich höher als auf dem Land, während die Anzahl der Hitzetage nur wenig erhöht ist (**Abbildung 34**). Eine Ausnahme davon sind Messstationen in Basel, bei denen auch die Anzahl der Hitzetage deutlich grösser ist. Sie repräsentieren Standorte in unmittelbarer Nähe von Asphalt und Gebäuden, welche sich am Tag stark erwärmen und deshalb höhere Temperaturmaxima aufweisen als die ländliche Vergleichsstation. Die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel ist während Hochdrucklagen am grössten, d.h. bei windschwachen, bewölkungsarmen und strahlungsintensiven Wetterlagen.

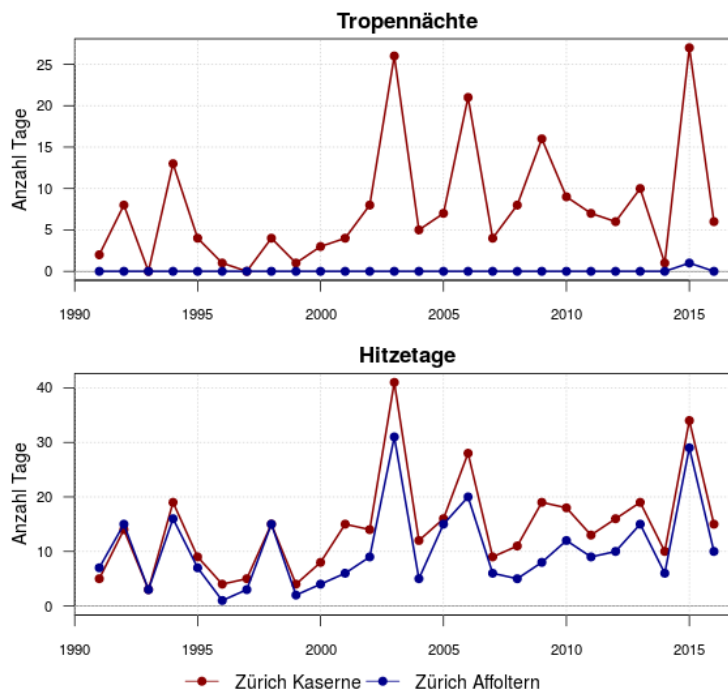


Abbildung 34: Anzahl der Tropennächte (oben) und der Hitzetage (unten) in Zürich Kaserne (NABEL) und Zürich Affoltern (Quelle: Gehrig et al., 2018).

Für die Zürcher Stationen wurde ein diagnostisches Modell aus der Literatur für den täglichen maximalen Wärmeineleffekt angepasst (Theeuwes et al., 2017). Damit kann die Stärke der städtischen Wärmeinsel anhand von meteorologischen Daten der ländlich gelegenen Station und dem Vegetationsanteil und dem „Sky view factor“ in der Stadt geschätzt werden. Solche Modelle könnten auch für die Angabe der Grössenordnung der städtischen Wärmeinsel in saisonalen Prognosen oder Klimaszenarien Verwendung finden. In einer Masterarbeit in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich und der Universität Augsburg wurden verschiedene Methoden, unter anderem das diagnostische Modell von Theeuwes et al. (2017), dahingehend verglichen, robuste Klimaszenarien für städtische Standorte zu generieren (Burgstall A., 2019; Burgstall et al., 2021). Eine besondere Herausforderung der städtischen Stationen sind die relativ kurzen oder diskontinuierlichen Zeitreihen. Mithilfe der städtischen Szenarien im Vergleich zu den bereits existierenden CH2018 Szenarien (basierend auf Umlandstati-

9 Hitzebelastung in Städten

onen) lassen sich schliesslich Aussagen über den UHI treffen. Dieser kann so mit verschiedenen Hitzeindikatoren wie die Anzahl der Tropennächte oder Hitzetage in Städten verglichen zum Umland bis zum Ende des Jahrhunderts abgeschätzt werden.

Mit dem Klimawandel und der zu erwartenden steigenden Bevölkerungszahl in Städten und Agglomerationen wird das Thema der Hitzebelastung in Städten immer relevanter. Es ist deshalb in Zukunft sehr wichtig, dass auch Messdaten über die Ausprägung und Veränderung der städtischen Wärmeinsel erhoben werden und das Stadtklima modelliert und vorhergesagt werden kann.

10 Vergleich von Hitzeindizes

10.1 Einleitung

Angesichts der Bedeutung von Hitzestress als wichtiges Wetter- und Klimarisiko ist der Aufbau und Betrieb von Hitzewarnsystemen, sowie die klimatologische Einordnung eine wichtige Aufgabe nationaler Wetterdienste, so auch der MeteoSchweiz. Ein effektives Warnsystem sollte dabei Warnzeitpunkte robust modellieren können und diese als offizielle Hitzewarnungen an die Bevölkerung kommunizieren. Im Sinne eines nutzerspezifischen HitzeeinFORMATIONSSYSTEMS sollte es ausserdem flexibel sein hinsichtlich sich in Zeit und Raum ändernder demographischer und regionaler Anfälligkeiten für Hitzestress und zudem die spezifischen Bedürfnisse unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen abbilden.

