

# Klimawandelbedingte Zunahme von Hitzeereignissen und deren Folgen für die Gesundheit in der Schweiz und in Europa

---

Studie erstellt von L. Krummenauer und C. Walther im Auftrag von Greenpeace Schweiz

Die Studie berücksichtigt wissenschaftliche Beiträge zur Thematik bis Ende 2017  
Veröffentlichung im Mai 2018

**Linda Krummenauer** studierte Geographie an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn und an der University of New Mexico in Albuquerque (USA). Die Schnittstelle zwischen Mensch und Umwelt, insbesondere die Vulnerabilität von Bevölkerungen und deren Anpassung an den Klimawandel waren bereits im Studium ihre Schwerpunktthemen. Seit 2012 arbeitet Frau Krummenauer am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) und seit 2014 als Doktorandin im Fachbereich "Klimawirkung und Vulnerabilität". In ihrer Forschungsarbeit beschäftigt sie sich mit dem Verhältnis von Temperatur und Mortalität in Städten weltweit unter heutigen klimatischen Bedingungen und denen in der Zukunft unter dem Klimawandel. Linda Krummenauer ist Co-Autorin des Weltbank Berichts "Turn Down the Heat: Confronting the New Climate Normal" und hat in Forschungsprojekten zu verschiedenen Themen mitgearbeitet.

**Carsten Walther** studierte Physik an der Universität Potsdam mit interdisziplinärem Schwerpunkt und ist seit 2008 am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) beschäftigt. Im Fachbereich "Klimawirkung und Vulnerabilität" bearbeitete er verschiedene Projekte im Bereich der Auswirkungen des klimatischen Wandels auf Mensch und Gesellschaft. Insbesondere die Folgen und Anpassungsoptionen für urbane Regionen und kritische Infrastrukturen stehen im Fokus der Forschungsarbeiten. Im Rahmen dieser Arbeit ist er an Klimaanpassungskonzepten beispielsweise für die Städte Potsdam und Berlin sowie das Bundesland Hessen beteiligt. Carsten Walther ist Co-Autor einiger wissenschaftlicher Publikationen zum Thema Klimafolgen und Vulnerabilität. In der Vergangenheit hat er freiberuflich u. a. die Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GIZ) und Greenpeace zum Umgang mit Klimafolgen beraten.

# Inhalt

<b>1. Zusammenfassung .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Résumé.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Stand der Forschung zum Thema Klimawandel .....</b>	<b>8</b>
<b>3. Entwicklung von Hitzeereignissen in Mitteleuropa.....</b>	<b>11</b>
3.1    Definition von Hitzeereignis oder Hitzewelle in der Literatur .....	11
3.2    Klimatische Rahmenbedingungen in der Schweiz – Status Quo .....	12
3.3    Hitzeereignisse in der Vergangenheit in Mitteleuropa und der Schweiz .....	13
3.4    Zukünftige Entwicklung von Hitzeereignissen in Mitteleuropa und der Schweiz.....	16
<b>4. Auswirkungen erhöhter Umgebungstemperatur auf die menschliche Gesundheit .....</b>	<b>18</b>
4.1    Intrinsische Risikofaktoren und betroffene Bevölkerungsgruppen.....	20
4.2    Extrinsische Einflussfaktoren auf hitzebezogene Mortalität.....	21
4.3    Auswirkungen von Hitzeereignissen auf die Gesundheit in Europa bzw. der Schweiz .....	22
<b>5. Zukunftsszenarien für die hitzebedingten Auswirkungen auf die Gesundheit .....</b>	<b>27</b>
<b>Referenzen .....</b>	<b>32</b>

## 1. Zusammenfassung

Der Klimawandel und seine Folgen sind weltweit bereits heute zu spüren. Dies ist auch in der Schweiz der Fall. So hat hier die Jahresmitteltemperatur bis heute stärker als im globalen Mittel zugenommen. Diese Zunahme lässt sich auch bei der Häufigkeit von Hitzewellen feststellen. Solche längeren Phasen mit erhöhter Temperatur spielen aufgrund ihrer umfangreichen Auswirkung auf die Gesundheit der Bevölkerung eine große Rolle in der Klimafolgenanalyse. Die Entwicklung ihrer Häufigkeit und die Auswirkungen auf die Bevölkerung sollen in diesem Bericht näher beleuchtet werden.

Europaweit wurden in den letzten 15 Jahren eine Reihe von außergewöhnlich warmen Sommern registriert. In der Schweiz galt dies insbesondere für die Hitzesommer 2003 und 2015. Aufgrund der Topographie des Landes spielen solche Hitzeereignisse vornehmlich in einem Streifen nördlich der Alpen und im äußersten Süden des Landes eine Rolle. Diese Ereignisse wirkten sich messbar auf die Gesundheit der Bevölkerung in der Schweiz aus (z.B. Grize et al. 2005; Baccini et al. 2008). In der wissenschaftlichen Literatur wird viel diskutiert, welche Faktoren das Risiko für Morbidität und Mortalität durch eine Hitzewelle erhöhen.

Der menschliche Körper wird bei hohen Umgebungstemperaturen insofern belastet, als dass er einen Anstieg der inneren Körpertemperatur verhindern muss, was zu verschiedenen Folgeerscheinungen führen kann (siehe Tabelle 1). Für eine statistische Auswertung der Hitzebelastungen werden diese in den meisten Studien unter Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen (kardiovaskulär und respiratorisch) zusammengefasst. Es konnte gezeigt werden, dass sich Bevölkerungsdichte und Stadtstruktur auf Gesundheitsfolgen auswirken (z.B. Rosenzweig et al. 2005; Anderson und Bell (2009)). Weiterhin spielen sozioökonomische Faktoren wie Bildung und Einkommen (z.B. Son et al. 2012) sowie Luftverschmutzungen (z.B. Kim et al. 2011; Rocklöv et al. 2011) eine Rolle.

Der nach den Studien exponierteste Teil der Bevölkerung wird durch folgende Rahmenbedingungen definiert. So führen zu einer gesundheitlichen Vorbelastung (Klenk et al. 2010; Åström et al. 2011) aber auch das Wohnumfeld, wie beispielsweise isoliertes Wohnen (Kovats & Kristie 2006; Åström et al. 2011) zu einer verstärkten Sensitivität gegenüber Hitze. Nahezu alle Studien, die nach Altersklassen unterscheiden, sowohl in der Schweiz als auch im Rest der Welt stellten eine erhöhte Mortalität durch Hitze bei älteren Menschen fest (z.B. Åström et al. 2011).

Eine weitere Frage ist, inwieweit die Gesundheitsfolgen durch Hitze vom Geschlecht abhängig sind. Dies ist in der Literatur viel diskutiert. So zeigen einige Studien eine erhöhte Belastung von Frauen im Alter (D'Ippoliti et al. 2010; Fouillet et al. 2006). Dies lässt sich jedoch zu einem hohen Grade auf die unterschiedliche Lebensdauer von Frauen zurückführen. Es gibt in der Altersgruppe der über 65-jährigen bzw. noch stärker in der Gruppe der über 80-jährigen einen höheren Anteil Frauen als Männer in der Bevölkerung. Dies wiederum bedingt, dass ältere Frauen häufig alleine leben (Åström et al. 2011). Die Gruppe der älteren und alleinlebenden Menschen stellt sich als die Verletzlichste heraus (Åström et al. 2011). Trotz der höheren Lebenserwartung von Frauen gegenüber Männern in modernen Gesellschaften, kommt bei ihnen zusätzlich eine höhere Belastung durch Krankheiten hinzu (Alberts et al. 2014; Oksuzyan et al. 2014).

Ob es eine nachweisbare höhere physiologische Belastung durch Hitze auf Frauen als auf Männer gibt, ist nicht eindeutig geklärt. Eindeutig jedoch ist das höhere Risiko für alleinlebende ältere Menschen, im überwiegenden Maße also für Frauen. Frauen stellen im hohen Alter bereits heutzutage sowie in der Zukunft eine Risikogruppe dar, auf die das Augenmerk im Kontext von Schutz und Prävention gegenüber hitzebedingter Mortalität gelegt werden sollte.

Neben der Analyse vergangener Auswirkungen und der Aufstellung verstärkender und vermindender Faktoren verdeutlicht diese Arbeit, in welcher Weise sich der Klimawandel auf diese Hitze-Gesundheits-Relation auswirken wird. So wird sich abhängig von der weiteren Ausprägung des klimatischen Wandels – welcher wiederum von gesellschaftlichen Entscheidungen der nächsten Jahre bestimmt sein wird – die Häufigkeit, Dauer und Stärke von Hitzewellen intensivieren.

Es existieren unterschiedliche Annahmen und Vergleiche zu der Entwicklung der Hitzeereignisse zum Ende dieses Jahrhunderts. Im ungünstigsten Entwicklungspfad – näherungsweise als der business-as-usual Pfad bezeichnet – müssen wir von einer Verdopplung bis Verfünffachung der gesundheitsrelevanten Hitzeereignisse ausgehen (Beniston 2004; Zubler et al. 2014).

Welche Auswirkungen dies auf die Gesundheit haben wird, ist nicht ohne weiteres feststellbar. Neben der Unsicherheit in der Änderungsrate von Hitzeereignissen kommen noch Unsicherheiten in der Entwicklung der städtischen Strukturen, der Bevölkerung und ihrer Alterszusammensetzung sowie in der Fähigkeit der Menschen und der Gesellschaft sich anzupassen bzw. zu akklimatisieren, hinzu. Einige Studien wiesen auch darauf hin, dass es sowohl die Fähigkeit des Individuums gibt sich zu akklimatisieren als auch an neue klimatische Bedingungen angepasste Verhaltensweisen zu entwickeln (z.B. Knowlton et al. 2007; Ballester et al. 2011). Weiterhin gibt es die gesamtgesellschaftliche Fähigkeit der Anpassung, wie beispielsweise durch veränderte Stadtstrukturen, passive Abschattungen oder eine verbesserte Pflege der besonders stark betroffenen Bevölkerungsteile (IPCC 2014). Diese Faktoren werden hier unter dem Begriff Akklimatisierung zusammengefasst und es wird im Weiteren angenommen, dass die Hälfte der zukünftig zu erwartenden Hitzewirkung auf die Gesundheit durch diese Akklimatisierung abgefangen werden kann. Diese Annahme liegt im oberen Bereich der Werte aus der Literatur (Dessai 2003; Knowlton et al. 2007).

Nimmt man nun an, die Bevölkerungszusammensetzung bleibt konstant, würde die oben angegebene Zunahme von gesundheitsrelevanten Hitzeereignissen zu einer Zunahme der hitzebedingten Sterblichkeit von 50 bis 200% bis zum Ende des Jahrhunderts führen.