Das im Zeitraum 2004-2020 von der MeteoSchweiz betriebene Hitzewarnsystem für die Hitzewarnungen basiert auf dem *Heat Index (HI)*, einem durch die beiden meteorologischen Einflussfaktoren Lufttemperatur und Luftfeuchte definierten Hitzeindex. Überschreitet der vorhergesagte *HI* an drei aufeinanderfolgenden Tagen einen Wert von 90 (Einheit: [°F]) so wird eine Hitzewarnung der Stufe 3 herausgegeben. Wird der höhere Schwellenwert von 93 an mindestens fünf aufeinanderfolgenden Tagen überschritten, so erfolgt eine Warnung auf Stufe 4 (siehe auch Kapitel 3.2; MeteoSchweiz, 2016). Die Erfahrung der letzten Jahre hat gezeigt, dass der *HI* prinzipiell ein geeigneter Hitzestressindex ist und robuste Warnungen ermöglicht. Jedoch sind mit diesem Index auch einige Nachteile verbunden. So ist er für Werte unter 80 nicht mehr definiert, was eine klimatologische Auswertung erschwert und das Erstellen kontinuierlicher Zeitreihen verhindert. Zudem existieren für den *HI* keine internationalen Standards, die eine Interpretation des vorhergesagten Wertes für unterschiedliche Bevölkerungsgruppen oder Beschäftigungsprofile ermöglichen würden. Auch berücksichtigt der *HI* nur die beiden Einflussgrössen Lufttemperatur und Luftfeuchte. Weitere Grössen, wie z.B. die Windgeschwindigkeit, die Nachttemperatur oder Strahlungsflüsse, sind prinzipiell ebenfalls relevant für den Hitzestress des menschlichen Körpers.

In diesem Kapitel fassen wir die Ergebnisse einer Studie (Burgstall et al., 2019) zusammen, die den *HI*-basierten Hitzeindex der MeteoSchweiz alternativen Hitzeindikatoren gegenüberstellt. Der Vergleich der verschiedenen Indikatoren für einen beobachteten Zeitraum in der Vergangenheit liefert erste Hinweise darauf, wie eine Hitzewarnung basierend auf einem alternativen Hitzestressindex aussehen könnte, und in welcher Art und Weise es Unterschiede zu den derzeit verwendeten Hitzewarnungen liefern würde.

10.2 Ausgewählte Hitzestressindizes und Datengrundlage

Wir vergleichen acht alternative Hitzestressindizes sowie die Tagesmaximaltemperatur als weiteren Hitzeindikator miteinander und gegen den derzeit von der MeteoSchweiz verwendeten *HI*. Im Einzelnen handelt es sich bei den alternativen Indizes um die

- *wet bulb temperature (wbt)*, Stull, 2011),
- die *wet bulb globe temperature* im Schatten (*wbgt.shade*; Bernard und Pourmoghani, 1999),
- die *wet bulb globe temperature* in der Sonne (*wbgt.sun*; Liljegren et al., 2008),

- die *simplified wet bulb globe temperature* (*swbgt*; Buzan et al., 2015),
- die *apparent temperature* (*apparentTemp*; Buzan et al., 2015; Steadman, 1984),
- die *effective temperature* (*effectiveTemp*; Coccolo et al., 2016),
- den *humidity index* (*humidex*; Buzan et al., 2015),
- den *discomfort index* (*discomInd*; Coccolo et al., 2016) sowie die
- Tagesmaximumtemperatur (*Tmax*).

Alle analysierten Hitzestressindizes sind im internen MeteoSchweiz Climate Browser implementiert und als Zeitreihenplots verfügbar. **Tabelle 4** führt die jedem dieser Indizes zugrundeliegenden meteorologischen Eingangsgrößen auf: Lufttemperatur, kurzwellige solare Einstrahlung, bodennahe Windgeschwindigkeit und relative Luftfeuchtigkeit. Eine weitere alternative Einflussgrösse, die den Feuchtegehalt der Luft beschreibt, ist der Taupunkt, welcher sich jeweils aus relativer Luftfeuchte und Lufttemperatur berechnen lässt. Von den insgesamt zehn betrachteten Hitzeindizes (*HI* plus acht alternative Hitzestressindizes plus Tagesmaximumtemperatur) verwendet nur einer das volle Set an Eingangsgrößen (*wbgt.sun*). Alle Indizes ausser dem *HI* sind für jeden Wert definiert, was eine Erstellung kompletter Klimatologien ermöglicht. Demgegenüber wird der *HI* bei Unterschreiten eines Wertes von 80 per Definition auf 0 gesetzt.

Tabelle 4: Verwendete Hitzeindizes mit ihren jeweiligen meteorologischen Eingangsgrößen.

Hitzeindex	Temperatur	Solare Einstrahlung	Wind	Luftfeuchte	Taupunkt
<i>HI</i>	x			x	x
<i>wbt</i>	x			x	
<i>wbgt.shade</i>	x				x
<i>wbgt.sun</i>	x	x	x		x
<i>swbgt</i>	x			x	
<i>apparentTemp</i>	x		x	x	
<i>effectiveTemp</i>	x		x	x	
<i>humidex</i>	x			x	
<i>discomInd</i>	x			x	
<i>Tmax</i>	x				

Datengrundlage für den Vergleich des derzeitigen verwendeten und der virtuellen alternativen Warnsysteme sind tägliche und stündliche Stationsbeobachtungen im Zeitraum 1981-2017 an insgesamt 28 automatischen Wetter- und Klimastationen der MeteoSchweiz (SwissMetNet Stationen). Im Fokus der Untersuchung steht der maximale Hitzestress während eines gegebenen Tages.

10.3 Stationsspezifische Schwellenwertberechnung

Zum Vergleich des derzeitigen *HI*-basierten Hitzewarnsystems mit virtuellen alternativen Systemen wird die Übereinstimmung von *HI*-Warntagen ($HI > 90$) mit Warntagen basierend auf den alternativen

Hitzeindizes (Index > Schwellenwert) untersucht. Hierzu müssen zunächst die entsprechenden index-spezifischen Schwellenwerte bestimmt werden. Dies geschieht nach einem Häufigkeits-basierenden Ansatz und getrennt für jede der untersuchten Stationen: Als Schwellenwert für einen gegebenen alternativen Index und eine gegebene Station wird derjenige Wert gewählt, der im Zeitraum 1981-2017 genauso oft überschritten wird wie ein *HI*-Wert von 90. Die Gesamtanzahl an Warntagen (Schwellenwertüberschreitungen) basierend auf dem *HI* bzw. basierend auf dem alternativen Index ist mit diesem Ansatz für eine gegebene Station also identisch.

Abbildung 35 zeigt die so ermittelten stationsspezifischen Schwellenwerte sowie ihre räumliche Verteilung. Je nach Index haben die Schwellenwerte unterschiedliche Grössenordnungen, was eine direkte Folge der unterschiedlichen Kombination mehrerer meteorologischer Einflussgrössen (siehe **Tabelle 4**) ist. So liegt der räumlich gemittelte Schwellenwert bei der *wbt* zum Beispiel bei 22,4 °C, während er beim *humidex* 36,9 °C erreicht. Zudem zeigen die Schwellenwerte für einzelne Indizes auch eine leichte räumliche Variabilität. Der Schwellenwert für die *apparentTemp* liegt im Grossraum Zürich zum Beispiel etwas höher als in anderen Landesteilen.

Generell entsprechen die ermittelten Schwellenwerte angenähert den in der Literatur verwendeten Werten. Der räumlich gemittelte Schwellenwert der *wbt* (22,4 °C) entspricht zum Beispiel gut dem in den Schweizer CH2018 Klimaszenarien (CH2018, 2018) verwendeten *wbt*-Schwellenwert für Hitzebelastung (22 °C). Letzterer wurde als hohes Perzentil der Verteilung von Tageswerten der *wbt* im heutigen Schweizer Klima gewählt. Auch der räumlich gemittelte Schwellenwert der *apparentTemp* (32,6 °C) entspricht angenähert dem von Ragetti et al. (2017) verwendeten Wert (32 °C). Für den einfachen *Tmax*-Indikator liegt der Schwellenwert im Bereich von circa 31 - 34 °C.