Diese zusätzliche Belastung für die Gesellschaft ist unter der Annahme des business-as-usual Pfades erstellt. Sollten deutlich intensivere Klimaschutzbemühungen eingeleitet und beispielsweise das 2° oder gar das 1,5°-Ziel erreicht werden, so wäre auch mit deutlich geringeren Klimafolgen auf die menschliche Gesundheit zu rechnen. Diese Bemühungen müssen jedoch schnell erfolgen, da einmal überschrittene Temperaturgrenzen schwer wieder zu unterschreiten sind. Die freigesetzten Treibhausgase verbleiben lange in der Atmosphäre und führen zu weiteren klimatischen Änderungen (Fischer 2017).

## 1. Résumé

Les changements climatiques et leurs conséquences se font déjà sentir sur toute la planète, et tout particulièrement en Suisse. La température moyenne y a ainsi augmenté plus que la moyenne planétaire. La fréquence des canicules témoigne de cette augmentation. Ces phases plus longues de températures plus élevées jouent un rôle important dans l'analyse des conséquences des changements climatiques du fait de leurs importants effets sur la santé publique. Ce rapport porte sur le développement de leur fréquence et les effets sur la population.

Ces 15 dernières années, l'Europe a enregistré une série d'été exceptionnellement chauds. En Suisse, cela a été particulièrement le cas durant les canicules estivales de 2003 et 2015. La topographie de notre pays fait que ces chaleurs extraordinaires impactent principalement le « Plateau suisse » et le Sud des Alpes. Ces événements ont eu des effets mesurables sur la santé de la population suisse (p. ex. Grize et al. 2005 ; Baccini et al. 2008). La littérature scientifique discute abondamment des facteurs qui augmentent le risque de morbidité et de mortalité d'une canicule.

Les températures élevées impactent particulièrement le corps humain, car il doit éviter une augmentation de sa température interne pour empêcher des conséquences qui pourraient lui être fatales (voir tableau 1). La plupart des études répertorient les stress thermiques dans les maladies cardiovasculaires et respiratoires pour permettre leur évaluation statistique. Il a pu être montré que la densité de la population et la structure urbaine ont des conséquences sur la santé (p. ex. Rosenzweig et al. 2005 ; Anderson et Bell (2009). Les facteurs socioéconomiques comme la formation et le revenu (p. ex. Son et al. 2012), ainsi que la pollution de l'air (p. ex. Kim et al. 2011 ; Rocklöv et al. 2011) jouent aussi un rôle.

Cette étude définit la partie la plus exposée de la population en fonction des conditions-cadres ci-dessous. Une santé déjà atteinte (Klenk et al. 2010 ; Åström et al. 2011) et les conditions de logement, comme le fait d'être seul dans son logement (Kovats & Kristie 2006 ; Åström et al. 2011), augmentent la sensibilité à la chaleur. Pratiquement toutes les études qui distinguent les classes d'âge, que ce soit en Suisse ou dans le reste du monde, ont constaté une mortalité accrue des personnes âgées lorsqu'il fait chaud (p. ex. Åström et al. 2011).

Il faut aussi se demander dans quelle mesure la chaleur a des conséquences sur la santé en fonction du genre. C'est un sujet largement discuté dans la littérature. Certaines études montrent ainsi des conséquences accrues pour les femmes âgées (D'Ippoliti et al. 2010 ; Fouillet et al. 2006). C'est toutefois en bonne partie dû à l'espérance de vie accrue des femmes. Il y a plus de femmes que d'hommes chez les personnes de plus de 65 ans et encore plus chez les personnes de plus de 80 ans. Cela signifie que les femmes vivent plus souvent seules que les hommes (Åström et al. 2011). Le groupe des personnes âgées vivant seules s'avère le plus vulnérable (Åström et al. 2011). Bien que dans les sociétés modernes, les femmes aient une espérance de vie plus longue que les hommes, elles souffrent plus fréquemment de maladies (Alberts et al. 2014 ; Oksuzyan et al. 2014).

Mais il n'est pas absolument certain que la chaleur possède un effet négatif plus important sur la physiologie féminine que masculine. Il est toutefois clair qu'elle constitue un risque accru pour les personnes âgées vivant seules – et donc dans une large mesure pour les femmes. Les femmes très âgées constituent déjà un groupe à risque en matière de protection et de prévention de la mortalité liée à la chaleur, il faudra continuer à leur accorder une attention particulière.

Cette étude montre de quelle façon les changements climatiques impacteront la relation chaleur santé grâce à l'analyse des effets passés et à l'inventaire des facteurs aggravants et amoindrissants. La fréquence, la durée et la force des canicules s'intensifieront en fonction de l'évolution des changements climatiques – qui dépendra des décisions que notre civilisation prendra ces prochaines années.

Il y a différentes hypothèses et comparaisons en ce qui concerne l'évolution des canicules d'ici la fin de ce siècle. Si c'est la version la moins favorable qui se réalise – également nommée « business as usual » par analogie – nous devons compter sur un doublement, voir un quintuplement des canicules impactant la santé publique (Beniston 2004 ; Zubler et al. 2014).

Les effets réels sur la santé publique ne sont toutefois pas prévisibles. A l'incertitude quant au taux de renouvellement des canicules et à leur évolution, s'ajoutent les incertitudes concernant le développement des structures urbaines, de la population et de la composition de ses classes d'âges, ainsi que la capacité des humains et de leur société à s'adapter et, en l'occurrence littéralement, à s'acclimater. Certaines études indiquent aussi qu'il en va autant de la faculté de l'individu à s'acclimater que de développer de nouveaux comportements adaptés aux nouvelles conditions climatiques (z.B. Knowlton et al. 2007 ; Ballester et al. 2011). Il y a aussi la capacité de la société à s'adapter dans son ensemble en modifiant p. ex. les structures urbaines, en installant des ombrages et en améliorant les soins aux personnes les plus touchées (GIEC 2014). Ces facteurs sont résumés par le terme acclimatation et on pense généralement que la moitié des effets de la chaleur sur la santé pourra à l'avenir être amortie par cette acclimatation. Cette hypothèse se trouve dans la partie supérieure des valeurs recensées dans la littérature (Dessai 2003 ; Knowlton et al. 2007).

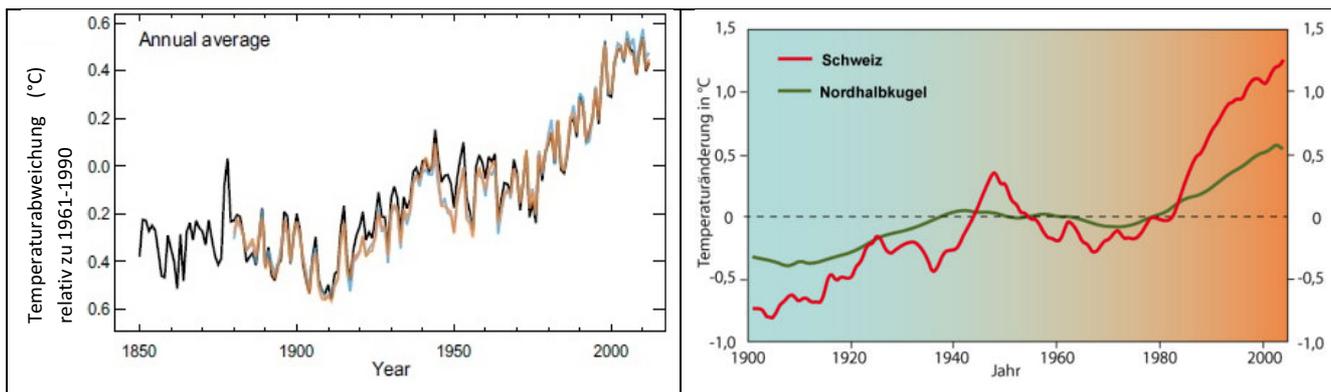
Si l'on admet que la composition de la population reste constante, l'augmentation ci-dessus des canicules impactant la santé publique augmenterait la morbidité caniculaire de 50% à 200% d'ici la fin de ce siècle.

Cette charge supplémentaire pour la population est établie en fonction de l'hypothèse de la version « business as usual ». Si des mesures de protection du climat nettement plus intensives devaient être prises et que l'objectif des 2°C, voire des 1.5°C, être atteint, les conséquences des changements climatiques sur la santé publique seraient bien moindres. Ces efforts doivent toutefois être faits rapidement, car une fois les seuils de températures franchis, il est difficile de revenir en arrière. Les gaz à effet de serre émis restent en effet pendant longtemps dans l'atmosphère et provoquent d'autres modifications du climat (Fischer 2017).

## 2. Stand der Forschung zum Thema Klimawandel

Die vom Menschen verursachte Änderung des Erdklimas ist mittlerweile unumstritten. Seit dem Beginn der Industrialisierung verbrennt der Mensch große Mengen von fossilen Energieträgern, betreibt großflächig landwirtschaftliche Aktivitäten und verändert die Oberflächen des Planeten. Diese Prozesse setzen in großem Maße Treibhausgase, wie Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) oder Methan frei. Dies geschieht in einem Umfang, der bereits seit den 60ziger Jahren messbar die Zusammensetzung der Atmosphäre beeinflusst (Keeling et al. 1976). So hat der Anteil von CO<sub>2</sub> in den letzten 150 Jahren von 270 Teilen je 1 Millionen Luftmoleküle (ppm) auf mittlerweile über 400 ppm zugenommen. Ein Wert, welcher in den letzten 800000 Jahren nicht erreicht wurde (IPCC 2013). Dies wiederum führt zu schwerwiegenden Veränderungen in der Energiebilanz der Atmosphäre des Planeten. Die Treibhausgase spielen eine wichtige Rolle im natürlichen Treibhauseffekt. Die kurzwellige von der Sonne eingestrahlte Energie wird an der Erdoberfläche in langwellige Wärmestrahlung umgewandelt und zurückreflektiert. Die Treibhausgase in der Atmosphäre halten einen Teil dieser Wärmestrahlung zurück und sorgen so für eine Erwärmung der Atmosphäre um etwa 30°C.

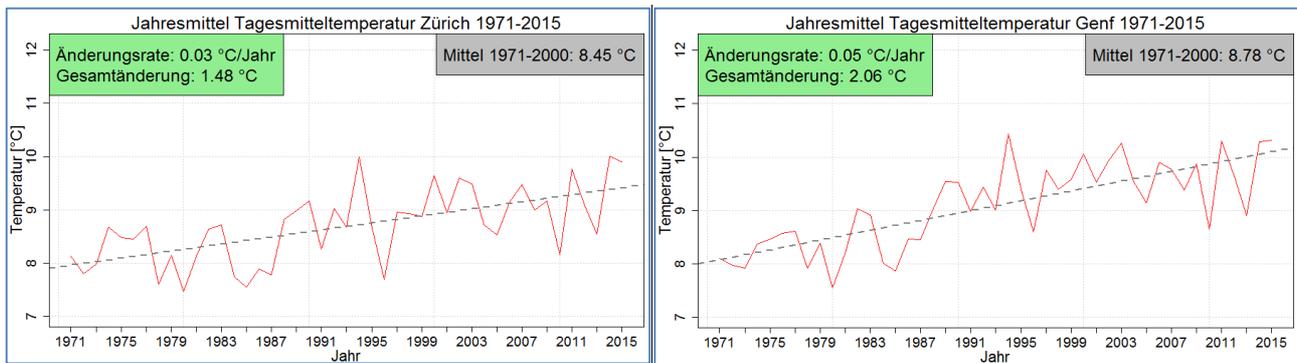
Führt der Mensch nun weitere Treibhausgase hinzu, verstärkt er diesen Rückhalteeffekt und die Atmosphäre erwärmt sich zusätzlich. Dies ist bereits in einer Erhöhung der global gemittelten Oberflächentemperatur zu spüren, welche im Jahre 2016 um etwa 1,1°C über den Temperaturen von 1880 lag (WMO 2017). In Abbildung 1 (links) ist die Entwicklung dieser Größe für die Jahre 1850 bis 2012 dargestellt (als Abweichung vom Mittel 1961 bis 1990) (IPCC 2013). Bis auf eine kurze Phase der Temperaturabnahme in den 50ziger und 60ziger Jahren (Solar dimming; u.a. in Ruckstuhl and Norris 2009) zeigt sich ein deutlich zunehmender Trend weltweit. In Abbildung 1 (rechts) wird deutlich, dass diese Zunahme in der Schweiz stärker ist als der globale Trend. So haben die Temperaturen in der Schweiz laut MeteoSchweiz (2014) seit Messbeginn 1864 um circa 1,8°C zugenommen, dies entspricht einer Zunahme von 0,12°C pro Jahrzehnt (Akademien der Wissenschaften Schweiz 2016). Als Beispiel zeigt sich die Zunahme auch in der Region Zürich und Genf. Hier kann eine signifikante Temperaturzunahme von 0,03°C bzw. 0,05°C pro Jahr im Zeitraum 1971 bis 2015 gemessen werden (Abbildung 2, European Climate Assessment Data, Haylock et al. 2008).



**Abbildung 1:** Links – Änderung in der global gemittelten Oberflächentemperatur von 1850 bis 2012 (IPCC 2013). Rechts – Vergleich Temperaturentwicklung in der Schweiz (rot) und auf der gesamten Nordhalbkugel (grün) ([www.bildungsserver.de](http://www.bildungsserver.de)).

Neben diesem Temperaturanstieg sind auch andere klimatische Auswirkungen spürbar bzw. messbar. So verändern sich Niederschlagsmuster und Häufigkeit und Ausprägung von Extremwetterereignissen, wie Trockenperioden, Hitzewellen, Starkniederschlägen oder Stürmen. In seinem fünften Sachstandsbericht macht

der IPCC<sup>1</sup> deutlich, dass zumindest für die Landflächen in den mittleren Breiten der Nordhalbkugel mit hoher Sicherheit eine Zunahme der Niederschläge seit der Mitte des 20. Jh. zu verzeichnen war. Für die anderen Breiten sind die Trendangaben nur von geringer statistischer Sicherheit. Für das 21. Jh. wird jedoch auf globaler Ebene eine Zunahme des Niederschlages projiziert. Auch wenn diese Änderungen nicht überall gleich sein werden, es also sowohl Orte mit Zu- als auch Abnahme geben wird. Die hohen Breiten werden wahrscheinlich zunehmende und die mittleren Breiten eher abnehmende Niederschlagsmengen verzeichnen. Die größten Änderungen über Eurasien und Nordamerika werden für den Winter angenommen (IPCC 2013).



**Abbildung 2: Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in der Region Zürich (links) und Genf (rechts) (1971-2015) (Datenquelle: ECAD - Haylock et al. 2008; eigene Berechnung und Darstellung; Trends signifikant auf 5%-Niveau<sup>2</sup>).**

Bezugnehmend auf Extremereignisse, bestätigt der IPCC ebenfalls seit den 50zigern eine beobachtete Änderung. So hat die Zahl der kalten Tage und Nächte abgenommen und die Zahl der warmen Tage und Nächte zugenommen. Auch die Häufigkeit von Hitzewellen hat in Europa, Asien und Australien zugenommen. Durch den menschlichen Einfluss hat sich mancherorts die Wahrscheinlichkeit einer Hitzewelle verdoppelt (IPCC 2013). Diese Veränderung hin zu häufigeren und längeren Hitzewellen wird auch in Zukunft anhalten.

Neben weitreichenden Folgeerscheinungen des Klimawandels (z.B. Meeresspiegelanstieg, Gletscherschmelze, Auswirkungen auf Landwirtschaftliche Erträge), wird sich der Klimawandel auf vielfältige Weise auf die Gesundheit des Menschen auswirken – dies kann sowohl über Hitzebelastung (mehr in Patz et al. 2005); mehr in Kapitel 4) oder aber auch durch die Ausbreitung von Krankheitsüberträgern, wie der Tigermücke (IPCC 2014), geschehen. Wie der Sommer 2003 zeigt, beziehen sich diese Klimafolgen nicht nur auf Regionen außerhalb Europas, sondern stellen im Gegenteil für die Industrienationen Europas eine ernstzunehmende Bedrohung dar. Der Bericht Brennpunkt Klima Schweiz (Akademien der Wissenschaften Schweiz 2016) nennt weitere Klimafolgen für die Schweiz. So ist seit längerem ein verstärkter Rückgang der Gletscher und Permafrostböden in der Schweiz zu verzeichnen. Dies wiederum hat Auswirkungen auf den Winter- und Skitourismus, auf die Wasserverfügbarkeit der Wasserkraftwerke und auf eine Zunahme von Steinschlägen und Murgängen durch verringerte Hangstabilität. Die geographische Verbreitung von Pflanzen und Tierarten verändert sich und hat damit Auswirkungen auf eine ganze Reihe von Ökosystemdienstleistungen. Von großer Bedeutung bei der Dokumentierung dieser Klimafolgen ist die richtige Ursache-Wirkungs-Zuordnung (Attribution), welche auch für eine Hitzefolgenanalyse eine Herausforderung darstellt.

Aussagen über die zukünftigen Veränderungen des Klimas können mit Hilfe der Klimamodellierung und Szenarien über die Freisetzung von Treibhausgasen in der Zukunft abgeschätzt werden. Letztere hängen von den politischen Entscheidungen in den nächsten Jahren und den daraus folgenden Klimaschutzbemühungen

<sup>1</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change; Weltklimarat; informiert über den aktuellen Stand der Klimaforschung in Form von Sachstandsberichten; 2007 mit dem Friedensnobelpreis ausgezeichnet.

<sup>2</sup> Die Wahrscheinlichkeit, dass der festgestellte Trend nur zufällig ist, liegt bei unter 5%.

ab. Der IPCC verwendete in seinem dritten und vierten Sachstandsbericht sogenannte SRES-Szenarien, welche Emissionspfade für unterschiedliche wirtschaftliche, technische und politische Entwicklung der Menschheit widerspiegeln.

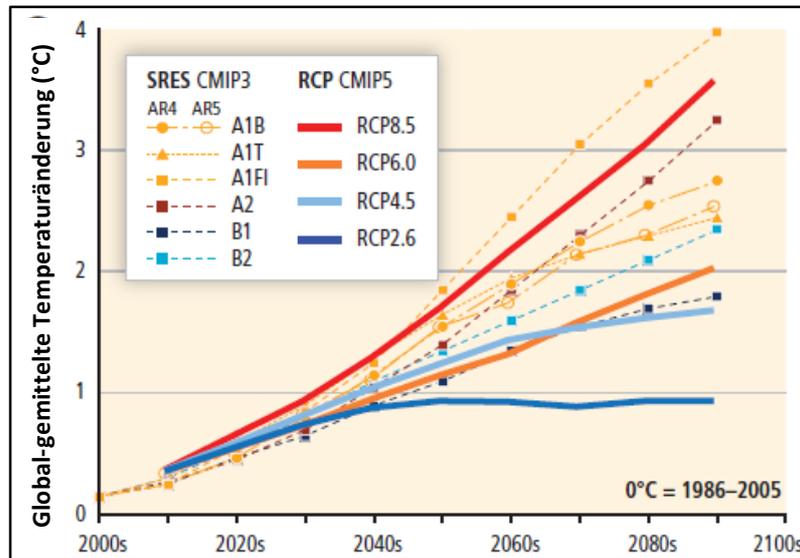


Abbildung 3: Global-gemittelte Oberflächentemperatur basierend auf Modelrechnungen mit SRES-Szenarien und RCPs (dekadische Mittel der Temperaturänderungen im Ensemblemittel – dies kann zu leichten Abweichungen zu jährlichen Darstellungen z.B. in IPCC (2013) führen. Die Abweichung des Temperaturmittels von 1986 bis 2005 zur vorindustriellen Zeit beträgt etwa 0,5°C. Quelle: NSW Government 2016

Abbildung 3 zeigt die Temperaturzunahme bis zum Ende des Jahrhunderts im globalen Mittel für verschiedene SRES-Szenarien. A1B steht beispielsweise für eine Zukunft mit Bevölkerungszunahme auf 9 Mrd. Menschen bis zur Mitte des Jahrhunderts, einem starken Wirtschaftswachstum und einer gemischten Nutzung von fossilen und erneuerbaren Energieträgern. Unter diesen Annahmen geben die Klimamodelle im Mittel eine Zunahme von 2,5°C (gegenüber dem Mittel 1986 bis 2005) bis 2100 aus. Um den Temperaturanstieg unter 2°C zu halten, müsste das Szenario B1 eintreten, welches ebenfalls von einem starken Wirtschaftswachstum ausgeht, jedoch verstärkt eine Service- und Informationsökonomie mit einem stärkeren Einsatz von sauberen und effizienten Technologien annimmt (IPCC 2007).

Im fünften Sachstandsbericht wurden die SRES-Szenarien durch vier RCPs (Representative Concentration Pathways) abgelöst (Vuuren et al. 2011; Burkett et al. 2014; IPCC 2013). Diese nehmen die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre in den Fokus anstelle der Emissionen. Das ungünstigste Szenario RCP8.5 liegt noch über dem A1B-Szenario und verursacht einen Temperaturanstieg der globalen Mitteltemperatur bis zum Ende des Jahrhunderts von über 3,5°C gegenüber dem Mittel von 1986 bis 2005 (zum vorindustriellen Level über 4°C). Momentan muss man es noch als das business-as-usual-Szenario bezeichnen (Peters et al. 2013). Des Weiteren gibt es die Szenarien RCP6.0 und RCP4.5, welche leicht ober- bzw. unterhalb des B1-Szenarios liegen – also eine Temperaturzunahme von etwa 2°C verursachen (gegenüber 1986 bis 2005). Das günstigste Szenario RCP2.6 setzt starke Anstrengungen zur Emissionsvermeidung voraus, liegt mit einer Temperaturzunahme von etwa 1°C unterhalb aller SRES-Szenarien (rund 1,5°C zur vorindustriellen Zeit).