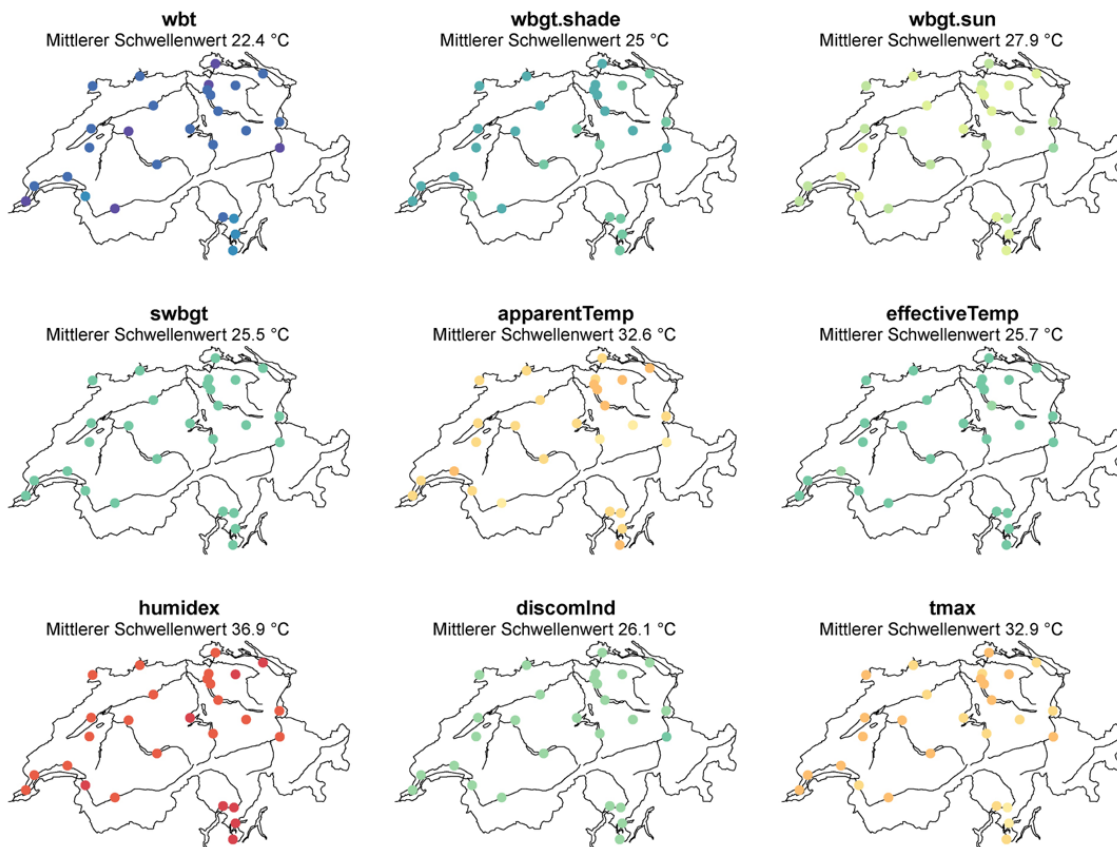


Abbildung 35: Stationspezifische Schwellenwerte (farbkodiert) und räumlich gemittelte stationsspezifische Schwellenwerte (jeweils oberhalb der Karte), welche dem *HI*-Wert von 90 entsprechen, für die ausgewählten Hitzeindizes *wbt*, *wbgт.shade*, *wbgт.sun*, *swbgt*, *apparentTemp*, *effectiveTemp*, *humidex*, *discomInd* und *Tmax*. Alle Werte sind in der Einheit [°C] angegeben und für die Periode 1981-2017 berechnet.

10.4 Trefferquoten einzelner Hitzevarntage

Nach Festlegung der index- und stationsspezifischen Schwellenwerte wird nun in einem zweiten Schritt die jeweilige Trefferquote berechnet. Für einen gegebenen alternativen Hitzeindex und eine gegebene Station ist diese definiert als Anteil der Warntage für den alternativen Index (Index > Schwellenwert) an den offiziellen Warntagen ($HI > 90$) im gesamten Zeitraum 1981-2017. Eine Trefferquote von 100% bedeutet demnach, dass mit dem alternativen Warnsystem an genau denselben Tagen gewarnt werden würde wie mit dem derzeitigen *HI*-basierten Warnsystem. Eine Trefferquote von 0% würde demgegenüber bedeuten, dass mit dem alternativen Warnsystem kein einziger der offiziellen Warntage erfasst würde. Die Trefferquote beurteilt somit das zeitlich gleichzeitige Auftreten von Warntagen im offiziellen und in den alternativen Warnsystemen, wobei in allen Fällen die Gesamtanzahl an Warntagen identisch ist (siehe Definition der Schwellenwerte in Kapitel 10.3).

Abbildung 36 zeigt die räumliche Verteilung der Trefferquoten im Zeitraum 1981 - 2017. Zwischen den einzelnen alternativen Indizes bestehen grosse Unterschiede der Trefferquoten mit räumlichen

Mittelwerten zwischen 53,8 (*wbt*) und 95,5% (*swbgt*). Der einfache *Tmax*-Indikator zeigt eine mittlere Trefferquote von 73,4%. Für einen gegebenen alternativen Hitzeindex zeigt die Quote zudem eine gewisse räumliche Variabilität, und liegt in vielen Fällen (jedoch nicht in allen) im Tessin etwas höher als in den übrigen Landesteilen.