Nach dem Paris-Accord<sup>3</sup> rückte neben dem seit längerem diskutierten 2°-Ziel<sup>4</sup> das Ziel in den Fokus, die globale Erwärmung auf unter 1,5°C zu begrenzen (UNFCCC 2015). Dies wurde insbesondere von den Inselstaa-

<sup>3</sup> Bei der Klimakonferenz 2015 getroffene Vereinbarung zur Minimierung der Treibhausgase.

ten angestrebt, da nur unter diesen Rahmenbedingungen langfristig das Leben auf diesen nur knapp über der Meeresoberfläche liegenden Inseln möglich bleiben wird (IPCC 2014). Bezieht man die Abweichung des Nullpunktes in Abbildung 3 gegenüber der Vorindustriellen Zeit (etwa 0,5°C) ein, ist die Einhaltung des 1,5°C-Ziels lediglich mit dem RCP2.6-Szenario möglich. Die im Rahmen der Paris-Konferenz vorgestellten Klimaschutzpläne der Länder der Welt (INDCs; intended nationally determined contributions) würden nach Rogelj et al. (2016) immer noch eine Temperaturerhöhung von 2,6 bis 3,1°C verursachen.

Die später vorgestellten Studien werden sich bei der Beschreibung der Klimafolgen auf Hitzeereignisse bzw. auf die Gesundheit ebenfalls auf die SRES oder RCP-Szenarien als Grundlage für die jeweils verwendeten Klimadaten beziehen.

Von großer Bedeutung für die Analyse der Klimafolgen sind verschiedene Unsicherheiten, welche in die Abschätzung der Entwicklung des zukünftigen Klimas eingehen. Dabei ist einmal die natürliche, systembedingte Variabilität als auch die Modellunsicherheit zu nennen. Die Modellunsicherheit bezieht sich auf den Fakt, dass die Modelle sich in ihren Eigenschaften, das Klima abzubilden, unterscheiden. Dieser Unsicherheit wird meist mit der Verwendung eines ganzen Ensembles von Modellen begegnet. Zeigt eine Mehrheit der Modelle vergleichbare Änderungen im Klima, gelten diese Ergebnisse als zuverlässiger. Das Unwissen über zukünftige Emissionspfade stellt ebenfalls eine Unsicherheit dar und wird wie oben beschrieben über die unterschiedliche Treibhausgaskonzentrationspfade (RCPs) abgebildet. Weiterhin muss hier erwähnt werden, dass die Klimamodellierung immer nur Aussagen über den gemittelten Zustand der Atmosphäre geben kann. Unter diesem klimatischen Mittel versteht man einen Zeitraum von vielen, meist 30 Jahren (Akademien der Wissenschaften Schweiz 2016).

### 3. Entwicklung von Hitzeereignissen in Mitteleuropa

#### 3.1 Definition von Hitzeereignis oder Hitzewelle in der Literatur

Zu Beginn soll kurz erläutert werden, was unter einem Hitzeereignis oder einer Hitzewelle zu verstehen ist. Nur durch Verwendung einer vergleichbaren Definition wird es möglich, zeitliche Entwicklungen zu beobachten oder mögliche Grenzwerte zu definieren. Üblicherweise wird ein Hitzeereignis oder Hitzewelle als eine Phase von ungewöhnlich hohem Temperaturstress bezeichnet, welche vorübergehende Veränderungen im Lebenswandel nach sich zieht und möglicherweise Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölkerung hat (Robinson 2001).

Viele Indikatoren stellen eine Kombination aus Umgebungstemperatur und Luftfeuchte dar. In Blazejczyk et al. (2011) sind diese in drei Klassen unterteilt – *rationale Indizes*, welche auf einer Wärmebilanzberechnung beruhen, *empirische Indizes* und *direkte Indizes*, wobei zu letzteren die gefühlte Temperatur (*apparent temperature*) von Steadman (1984) zählt. Diese gibt die Temperatur unter einer Referenzfeuchte an, die der empfundenen Temperatur bei gegebener Umgebungstemperatur, Luftfeuchte und Sonneneinstrahlung entspricht. Wie auch Blazejczyk et al. (2011) anmerken sind die meisten der Indizes aus den ersten beiden Klassen sehr komplex und hängen meist von einer Vielzahl von Größen ab, welche unter Umständen schwer messbar sind. Die Klasse der direkten Indizes ist meist weniger komplex und schneller zu bestimmen und ermöglicht daher großflächigere Abschätzung der Hitzeexposition und ihrer zeitlichen Entwicklung. Weiterhin basieren sie lediglich auf einer meteorologische Größe, wie z.B. die Tageshöchsttemperatur, welche,

---

<sup>4</sup> Erstmals auf der Klimakonferenz in Kopenhagen 2009 (UNFCCC 2009) diskutiertes Ziel zur Reduzierung des globalen Temperaturanstiegs auf unter 2°C gegenüber dem vorindustriellem Level.

wenn sie die 25°C Grenze überschreitet, den Kennwert *Sommertag* oder bei über 30°C den *Heißen Tag* bildet. Bei der Analyse der Hitzeverteilung in der Region Karlsruhe haben Walther und Olonscheck (2016) beispielsweise eine Folge von drei *Heißen Tagen* als *Hitzewellentage* definiert.

Überschreitet die Tiefsttemperatur des Tages die Grenze von 20°C, wird dies als *Tropische Nacht* benannt. Frich et al. (2002) bestimmt die Dauer einer Hitzewelle mit dem *Heat Wave Duration Index* (HWDI), also die Länge der Phase von mindestens 5 aufeinanderfolgenden Tagen, mit 5°C über dem täglichen klimatischen Mittel von 1961–90.

Da, abhängig vom lokalen Klima, die Gewöhnung der Menschen aber auch die Normen für Infrastrukturen an bestimmte Temperaturen adaptiert sind, ist es bei bestimmten Analysen sinnvoll, ortsbezogene Grenzwerte zu verwenden. Neben den absoluten Grenzwerten gibt es daher die relativen auf Perzentilen<sup>5</sup> basierenden Grenzwerte. Beispiele für perzentil-basierte Hitzewellen-Indizes werden in Perkins und Alexander (2013) oder Fischer und Schär (2010) diskutiert. Bei ersteren müssen die Grenzwerte an mindestens drei Tagen, bei letzteren an mindestens sechs Tagen überschritten werden. Eine andere Form der Angabe im Bezug zum lokalen Klima ist die Abweichung vom klimatischen Mittel (z.B. Monatsmitteltemperaturen) in Relation zur üblichen Schwankung dieser Größe (z.B. Standardabweichung) (Coumou et al. 2013). Innerhalb einer gewissen Schwankungsbreite um das übliche Klima, wird sich die Gesellschaft angepasst haben.

In Russo et al. (2014) wird die Berechnung eines Hitzewellen-Stärke-Index vorgestellt (siehe auch 3.4). Dieser basiert auf der Überschreitung des langjährigen Tagesklimas an mehr als drei Tagen in Folge. In anderen Studien kommt der WSDI (Warm Spell Duration Index) zum Einsatz. Dieser beschreibt eine Periode von mindestens sechs aufeinanderfolgenden Tagen, an welchen das lokale 90. Perzentil der Tageshöchsttemperaturen aus der Referenzperiode überschritten wird (z.B. 1980-2009 in CH2011).

Es gibt also eine Vielzahl von möglichen Definitionen und Indikatoren für Hitzeereignisse, welche auf die jeweiligen Regionen oder Anforderungen der Studien angepasst wurden. Bei der späteren Betrachtung von Studien zu hitzebedingten Gesundheitsfolgen kann die Verwendung unterschiedlicher Indizes den Vergleich untereinander erschweren.

### 3.2 Klimatische Rahmenbedingungen in der Schweiz – Status Quo

Die Schweiz verfügt über ein breites Repertoire an Klimatypen. Die Vielfalt an Höhenlagen, von 200 bis über 4000m, sorgt für entsprechende Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse. Gleichzeitig wirken die Höhenlagen der Alpen als Klimaschranke zwischen den Regionen „Nördlich der Alpen“ (NdA) und „Südlich der Alpen“ (SdA). Die NdA-Region ist ozeanisch geprägt und weist ein gemäßigtes Klima auf. Die feucht-milde Meeresluft dämpft dabei die jahreszeitlichen Schwankungen. Die SdA-Region zeigt bereits eine mediterrane Prägung, mit deutlich milderem Winter. Die inneralpinen Talregionen weisen niedrigere Niederschläge auf als die tiefer liegenden Regionen, da sie von beiden Seiten vor den Niederschlägen abgeschirmt sind (MeteoSchweiz 2016).

Nach der Köppen-Geiger-Klimaklassifikationen<sup>6</sup> gehört der nördliche Teil der Schweiz dem feucht kontinentalen Klima (Dfb) an (z.B. Lausanne, Bern, Winterthur nach Climate-data.org 2016). Bei Betrachtung des lokalen Klimas zeigt sich, dass viele Regionen dem maritimen Klima (Cfb) zugeordnet werden können. Dies gilt z.B. für die Städte Zürich, Genf, Basel, Luzern und Lugano (Climate-data.org 2016). Einige wenige Randbereiche der Hochgebirgsregionen sind dem subarktischen Klima (Dfc) zuzuordnen. Die Hochgebirgsregionen

---

<sup>5</sup> Beispielsweise: Das 90. Perzentil bezeichnet den Temperaturwert, unterhalb dessen 90% der Temperaturwerte liegen und nur 10% der Werte darüber. Das 99. Perzentil bezeichnet den Temperaturwert, unterhalb dessen 99% der Temperaturwerte in der Verteilung liegen und nur 1% darüber.

<sup>6</sup> Einteilung der Regionen der Welt nach ihren Temperatur- und Niederschlagsmustern. Siehe z.B. Peel et al. (2007).

werden als Tundra Regionen in der Klimaklassifikation benannt (ET). Für die weitere Analyse der klimawandelbedingten Zunahme von Hitzeereignissen und ihrer Wirkung auf die Gesundheit werden nur hitzeexponierte Regionen der Klimate Cfb und Dfb näher betrachtet. Für die spätere Analyse der Auswirkungen von Hitze auf Gesundheit könnten, unter der Voraussetzung, dass die Regionen sozio-ökonomisch vergleichbar sind, Studien aus anderen Regionen der Welt mit diesen Klimaklassifizierungen genommen werden.

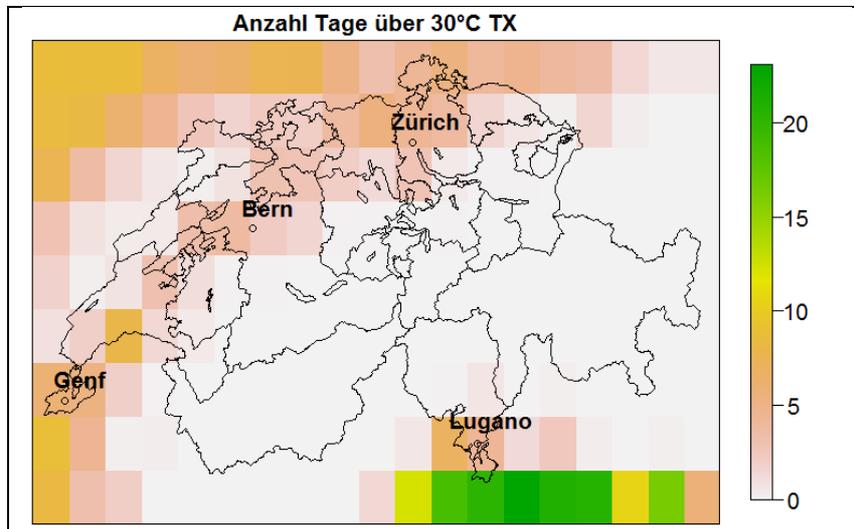


Abbildung 4: Karte der Schweizer Kantone mit E-OBS-Mittelwert (1971-2000) für die Anzahl der Tage mit über 30°C Höchsttemperatur (eigene Berechnungen + Darstellung).

Die räumliche Verteilung der Hitzeexposition in der Schweiz wurde aus ECA-Beobachtungsdaten (European Climate Assessment; Haylock et al. 2008) errechnet. Dargestellt sind in Abbildung 4 die Anzahl der *Heißen Tage* (Tageshöchsttemperatur über 30°C) für jede Gitterzelle. Deutlich ist die Unterteilung der hitzebetroffenen Regionen in „Nördlich der Alpen“ (Genf, Bern, Zürich und Basel) und „Südlich der Alpen“ (Lugano) auszumachen. Im Band von Genf über Bern nach Zürich gibt bis zu 8 Heiße Tage pro Jahr (Anm.: Mittelwerte der Gitterzellen können von den Werten an Wetterstationen in der Region abweichen). In diesen hitzeexponierten Regionen der Schweiz lebt auch der Großteil der Bevölkerung des Landes.

### 3.3 Hitzeereignisse in der Vergangenheit in Mitteleuropa und der Schweiz

Der IPCC (2013) geht davon aus, dass sich in der Vergangenheit die Häufigkeit von Hitzewellen erhöht hat (siehe auch Donat et al. 2013). So konnten Della-Marta et al. (2007) zeigen, dass sich in Westeuropa die Länge der Hitzewelle seit 1880 etwa verdoppelt hat. Christidis et al. (2015) konnten zeigen, dass in den letzten Jahren die Wahrscheinlichkeit eines extrem heißen Sommers von zweimal pro Jahrhundert in den frühen 2000er auf zweimal pro Jahrzehnt angestiegen ist. Für extreme Ereignisse wie den Hitzesommer 2003 ist die Wahrscheinlichkeit von einmal in mehreren Tausend Jahren auf einmal in etwa einem Jahrhundert angestiegen (Christidis et al. 2015).

In den letzten Jahren fanden in Europa einige außergewöhnliche Hitzeereignisse statt, mit entsprechend umfangreichen Auswirkungen auf die Gesellschaft. Dazu zählt die Hitzewelle von 2003 (Beniston 2004), die Hitzewelle 2006 (Chiriaco et al. 2014), die Hitzewelle in Russland 2010 (Barriopedro et al. 2011; Dole et al. 2011; Trenberth und Fasullo 2012) und die Hitzewelle von 2015 in Südeuropa (Vicedo-Cabrera et al. 2016).

So sorgte der Hitzesommer des Jahres 2003 zwischen Mai und September in vielen Teilen West- und Zentraleuropas für erhöhte Temperaturen (Rebetez et al. 2006; Beniston 2004). Die Phase zwischen Juni und August 2003 kann als der heißeste Sommer seit 500 Jahren in Mitteleuropa betrachtet werden (Luterbacher

et al. 2004). Insbesondere Frankreich war betroffen (Bader 2004). García-Herrera et al. (2010) analysiert im Detail, welche Rolle Faktoren wie Bodenfeuchte, Blocking-Ereignisse (Erläuterungen dazu weiter unten) und die Oberflächentemperatur auf das Ereignis hatten. Die Folgen auf den Gesundheitssektor waren umfangreich (näheres in Kapitel 4) und führten im Nachgang zur Installierung von Frühwarnsystemen in den meisten Städten Europas.

Näheres zum erwähnten Einflussfaktor Bodenbedingungen findet sich beispielsweise in Fischer et al. (2007), Lorenz et al. (2010) und im IPCC (2013). So wird die Ausprägung und Dauer von Hitzewellen durch trockene Böden noch verstärkt. In Bodenfeuchte-limitierten Regionen (wie beispielsweise die trockenen Regionen in den Tälern der Alpen) kann es also zu einer Rückkopplung zwischen Bodenfeuchte und Temperatur kommen (Fischer et al. 2007).

Stefanon et al. (2012) zeigte, dass auch im Jahre 2006 eine Hitzewelle im Westen Europas zu verzeichnen war. Diese Hitzewelle war bei weitem nicht so stark wie die Ereignisse in den Jahren 2003 und 2010. Nach Fouillet et al. (2008) wurde die Hitzewelle 2006 jedoch zumindest in Frankreich und zu dieser Zeit als die zweitstärkste Hitzewelle seit den 50ziger Jahren wahrgenommen. Rebetez et al. (2009) konnten zeigen, dass für bestimmte Temperaturgrenzwerte die betroffene Fläche in der Hitzewelle 2006 und bestimmte Temperaturmittel in 2006 (bspw. Julitemperatur) über denen von 2003 lagen. Chiriaco et al. (2014) stellte auch für dieses Extremereignis neben den überregionalen meteorologischen Bedingungen eine verstärkende Bedeutung von lokalen Bedingungen, wie besonders trockene Böden, fest.

Die Hitzewelle des Jahres 2010 sorgte im Westen Russlands für ungewöhnlich hohe Temperaturen (Dole et al. 2011; Trenberth & Fasullo 2012; Barriopedro et al. 2011). Mit den höchsten Sommertemperaturen seit 1500 verursachte diese Hitzewelle unter anderem in der Region rund um Moskau für langanhaltende Waldbrände (Barriopedro et al. 2011). Inwieweit dieses ungewöhnliche meteorologische Ereignis durch den anthropogenen Klimawandel verursacht wurde, wird noch diskutiert (IPCC 2013). So argumentieren Rahmstorf & Coumou (2011) für einen starken Einfluss des anthropogenen Klimawandels, da sich ihrer Meinung nach die Wahrscheinlichkeit eines Hitzerekords in der Region Moskau durch den Erwärmungstrend in der letzten Dekade verfünffacht hat. Dole et al. (2011) argumentieren im Gegenteil, dass die Hitzewelle in Russland anders als die Hitzewelle im Jahre 2003 nicht auf anthropogene Änderung des Klimas zurückzuführen ist, sondern eher eine im Rahmen der Variabilität des Klimas mögliche Blocking-Erscheinung darstellt.

Bei diesen Blocking-Ereignissen handelt es sich um stabile, sich langsam bewegende Hochdruck-Systeme, welche die vorherrschenden Westwindlagen unterbrechen. Der IPCC weist darauf hin, dass Hitzewellen meist mit solchen quasi-stationären Hochdruckwetterlagen einhergehen (García-Herrera et al. 2010). Die langfristige Änderung in deren Dauer und Häufigkeit ist jedoch immer noch relativ schlecht verstanden (IPCC 2013). Einige Studien für Mitteleuropa deuten darauf hin, dass diese Blocking-Wetterlagen im Sommer seit der Mitte des 20. Jh. zugenommen haben (Philipp et al. 2007; Trnka et al. 2009), jedoch ist deren Aussage noch umstritten IPCC (2013).

Demgegenüber konnten Fischer & Knutti (2015) bei der Untersuchung des Einflusses des Menschen auf Extremwetterereignisse einen deutlichen anthropogenen Beitrag feststellen. So sind moderat extremen Hitzewellen (99,9. Perzentil) zu 75% auf die Temperaturzunahme seit der vorindustriellen Zeit zurückzuführen und diese wiederum zu einem Großteil auf menschliche Einflüsse.

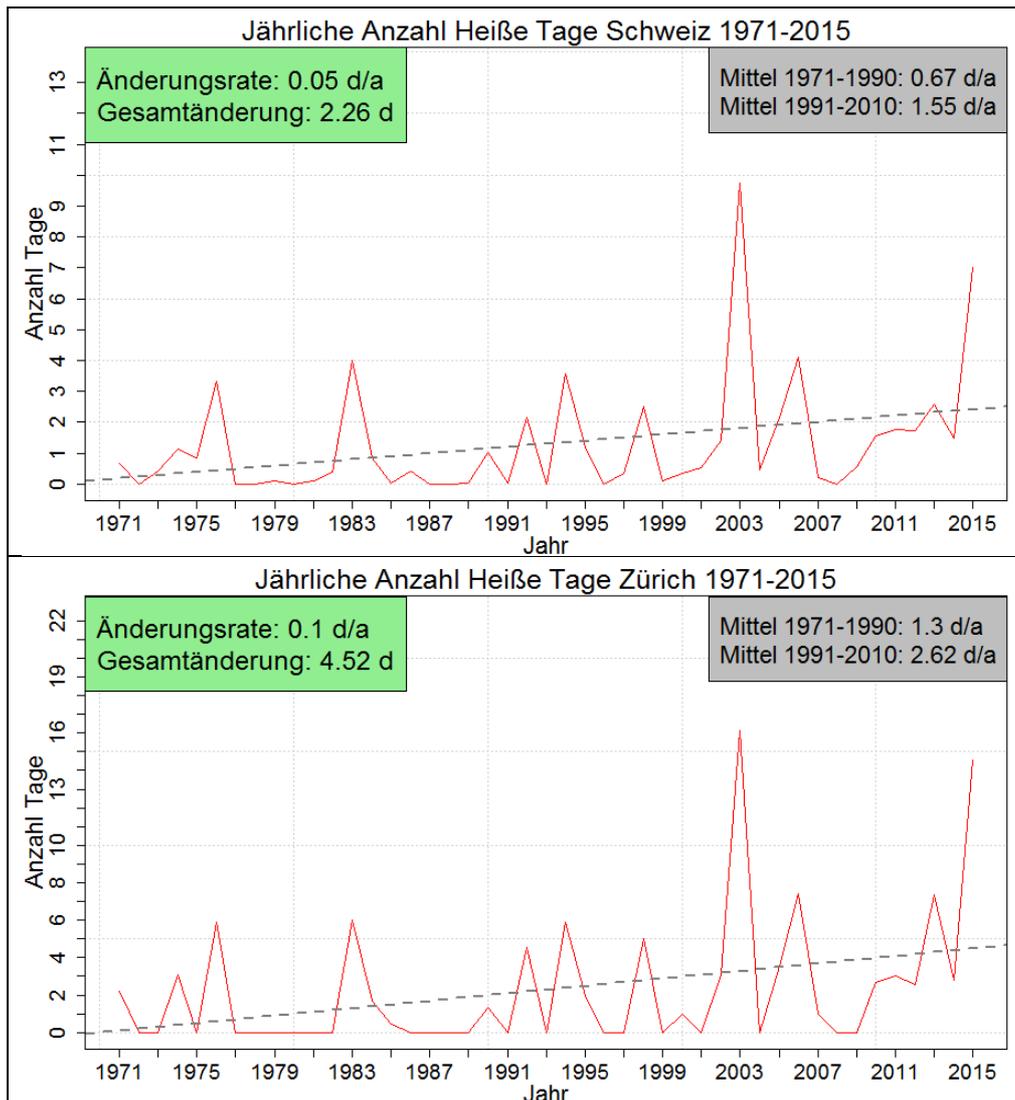


Abbildung 5: Entwicklung der jährlichen Anzahl der *Heißen Tage* ( $T_X \geq 30^\circ\text{C}$ ) in der gesamten Schweiz und beispielhaft für die Region Zürich (1971-2015) (Datenquelle: ECAD - Haylock et al. 2008; eigene Berechnung und Darstellung; Trends signifikant auf 5%-Niveau).