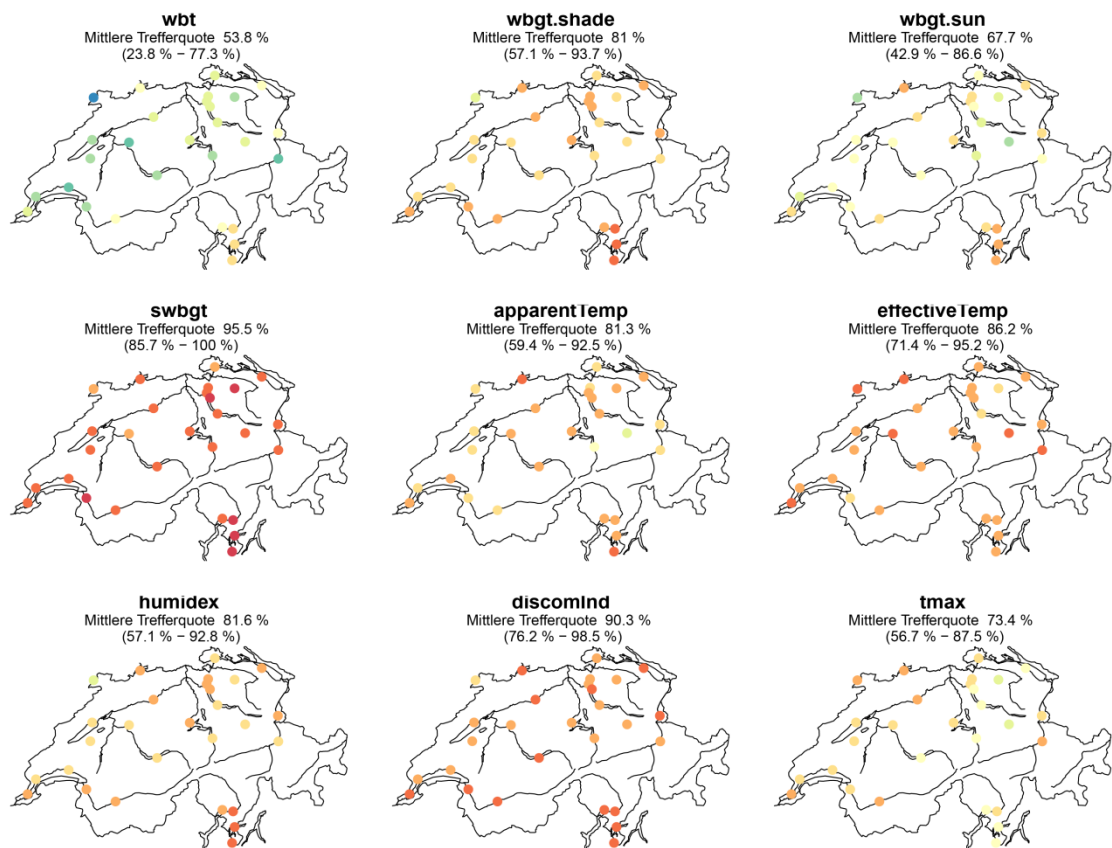


Abbildung 36: Trefferquoten von Warntagen basierend auf stationsspezifischen Schwellenwerten ausgewählter Hitzeindizes verglichen mit offiziellen Warntagen basierend auf dem *HI*. Blaue Farben stehen für geringe Trefferquoten, rote Farben für hohe.

Zum besseren Verständnis dieser Unterschiede wurde eine sogenannte «*response surface analysis*» (RSA) durchgeführt (hier allerdings nicht gezeigt). Die RSA untersucht die Abhängigkeit der Ergebnisse einer komplexen Beziehung (hier die resultierenden Hitzeindizes) von ihren jeweiligen Einflussgrößen (hier die meteorologischen Einflussgrößen aus **Tabelle 4**). Der Einfachheit halber beschränken wir uns auf die alternativen Hitzeindizes mit der kleinsten (*wbt*) und der grössten (*swbgt*) Trefferquote. Beide Indizes basieren genau wie der *HI* auf den beiden Eingangsgrößen Lufttemperatur und Feuchte, kombinieren diese aber auf unterschiedliche Art und Weise zum resultierenden Index-Wert. Die RSA ergibt für beide alternativen Indizes ähnliche Abhängigkeiten gegenüber der Lufttemperatur, die *wbt* zeigt gegenüber der *swbgt* jedoch eine wesentlich stärkere Abhängigkeit von der Luftfeuchte. Diese unterschiedliche Abhängigkeit ist der Grund für die stark unterschiedlichen

Trefferquoten der beiden alternativen Indizes, das heisst für ihre unterschiedliche zeitliche Korrespondenz mit dem *HI*. Die *swbgt* mit ihrer hohen Trefferquote ist in ihrer Abhängigkeit von den Einflussgrössen und damit auch in ihrem zeitlichen Verlauf dem *HI* sehr ähnlich, während die *wbt* grössere Unterschiede zeigt. Generell gilt jedoch, dass geringe Trefferquoten eines alternativen Indizes keine wertenden Schlüsse auf die Eignung dieses Indizes als Grundlage für ein Hitzewarnsystem zulassen. Die zugrundeliegenden Unterschiede der Sensitivität gegenüber den Einflussgrössen verglichen mit dem *HI* könnten je nach Zielgruppe des Warnsystems auch ein Vorteil sein.

10.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass von den untersuchten virtuellen Warnsystemen basierend auf alternativen Hitzeindizes ein *swbgt*-basiertes System dem derzeitigen *HI*-basierten System am ähnlichsten ist und zu gleichen Zeiten „anschlägt“. Ein Vorteil der *swbgt* gegenüber dem *HI* ist ihre kontinuierliche Verteilung ohne Untergrenze, was die Berechnung kontinuierlicher Klimatologien sowie einfache klimatologische Einordnungen erlaubt. Jedoch darf nicht vergessen werden, dass eine hohe Trefferquote nicht gleichbedeutend sein muss mit einem geeigneten Index für das Hitzewarnsystem, da die Referenz für die Trefferquote in dieser Studie immer der *HI* ist. Weitere alternative Indizes mit einer grösseren Abhängigkeit von der Luftfeuchte (z.B. die *wbt*) könnten trotz ihrer geringen Trefferquote (geringe Übereinstimmung mit dem *HI*) wertvolle Zusatzinformationen liefern. Generell können die Feuchteverhältnisse entscheidend für das Hitzeempfinden des menschlichen Körpers sein. Sobald die Lufttemperatur höher als die Hautoberflächentemperatur ist kann der Körper eine Kühlwirkung nur noch durch Verdunstung von Schweiß erzielen, und diese Möglichkeit hängt wiederum stark von der umgebenden Luftfeuchtigkeit ab. Ist sie zu hoch, so kann kein Luftfeuchtgradient zwischen Haut und Umgebung aufgebaut werden und die kühlende Verdunstung wird stark eingeschränkt. In solchen Fällen kann es zu schwerwiegenden Auswirkungen auf die Gesundheit wie Hitzekrämpfe oder Hitzeschläge kommen (Davis et al., 2016). Ein Hitzeindex, der neben der Lufttemperatur auch ein grosses Gewicht auf die Luftfeuchte legt, könnte in solch kritischen Situationen sehr aussagekräftig sein. In der Schweiz werden solch hohe, gesundheitsrelevante Feuchtwerte jedoch kaum erreicht.