Wie in Abbildung 5 (links und rechts) zu erkennen, waren die genannten Hitzeereignisse auch in der Schweiz zu spüren. Die Hitzewelle im Jahre 2003 verursachte in der gesamten Schweiz die höchste Anzahl von *Heißen Tagen* im betrachteten Zeitraum. An zweiter Stelle folgt das Jahr 2015. Die Schweiz ist also ebenso wie der Rest des Kontinents von Hitzewellen und ihren Wirkungen betroffen. Aufgrund der naturräumlichen Diversität bestehen jedoch große Unterschiede in den klimatischen Bedingungen. So wurde im Laufe der Hitzewelle von 2003 in Grono, nordöstlich von Lugano, (11. August 2003) der landesweite Rekord von einer Höchsttemperatur von  $41,5^\circ\text{C}$  gemessen (MeteoSchweiz 2016).

Die in Kapitel 4 eingehender betrachtete Studie von Grize et al. (2005) merkt für die Hitzewelle des Jahres 2003 an, dass die Kombination von Tagestemperaturen über  $35^\circ\text{C}$  und Nachttemperaturen über  $20^\circ\text{C}$ , sogenannte Tropische Nächte, vorwiegend in Basel und Genf auftraten. Weiterhin beschrieb Grize et al. (2005), dass zwischen Juni und August 2003 die mittlere Tagestemperatur nördlich der Alpen  $3,7^\circ\text{C}$  ( $3,5^\circ\text{C}$  Südlich der Alpen) über der Referenzperiode 1990 bis 2002 lag und die Anzahl der Nächte über  $17^\circ\text{C}$  in allen Regionen deutlich erhöht war. Diese Grenze von  $17^\circ\text{C}$  definierte Grize et al. (2005) nach dem 99. Perzentil der Tiefsttemperaturverteilung (1990-2002). Die höchsten Temperaturen (auch Kombination heißer Tag und heiße Nacht) wurden in Basel und Genf festgestellt. Dabei wurden die Unterschiede zwischen Stadtrand und

Zentrum als nur gering identifiziert. Das Jahresmittel 2003 war das zweithöchste in der Schweiz seit Beginn der Wetteraufzeichnung (Bader 2004). Die Sommermonatstemperatur hat in der Schweiz in 2003 die Temperaturrekorde (1947; 2,7°C über langjährigem Mittel) um 2,4°C übertroffen (Schär et al. 2004; Luterbacher et al. 2004). Sektor-basierte Angaben zu den Folgen der Hitzewelle 2003 finden sich in ProClim (2005).

Auch im Jahre 2015 konnte ein verstärktes Auftreten von Hitzetagen in der Schweiz beobachtet werden (Vicedo-Cabrera et al. 2016). So war die erste Juliwoche eine der wärmsten seit Messbeginn. Die durchschnittlichen Tageshöchsttemperaturen lagen nördlich der Alpen bei 33 bis über 36°C. In Genf wurde am 7. Juli 39,7°C – die höchste je auf der Alpennordseite der Schweiz gemessene Temperatur festgestellt (MeteoSchweiz 2015).

Die Zunahme von Hitzeereignissen ist auch auf Schweizer Ebene zu verzeichnen. So ist in der Schweiz (Abbildung 5) ein signifikanter Anstieg der *Heißen Tage* zu verzeichnen. Auch die Sommertemperaturen in der Schweiz haben seit dem Höhepunkt der kleinen Eiszeit im 17. Jh. bereits um mehr als 2°C zugenommen – mit einem Großteil des Anstieges nach 1975 (Akademien der Wissenschaften Schweiz 2016). Von den 20 wärmsten Jahren, die seit Messbeginn bestimmt wurden, liegen 17 im Zeitraum nach 1990. Die Temperaturzunahme, gemessen in dekadischen Trends, ist in der Schweiz mehr als doppelt so hoch wie im Rest der nördlichen Hemisphäre (Rebetez & Reinhard 2008). Das Jahr 2015 markiert das bisher wärmste Jahr seit dem Beginn der Wetteraufzeichnung in der Schweiz (Akademien der Wissenschaften Schweiz 2016). Andererseits konnten Beniston & Goyette (2007) feststellen, dass die Variabilität der Tageshöchst – und Tagestiefsttemperaturen in der Schweiz im Laufe des 20. Jh. abgenommen haben. Dies führen sie auf die Abnahme von kalten feuchten Wetterlagen und der Zunahme von trockenen warmen Sommerwetterlagen zurück. Scherrer et al. (2016) konnte für die Schweiz zeigen (Betrachtung von 9 Wetterstationen), dass zwischen 1901 und 2015 die Anzahl der moderaten Sommertemperaturextreme (90. Perzentil der Tageshöchsttemperatur) sich nahezu verdoppelt haben (+94%) und die extremeren Ereignisse (TX99p) sich gar verdreifacht haben (+212%).

Weiterhin ist hier die besondere Rolle von urbanen Regionen zu erwähnen. Aufgrund einer erhöhten Wärmespeicherfähigkeit, höherer Versiegelung und einer geringeren Evapotranspiration kommt es in dichten Besiedlungen zum sogenannten Urbanen Hitzeinseleffekt (UHI) (Oke 1973; Arnfield 2003; McCarthy et al. 2010). Bei der Abschätzung der Hitzebelastung müssen sowohl die klimawandelbedingte Temperaturzunahme als auch der Urbane Hitzeinseleffekt Beachtung finden (Fischer et al. 2012). Für Basel konnte Parlow et al. (2014) einen Temperaturunterschied im Tagesmittel zwischen Stadt und Umland von 0,7°C im Winter und 1,3°C im Sommer nachweisen.

### **3.4 Zukünftige Entwicklung von Hitzeereignissen in Mitteleuropa und der Schweiz**

Weltweit, aber auch auf Europäischer Ebene, wird in Zukunft von intensiveren, häufigeren und längeren Hitzeereignissen ausgegangen (Meehl & Tebaldi 2004; Christidis et al. 2015; Dole et al. 2011; u.a.). Global werden Hitzeextreme, welche heute noch alle 20 Jahre auftreten, ihre Eintrittswahrscheinlichkeit unter dem Treibhausgaskonzentrationspfad RCP8.5 (siehe Abbildung 3 bzw. Erläuterungen Kapitel 2) verdoppeln oder treten in manchen Regionen dann jährlich auf (IPCC 2013; Akademien der Wissenschaften Schweiz 2016). Coumou et al. (2013) gehen davon aus, dass unter einem mittleren Erwärmungsszenario (RCP4.5) bis zum Jahre 2040 die globale Anzahl der monatlichen Hitzerekorde zwölfmal so hoch sein wird, wie ohne globale Erwärmung.

Nach Auswertung von globalen Daten gehen Russo et al. (2014) in ihrer Studie von einer Verdoppelung der Häufigkeit einer Hitzewelle wie in 2003 bis zum Zeitraum 2020-2052 (von alle 30 Jahre auf alle 15 Jahre) und bis zu einer siebenfachen Häufigkeit bis 2068-2100 für Europa aus (Treibhausgasszenario RCP8.5). Barriopedro et al. (2011) zeigen unter Verwendung von Regionalen Klimamodellen für Europa, dass bis zur Mitte des Jahrhunderts fünf- bis zehnmals so häufig Extremsommer mit Anomalien über dem dreifachen der Standardabweichung der Sommermitteltemperatur auftreten werden. In der zweiten Hälfte des 21. Jh. wird diese Zunahme noch stärker ausfallen (A1B-Szenario). Fischer & Schär (2010) errechneten unter Verwendung von Regionalen Klimamodellen aus dem ENSEMBLES-Projekt die Änderung der Häufigkeit von Hitzewellen. Für den Indikator „kombiniertes Auftreten von *Heißen Tagen* und *Tropischen Nächten*“ fanden sie eine Häufigkeitsänderung für Mitteleuropa von 0,4 Tage pro Saison in den Jahren 1961-1990, auf 1,6 Tage pro Saison in den Jahren 2021 bis 2050 und auf 4,9 Tage pro Saison in den Jahren 2071-2100. Dieser und andere Indikatoren deuten damit auf eine Verzehnfachung der Häufigkeit von Hitzewellen bis zum Ende des Jahrhunderts im Vergleich zu 1961-1990. Laut dem Special Report zu Extremwetterereignissen des IPCC (IPCC 2012) werden sich in Mitteleuropa die Hitzeextreme teilweise stärker intensivieren als andernorts. Ursache dafür ist der von der Mehrheit der Modelle projizierte Zusammenhang der Zunahme von sommerlicher Temperaturvariabilität und Änderungen der Bodenfeuchte. Dies hat zur Folge, dass die Temperaturen von Hitzeextremen stärker steigen als die entsprechenden Mitteltemperaturen (IPCC 2012; Akademien der Wissenschaften Schweiz 2016).

Die klimatische Entwicklung in Europa und der Schweiz wird von globalen Trends, aber auch von der regionalen Entwicklung, z.B. aufgrund komplexer Topographie in der Schweiz, beeinflusst werden (Akademien der Wissenschaften Schweiz 2016). So gibt der Bericht Brennpunkt Klima Schweiz für die Anzahl der *Sommertage* im Mittelland an, dass diese sich von heute 30-50 auf 60-100 Tage pro Jahr bis Ende des Jh. verdoppeln werden (unter RCP8.5). Unter RCP2.6 (Entwicklungspfad mit Temperaturzunahme von rund 1,5°C) würden diese lediglich auf 50 bis 70 *Sommertage* zunehmen (Akademien der Wissenschaften Schweiz 2016). Im CH2011 (2011), einem Bericht zur Nationalen Abschätzung der klimatischen Entwicklung in der Schweiz, wird ebenfalls von einer Zunahme in Häufigkeit und Stärke von lang anhaltenden Wärmeperioden und sommerlichen Hitzewellen ausgegangen. Hitzewellen gemessen mit dem *WSDI* (siehe 3.1) nehmen um 10 bis 80 Tage pro Sommer bis zum Ende des Jh. in den drei Regionen – Nordost, West und Südschweiz - zu. Wobei die Änderungen im Süden noch etwas stärker ausgeprägt sind (A1B-Szenario).