Diese Überlegungen zeigen, dass das Hitzeempfinden des menschlichen Körpers oftmals stark individuell ausgeprägt ist und eine Vielzahl von meteorologischen und auch weiteren Faktoren wie Kleidung, Grad der Akklimatisation oder Art der Beschäftigung eine wichtige Rolle spielen. Ein effektives Hitzewarnsystem sollte dieser Diversität Rechnung tragen und nutzer- sowie impaktororientierte Warnungen oder Informationssysteme ermöglichen. Die Kombination mehrerer Hitzestressindizes, im Sinne eines zielgruppenspezifischen Portfolios verschiedener Indizes, sollte für den Aufbau eines solchen Systems zumindest in Betracht gezogen werden.

Abkürzungen

ASTRA	Bundesamt für Strassen
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BAG	Bundesamt für Gesundheit
CAT	Engl. Climate Analysis Tool (Programmpaket, das die Klimaanalyse erleichtert und für den internen Gebrauch der MeteoSchweiz bestimmt ist)
CH2011	Nationale Schweizer Klimaszenarien 2011
CH2018	Nationale Schweizer Klimaszenarien 2018
Climate Browser	Interne MeteoSchweiz Plattform für die Visualisierung von automatisierten klimatologischen Analysen
Data4web	Data4Web verwendet die aktuellsten automatischen Wetterinformationen (über alle möglichen Parameter wie Temperatur, Niederschlag, Wind, ...), die bei MeteoSchweiz verfügbar sind, um daraus für die nächsten 10 Tage benutzerverständliche und nahtlose Vorhersagen für definierte Orte zu produzieren. Die «nahtlose Vorhersage» besteht dabei aus Daten (je nach Leadtime) der numerischen Wetterprognosemodelle INCA, COSMO-1E, COSMO-2E und IFS-ENS (EZMW).
DWD	Deutscher Wetterdienst
DWH	Engl. Data Warehouse (interne MeteoSchweiz Datenbank)
EZMW	Engl. ECMWF. Das Europäische Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage ist ein von 34 Staaten (u.a. die Schweiz) gemeinsam betriebenes Vorhersagezentrum, welches globale Wettermodelle für Mittel- und Langfristvorhersagen entwickelt, betreibt und seinen Mitgliedsländern die Vorhersagedaten rund um die Uhr verfügbar macht.
HI	Engl. <i>Heat Index</i> (kombinierter Index aus Lufttemperatur und Taupunkt oder Luftfeuchte)
MeteoSchweiz	Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz
MetG	Bundesgesetz über die Meteorologie und Klimatologie
Model Browser	Interne MeteoSchweiz Plattform für die Visualisierung der numerischen Wetterprognose

NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
SED	Schweizerischer Erdbebendienst
SLF	WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung
SwissMetNet	Das automatische Messnetz von MeteoSchweiz
Tmax	Tagesmaximumtemperatur
Tmean	Tagesmitteltemperatur
Tmin	Tagesminimumtemperatur
UHI	Engl. Urban Heat Island (städtische Wärmeinsel)
VULPUS	Gesichertes Meldevermittlungssystem zwischen dem Bund und den Kantonen
wbgt	Engl. <i>wet bulb globe temperature</i> (Feuchtkugeltemperatur); ein Index für Hitzestress am Arbeitsplatz; wird als <i>wbgt.shade</i> (im Schatten) aus Lufttemperatur und Taupunkt oder als <i>wbgt.sun</i> (an der Sonne) aus Lufttemperatur, Taupunkt, Wind und solarer Einstrahlung berechnet
WHO	Engl. World Health Organization (Weltgesundheitsorganisation)
WMO	Engl. World Meteorological Organization (Weltorganisation für Meteorologie)
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

Literaturverzeichnis

Armstrong B., Sera F., Vicedo-Cabrera A. M., Abrutzky R., Åström D. O., Bell M. L., Chen B.-Y., de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho M., Correa P. M., Dang T. N., Diaz M. H., Dung D. V., Forsberg B., Goodman P., Guo Y.-L. L., Guo Y., Hashizume M., Honda Y., Indermitte E., Iñiguez C., Kan H., Kim H., Kyselý J., Lavigne E., Michelozzi P., Orru H., Ortega N. V., Pascal M., Ragetti M. S., Saldiva P. H. N., Schwartz J., Scortichini M., Seposo X., Tobias A., Tong S., Urban A., la Cruz Valencia C. D., Zanobetti A., Zeka A., Gasparrini A. (2019): The Role of Humidity in Associations of High Temperature with Mortality: A Multiauthor, Multicity Study. In: Environmental Health Perspectives 127, 1-8.