Beniston (2004) geht davon aus, dass der Hitzesommer 2003 ein gutes Beispiel für die Sommer ist, welche uns am Ende des Jahrhunderts bevorstehen. Beispielhaft konnte er für Basel zeigen, wie die jährliche Anzahl der *Heißen Tage* von 8 im Zeitraum 1961-1990 auf 38 im Jahre 2071-2100 (unter Verwendung vom Regionalmodell HIRHAM4 und Szenario A2) ansteigt. Dies entspricht in etwa einer Verfünffachung. Die Anzahl der *Heißen Tage* im Sommer 2003 betrug 41. Mit dem gleichen Klimamodell wurde auch in Beniston & Diaz (2004) ähnliches nochmals für Basel gezeigt. In den Jahren 1961-1990 wurde die 30°C-Grenze (Tageshöchsttemperatur) an weniger als 10% der Tage im Sommer überschritten, gegen Ende des Jahrhunderts (2071-2100) wird dies an nahezu der Hälfte der Sommertage geschehen.

Schär et al. (2004) gehen in ihrer Studie davon aus, dass gegen Ende des 21. Jh. jeder zweite Sommer so warm oder wärmer wie der Hitzesommer 2003 sein wird (A2-Szenario). Abbildung 6 zeigt die Änderung der Verteilung der Temperatur für eine Region im Norden der Schweiz, einmal für die Vergangenheit (1961-1990) und eine Projektion für 2071-2100. Dabei wird ersichtlich, wie sich die Temperaturverteilung um etwa 4,6°C ins Wärmere verschieben und dabei ebenfalls breiter wird, also die Variabilität zunimmt.

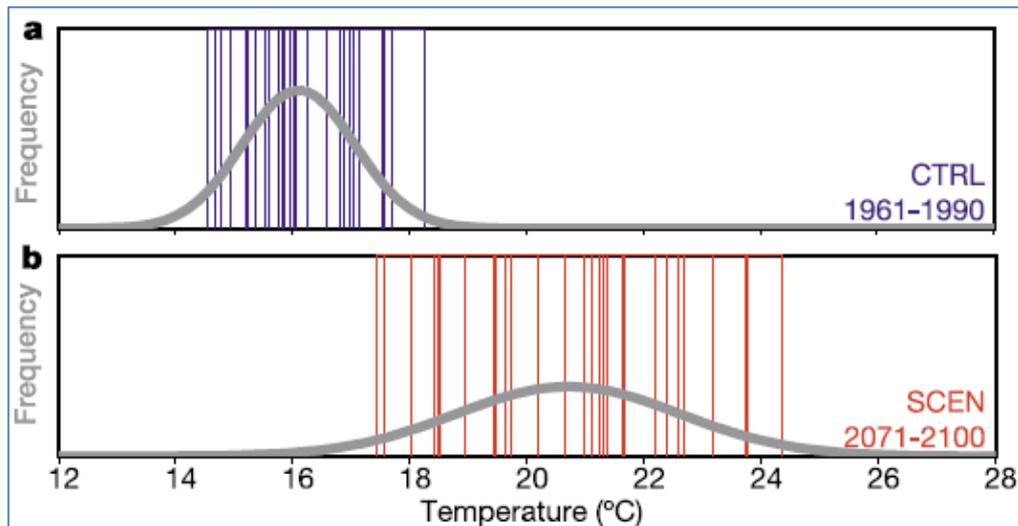


Abbildung 6: Vergleich der modellierten Temperaturen in 1961-90 (CTRL) und der projizierte Temperaturen in 2071-2100 (SCEN) in der Schweiz (aus Schär et al. 2004).

Zubler et al. (2014) zeigen, dass die stärkste Zunahme bis zum Ende des Jh. an Sommertagen für das Schweizer Flachland, das Rhone Tal und Ticino zu erwarten ist. Im A1B und A2 Szenario wird unterhalb von 800m etwa mit einer Verdopplung der Sommertage gerechnet. In höheren Lagen ist die relative Zunahme noch größer. Ähnliches kann für die Anzahl der tropischen Nächte beobachtet werden – von nahezu keinem Auftreten in heutiger Zeit wird sie auf rund 50 bis zum Ende des Jh. in Ticino und 5-20 im Flachland ansteigen (A1B und A2 Szenario). Es wird jedoch ebenfalls von Zubler et al. (2014) deutlich gemacht, wie stark die Ergebnisse vom Treibhausgasszenario abhängen. So würden die Änderungen unter RCP2.6 deutlich geringer ausfallen.

Der Bericht Brennpunkt Klima Schweiz (Akademien der Wissenschaften Schweiz 2016) weist darauf hin, dass die Änderungen in den Hitzeextremen konsistent sind mit den großräumigen Entwicklungen in Europa und der Welt. Bei der Betrachtung von klimatischen Änderungen, also Änderungen welche über einen längeren Zeitraum gemittelt wurden, muss beachtet werden, dass diese generell von einer hohen natürlichen Variabilität überlagert werden (Fischer et al. 2013). Beispielsweise können trotz einer langfristigen Zunahme in der Häufigkeit von Hitzeereignissen, kühle Sommer oder kalte Winter auftreten.

Zusammenfassend lässt sich bei den erwähnten Studien eine große Spanne an verwendeten Daten und Szenarien, betrachteten Regionen und analysierten Hitzeindikatoren feststellen. Unter der Annahme des ungünstigsten „business as usual“-Szenarios für die weitere Betrachtung (RCP8.5 oder A2), deutet vieles auf eine mögliche Zunahme der gesundheitsrelevanten Hitzeereignisse zwischen 100% und 400% hin (siehe insbesondere Beniston 2004 und Zubler et al. 2014).

#### 4. Auswirkungen erhöhter Umgebungstemperatur auf die menschliche Gesundheit

Die thermische Belastung nimmt negativen Einfluss auf die menschliche Leistungsfähigkeit, die Psyche und generell das Wohlbefinden tagsüber wie nachtsüber (Dombois & Braun-Fahrländer 2004). Die Wirkung erhöhter Umgebungstemperatur auf den menschlichen Organismus kann Morbidität (Krankhaftigkeit) und Mortalität in Folge einer Hyperthermie (Überwärmung) des Körpers hervorrufen. Genauer gesagt sind es der Hitzekollaps, die Hitzeerschöpfung und der Hitzeschlag, die mit einem Anstieg der Körpertemperatur über die üblichen 36,3 - 37,4 °C einhergehen. Zum Hitzetod kann es kommen, wenn die Körpertemperatur über

40°C ansteigt. Tabelle 1 zeigt die verschiedenen Hitzeschäden und Krankheitsbilder nach der Internationalen Klassifikation der Krankheiten (ICD, International Classification of Diseases) auf. Im Folgenden wird erläutert, wie der menschliche Organismus auf erhöhte Umgebungstemperatur reagiert und wie der Schutzmechanismus gegen Hitzeschäden funktioniert und wann er versagt.

**Tabelle 1 Klassifikation von Schäden durch Hitze und Sonnenlicht nach ICD-10 Codes. Quelle: <http://www.icd-code.de/icd/code/T67.-.html>**

Klassifikation ICD-10	Schaden	Erklärung
T67.0	Hitzeschlag und Sonnenstich	Krankheitsbild nach intensiver Sonnenbestrahlung des Kopfes. Symptome: Abgeschlagenheit, Kopfschmerzen, Schwindel, Übelkeit, Brechreiz, Pulsbeschleunigung. Möglich sind Präkoma, Koma oder Tod.
T67.1	Hitzesynkope (Bewusstlosigkeit) Inkl.: Hitzekollaps	Kreislaufversagen mit mangelhaftem venösem Rückfluss durch Erreichen der individuellen maximalen Erträglichkeit von Wärmebelastung. Symptome: Hautrötung, starke Schweißabsonderung bei Trockenheit der Schleimhäute, Durst, Kopfschmerzen, Schwindel, Flimmerskotom, Ohrensausen und Hitze-kompensierende Schweißsekretion. Übergang in Hitzschlag.
T67.2	Hitzekrampf	Muskelkrämpfe während körperlicher Arbeit bei Einwirkung strahlender Hitze durch Kochsalzverluste mit dem Schwitzen. Symptome: Mattigkeit, Kopfschmerzen, psychischer Reizbarkeit, Brechneigung, Rückgang der Harnbildung, Fibrillieren u. Krämpfen.
T67.3	Hitzeerschöpfung (Wasserverlust)	Wie T67.1, durch Flüssigkeitsverlust ohne Zufuhr von außen.
T67.4	Hitzeerschöpfung (Salzverlust)	Wie T67.1, durch Elektrolytverlust ohne Zufuhr von außen.

Der innerste Kern des menschlichen Körpers umfasst das Gehirn, die Lunge, die inneren Organe und andere Organe, deren Funktion nur in einer engen Temperaturbandbreite aufrechterhalten werden kann. Ein Temperaturgradient vom innersten Kern hin zur Haut und zur Umgebungsluft muss gegeben sein, damit die Wärme aus dem Körper heraus transportiert und an die Umgebungsluft abgegeben werden kann (Hanna & Brown 1983). Dieses thermale Gleichgewicht ist normalerweise bei unbekleideten, ruhenden Personen mit normaler metabolischer Rate bei circa 24°C bis 29°C Umgebungstemperatur intakt. Eine Erwärmung der Umgebungstemperatur stört dieses Gleichgewicht. Der Wärmetransfer vom inneren Kern des Körpers über die Haut an die Umgebungsluft funktioniert weniger gut. Dies zieht einen Anstieg der Körpertemperatur nach sich. Die Thermoregulation im Gehirn löst zwei Reaktionen aus: (1) das Steigern des Wärmetransfers vom Körperinneren nach außen zur Umgebungsluft und (2) die Verdunstung des im Schweiß enthaltenen Wassers an der Hautoberfläche, was eine kühlende Wirkung hat (Hanna & Brown 1983).

Der Wärmeverlust kann angekurbelt werden, indem das Blut von den inneren zu den oberflächlichen Venen gepumpt wird, wo es abkühlen kann, bevor es wiederum in das Körperinnerste eintritt (Hanna & Brown 1983). Auch der Transport von Blut in die Extremitäten ist eine Kühlreaktion. Hände und Füße eignen sich durch ihre relativ großen Oberflächen bei geringer metabolischer Wärmeproduktion gut, um Wärme an die Umgebungsluft abzugeben. Die Reaktionen des kardiovaskulären Systems auf die Ansammlung von Blut in den Hautgefäßen sind eine erhöhte Herzfrequenz und höherer Blutdruck. Laut Ellis (1972) ist es genau dieser erhöhte Druck bzw. die notwendige erhöhte Herzleistung, die in vielen Fällen für die gesteigerte Anzahl von Todesfällen während Perioden extremer Hitze verantwortlich ist.