BAFU (Hrsg.), Bundesamt für Umwelt, 2016: Hitze und Trockenheit im Sommer 2015. Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1629, 108 pp.

BAFU (Hrsg.), Bundesamt für Umwelt, 2019: Hitze und Trockenheit im Sommer 2018. Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1909, 96 pp.

BMGF, Bundesministerium für Gesundheit und Frauen, 2017: Gesamtstaatlicher Hitzeschutzplan, 8 pp.

Begert M., Stöckli R., Croci-Maspoli M., 2018: Klimaentwicklung in der Schweiz – Vorindustrielle Referenzperiode und Veränderung seit 1864 auf Basis der Temperaturmessung. Fachbericht MeteoSchweiz, 274, 23 pp.

Bernard, T.E. und Pourmoghani M., 1999: Prediction of Workplace Wet Bulb Global Temperature. Appl. Occup. Environ. Hyg., 14, 126-134.

Burgstall A., 2019: Representing the Urban Heat Island Effect in Future Climates. Scientific Report MeteoSchweiz, 105, 92 pp.

Burgstall A., Casanueva A., Kotlarski S., Schwierz C., 2019: Heat warnings in Switzerland: Reassessing the choice of the current heat stress index. Int. J. Environ. Res. Public Health, 16, 1-19.

Burgstall A., Kotlarski S., Casanueva A., Hertig E., Fischer E., Knutti R., 2021: Urban multi-model climate projections of intense heat in Switzerland. Clim. Serv. [accepted].

Buzan J., Oleson K., Huber M., 2015: Implementation and comparison of a suite of heat stress metrics within the Community Land Model version 4.5. Geosci. Model Dev., 8, 151-170.

Casanueva A., Burgstall A., Kotlarski S., Messeri A., Morabito M., Flouris A., Nybo L., Spirig C., Schwierz C., 2019: Overview of Existing Heat-Health Warning Systems in Europe. *Inter. J. of Environ. Res. Public Health*, 16, 1-22.

Casanueva A., Kotlarski S., Fischer A., Flouris A., Kjellstrom T., Lemke B., Nybo L., Schwierz C., Liniger M., 2020: Escalating environmental summer heat exposure – a future threat for the European workforce. *Reg. Environ. Change*, 20, 1-14.

CH2011, 2011: Swiss Climate Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp.

CH2018, 2018: CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp.

Coccolo S., Kämpf J., Scartezzini J.-L., Pearlmutter D., 2016: Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. *Urban Climate*, 18, 33-57.

Davis R.E., McGregor G. R., Enfield K. B., 2016: Humidity: A review and primer on atmospheric moisture and human health. *Environ. Res.*, 144, 106-116.

DWD, 2019: Hitzewarnung. Available at: <https://www.dwd.de/DE/leis-tungen/hitzewarnung/hitzewarnung.html> [Accessed 29.04.2019].

De Freitas C. R. und Grigorieva E. A., 2015: A comprehensive catalogue and classification of human thermalclimate indices. *Int. J. Biometeorol.*, 59, 109–120.

Gehrig R., König N., Scherrer S., 2018: Städtische Wärmeinsel in der Schweiz - Klimatologische Studie mit Messdaten in fünf Städten. *Fachbericht MeteoSchweiz*, 273, 61 pp.

Kuttler W., 2009: *Klimatologie*. UTB 3099, Ferdinand Schöningh, Paderborn, München, Wien, Zürich, 260 pp.

Landessanitätsdirektion Wien, 2018: Leitfaden Hitzemassnahmenplan – Für medizinische und pflegerische Einrichtungen zur Erstellung eigener Hitzemassnahmenpläne. Available at: <https://www.wien.gv.at/gesundheit/sandirektion/pdf/leitfadenhitzemassnahmenplan.pdf> [Accessed 22.4.2020].

Liljegren J. C., Carhart R., Lawday P., Tschopp S., Sharp R., 2008: Modeling wet bulb globe temperature using standard meteorological measurements, *J. Occup. Environ. Hyg.*, 5, 645-655.

Matzarakis A., Laschewski G., Muthers S., 2020: The Heat Health Warning System in Germany – Application and Warnings for 2005 to 2019. *Atmosphere*, 11, 1-13.

Météo France, 2019: *Vigilance météorologique*. Available at: <https://vigilance.meteofrance.com/> [Accessed 25.07.2019].

MeteoSchweiz, 2016: Der Hitzesommer 2015 in der Schweiz. *Fachbericht MeteoSchweiz*, 260, 68 pp.

MeteoSchweiz, 2018: Hitze und Trockenheit im Sommerhalbjahr 2018 – eine klimatologische Übersicht. *Fachbericht MeteoSchweiz*, 272, 38 pp.

Ministero della salute, 2019: Ondate di calore. Available at: <http://www.salute.gov.it/portale/caldo/homeCaldo.jsp> [Accessed 25.04.2020].

Ministère des Solidarités et de la Santé, 2019: Le plan national canicule. Available at: <https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/risques-climatiques/article/le-plan-national-canicule#Plan-national-canicule-La-vigilance-meteo> [Accessed 25.04.2020].

Plan nationale canicule, 2017: Plan national canicule 2017. Available at: <http://www.ardeche.gouv.fr/plan-national-canicule-2017-a2899.html> [Accessed 25.04.2020].

Pollhammer C., 2019: Steirischer Hitzeschutzplan und Evaluation des Hitzewarnsystems. Available at: https://www.gesundheit.steiermark.at/cms/dokumente/11685019_72561200/aa438f42/Evaluierung_Hitzewarnsystem_Steiermark.pdf [Accessed 25.04.2020].

Préfet de l'eure, 2018: Le plan national canicule. Available at: <http://www.eure.gouv.fr/Politiques-publiques/Securite-civile/Risques-naturels-et-technologiques-Nuisances/Risques-naturels/Risques-naturels-majeurs/Le-plan-national-canicule-PNC/Le-plan-national-canicule> [Accessed 25.04.2020].

Ragettli M., Vicedo-Cabrera A. M., Flückiger B., Rösli M., 2016: Evaluation kantonaler Hitze-massnahmenpläne und hitzebedingte Mortalität im Sommer 2015. Bericht zuhanden des Bundesamts für Gesundheit (BAG), 41 pp.

Ragettli M., Vicedo-Cabrera A. M., Schindler C., Rösli M., 2017: Exploring the association between heat and mortality in Switzerland between 1995 and 2013. Environ. Res., 158, 703-709.

Ragettli M., Rösli M., 2019: Hitzeaktionspläne zur Prävention von hitzebedingten Todesfällen – Erfahrungen aus der Schweiz. Bundesgesundheitsbl., 62, 605-611.

Rothfusz L.P., 1990: National Weather Service (NWS). Technical Attachment, SR 90-23.

Scherrer S., Fischer E., Posselt R., Liniger M., Croci-Maspoli M., Knutti R., 2016: Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. J. Geophys. Res. Atmos., 121, 1-12.

Steadman R. G., 1979a: The Assessment of Sultriness. Part I: A Temperature-Humidity Index Based on Human Physiology and Clothing Science. J. Appl. Meteorol., 18, 861–873.

Steadman R. G., 1979b: The Assessment of Sultriness. Part II: Effects of Wind, Extra Radiation and Barometric Pressure on Apparent Temperature. J. Appl. Meteorol., 18, 874–885.

Steadman R.G., 1984: A Universal Scale of Apparent Temperature. J. Appl. Meteorol. Climatol., 23, 1674-1687.

Stull R., 2011: Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature. J. Appl. Meteorol. Climatol., 50, 2267-2269.

Theeuwes N. E., Steeneveld G. J., Ronda R. J., Heusinkveld B. G., van Hove L. W. A., Holtslag A. A. M., 2017: A diagnostic equation for the daily maximum urban heat island effect for cities in northwestern Europe. Int. J. Climatol., 37, 443–454.

Vogt R. und Parlow E., 2011: Die städtische Wärmeinsel von Basel – tages- und jahreszeitliche Charakterisierung. Basler Zeitschrift für Geographie - Regio Basiliensis, 52, 7-15.

WMO, World Meteorological Organization und WHO, World Health Organization, 2015: Heat-waves and health: guidance on warning-system development, 1142, 114 pp.

WMO, 2016: Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events. Available at: <https://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/opace/opace2/documents/Draftversion-oftheGuidelinesontheDefinitionandMonitoringofExtremeWeatherandClimateEvents.pdf> [Accessed 05.06.2019].

ZAMG, 2020: Wetterwarnungen – Legende. Available at: <http://warnungen.zamg.at/info/de/heute/alle/at/#hitze> [Accessed 29.04.2020].

Danksagung

Wir danken folgenden Personen von MeteoSchweiz für die Begutachtung des Berichts: Cornelia Schwierz, Reto Stöckli und Mischa Croci-Maspoli. Danke auch an die folgenden Personen für die zahlreichen Diskussionen und Inputs im Rahmen des Projektes «Hitze»: Christof Appenzeller, Jean-Marie Bettems, Isabelle Bey, Alessandro Ceconi, Mischa Croci-Maspoli, Joël Fisler, Lionel Fontanaz, Urs Graf, Stefanie Gubler, Christian Jung, Sven Kotlarski, Daniel Murer, Thomas Schlegel, Christoph Schmutz, Cornelia Schwierz, Christoph Spirig und Reto Stöckli.

MeteoSchweiz
Operation Center 1
CH-8044 Zürich-Flughafen
T +41 58 460 99 99
www.meteoschweiz.ch

MeteoSvizzera
Via ai Monti 146
CH-6605 Locarno Monti
T +41 58 460 97 77
www.meteosvizzera.ch

MétéoSuisse
7bis, av. de la Paix
CH-1211 Genève 2
T +41 58 460 98 88
www.meteosuisse.ch

MétéoSuisse
Chemin de l'Aérogologie
CH-1530 Payame
T +41 58 460 94 44
www.meteosuisse.ch