Die für die Thermoregulation zuständigen ekkrinen Schweißzellen beginnen ab einer Hauttemperatur von ca. 35°C zu arbeiten (Hanna & Brown 1983). Die Starttemperatur ist jedoch individuell verschieden. Die ekkrinen Schweißzellen am Rumpf beginnen zuerst zu arbeiten, diejenigen an den Extremitäten zuletzt. Die Schwitzrate wird heruntergefahren, sobald die Bluttemperatur entsprechend gesunken ist. Falls die innere Körper-

temperatur weiter steigt, kann es zur Erschöpfung der Schweißzellentätigkeit kommen. Die Kühlfunktion des Schwitzens durch die Verdunstungskälte ist nicht mehr gewährleistet (Hanna & Brown 1983).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es bei der Problematik Hitze und menschliche Gesundheit um den ganzheitlichen Effekt von erhöhter Umgebungstemperatur auf den menschlichen Körper geht. Studien über Schmerzempfindlichkeit und Schmerztoleranz gegenüber Temperatur (z.B. Schaffner et al. 2008) untersuchen eine damit nicht vergleichbare Thematik.

#### 4.1 Intrinsische Risikofaktoren und betroffene Bevölkerungsgruppen

Die individuelle **Akklimatisierung** ist trainierbar und ihr Grad beeinflusst die individuelle Reaktion auf Hitze. Der menschliche Körper kann sich schnell und effektiv an wärmere Umgebungstemperaturen anpassen. Der Stimulus für Akklimatisierungsmechanismen ist eine höhere Körpertemperatur über mehrere aufeinanderfolgende Tage. Die ekkrinen Schweißzellen erhöhen ihre Produktion. Akklimatisierung bedeutet ein Einsetzen des Schwitzens bei bereits niedrigerer Hauttemperatur und eine um ein mehrfaches gestiegene Menge der Produktionskapazität von Schweiß sowie auch die Aktivierung von inaktiven Schweißzellen. Akklimatisierung bringt außerdem eine Einsparung in Elektrolyten durch die Reduktion von Natrium und Chlorid Verlusten im Schweiß. Alle Schweißzellen sind bei Geburt vorhanden, jedoch viele inaktiv. Die Aktivierung der Zellen hängt vom Umgebungsklima ab und erfolgt in den ersten Lebensjahren. In heißen Klimaten beheimatete Menschen besitzen also eine größere Anzahl aktiver Zellen als Menschen, die dauerhaft in gemäßigten Klimaten leben. Generell sind Menschen aller Altersklassen also an das Klima angepasst, in dem sie bereits lange gelebt haben. Es ist jedoch möglich, dass sich Schweißzellen noch nach der Kindheit aktivieren können. Mit fortschreitendem Alter verringert sich die Dichte an ekkrinen Schweißzellen auf der Haut, aber ihre Kapazität steigt. Im fortgeschrittenem Alter nimmt die Schweißzellenaktivität ab und somit die Fähigkeit zur Thermoregulation (Hanna & Brown 1983; Dombois & Braun-Fahrländer 2004).

**Ältere Menschen** sind verglichen mit jüngeren Menschen gefährdeter gegenüber Hitze (Åström et al. 2011). Dies ist nicht allein auf das Alter zurückzuführen, sondern auch auf die im Alter auftretenden Gesundheitsprobleme, v.a. Erkrankungen des kardiovaskulären und respiratorischen Systems, welche Risikofaktoren darstellen (Mackenbach et al. 1997; Klenk et al. 2010). Zudem können sich ältere Menschen nicht mehr gut akklimatisieren, da die Schweißzellenaktivität abnimmt und sie weniger schnell schwitzen (Hanna & Brown 1983; Dombois & Braun-Fahrländer 2004). In der Literatur wurde auch analysiert in welcher Weise sich **Männer und Frauen** in ihrer Hitzetoleranz unterscheiden. Es wurde festgestellt, dass bei Frauen das Schwitzen erst bei höheren Hauttemperaturen beginnt, ihre Schwitzmenge geringer ist und sie mehr Hitze im Körper speichern. Jedoch wird davon ausgegangen, dass bei gleichem physischem Zustand keine Unterschiede in der Hitzetoleranz von Mann und Frau bestehen (Hanna und Brown 1983; Kenney 1985). **Physische Aktivität und Training** steigern die physische Fitness und diese steht in positivem Zusammenhang mit gesteigerter Hitzetoleranz. Damit geht eine höhere Schwitzrate einher, was die kardiovaskuläre Funktion verbessert und wiederum die Akklimatisierung erleichtert (Hanna & Brown 1983). Eine kleine **Körpergröße** ist von Vorteil, denn die größere Körperoberfläche in Relation zur Körpermasse fördert die Abgabe von Hitze an die Umgebungsluft (Hanna & Brown 1983). Auch der **Körperfettanteil** ist schädlich in warmen Klimaten. Schwerere Menschen akklimatisieren sich weniger leicht und sind daher gegenüber dem hitzebezogenen Tod einem höheren Risiko ausgesetzt (Hanna & Brown 1983). In warmer Umgebung schwitzen fettleibige Frauen übermäßig viel, speichern mehr Wärme und weisen eine höhere Herzfrequenz auf als dünnere Frauen. Körperfett hindert jedoch nicht den Abtransport von Wärme aus dem Körperinneren an die Hautoberfläche. Fettleibige Menschen haben von sich aus höhere innere Körpertemperaturen. Sie sind sogar bevorteilt, wenn es um die

Wärmeaufnahme von außen geht, denn durch das schlechte Verhältnis von Größe zu Masse bei Fettleibigen funktioniert der umgekehrte Wärmetransfer von außen nach innen weniger gut. Wiederum wirken sich geringere physische und kardiovaskuläre Fitness negativ auf die Akklimatisierung aus. Ihr kardiovaskuläres System ist durch das erhöhte Blutvolumen im Gewebe stärker belastet (Hanna & Brown 1983).

## 4.2 Extrinsische Einflussfaktoren auf hitzebezogene Mortalität

### 4.2.1 Der Einfluss von Klima- und Umweltfaktoren

Menschen sind an die **langjährige Durchschnittstemperatur** angepasst, in dem sie bereits lange gelebt haben (z.B. Iñiguez et al. 2010; Keatinge und Donaldson 2006; Kovats und Hajat 2008). Menschen, die in wärmeren Regionen leben, sind eher an Hitze angepasst, als solche, die in kühlen Regionen wohnen. Je größer die jährliche **Amplitude** (Temperaturschwankung), der eine Bevölkerung während des Jahres ausgesetzt ist, desto widerstandsfähiger gegenüber Temperaturextremen ist die Bevölkerung (Iñiguez et al. 2010). Der Einfluss der Durchschnittstemperatur kann den Effekt der Amplitude überdecken. **Lokale Winde** können für die Bevölkerung einen Komforteffekt an heißen, schwülen Tagen haben (Deb & Ramachandraiah 2011). Gerade in urbanen Räumen verbessern sie den Luftmassenaustausch (Ng 2012). **Luftverschmutzung** durch Feinstaub (PM<sub>2.5</sub> und PM<sub>10</sub>) und Gase wie Kohlenstoffmonoxid (CO), Ozon (O<sub>3</sub>), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) und Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) werden als Einflussfaktoren auf hitzebezogene Mortalität genannt (Almeida et al. 2010; Baccini et al. 2008; Gouveia et al. 2003; Kim et al. 2011; Rocklöv et al. 2011). Kim et al. (2006) fanden heraus, dass diese Schadstoffe eine Auswirkung auf Mortalität in Südkorea an sich haben, aber keinen Einfluss auf das Verhältnis von erhöhter Umgebungstemperatur und Mortalität.

### 4.2.2 Siedlungsstrukturelle, demographische und sozioökonomische Einflussfaktoren

Eine hohe **Einwohnerdichte** spiegelt sich in einer erhöhten Bebauungsdichte wider und kann über den Urbanen Hitzeinseleffekt (siehe 3.3) die Umgebungstemperaturen erhöhen (Luber und McGeehin 2008, Hajat und Kosatky 2010). Diese wurde daher auch als modifizierender Faktor des Verhältnisses von Temperatur und Mortalität in Städten der USA und in Brisbane identifiziert (Medina-Ramón & Schwartz 2007; Guo et al. 2013). Eine höhere Einwohnerdichte geht vermutlich nicht nur mit einer erhöhten Gebäudedichte, sondern auch mit einer erhöhten Verkehrsdichte und Emissionen einher, was den Urbanen Hitzeinseleffekt verstärkt. Der Hitzeinseleffekt ist proportional ausgeprägt zur **Stadtgröße** (Oke 1973) und wird unter anderem dadurch verursacht, dass künstliche Oberflächen (Dächer, Asphalt, Beton, Gebäude) eine geringe Albedo (Rückstrahlvermögen) haben. Diese Oberflächen bilden v.a. in Städten eine große thermale Masse, die Wärme tagsüber speichert und sie nachts an die Umgebungsluft abgibt, was zum Unwohlsein der städtischen Bevölkerung beiträgt (Akbari et al. 2008; Gago et al. 2013). In Städten hat die thermische Belastung einen stärkeren Effekt auf die Mortalität als auf dem Land. Andere Landnutzungsarten, wie Parks, Wasserflächen oder Waldflächen haben einen höheren kühlenden Effekt, als dass sie eine Erhöhung der Albedo hervorrufen (Rosenzweig et al. 2005). Eine **Stadtform**, bei welcher Landnutzungsarten mit kühlender Wirkung aus dem suburbanen Umland weit in die Stadt hineinragen, kann also vorteilhaft gegenüber einer runden und geschlossenen Stadtform sein. Zwischen der **Einwohnerzahl** und der Anfälligkeit gegenüber Hitze besteht laut Anderson und Bell (2009) ein positiver Zusammenhang.

Auch die Bevölkerungszusammensetzung bezüglich des **Alters** und des **Geschlechts** kann eine Rolle spielen im Kontext von Untersuchungen von hitzebezogener Mortalität in Städten. Während der Einfluss des Alters belegt ist, sind die Ergebnisse bezüglich der hitzebezogenen Mortalität für beide Geschlechter bisher jedoch widersprüchlich (Åström et al. 2011). In der **Altersklasse > 65 Jahre** wurde das Verhältnis von Temperatur

und Mortalität als stark und weltweit gültig beschrieben (Åström et al. 2011). Weitere Studien bestätigen die erhöhte Anfälligkeit von älteren Menschen, einen hitzebezogenen Tod zu sterben (z.B. Abrutzky et al. 2012; Baccini et al. 2008; Bell et al. 2008; Koppe et al. 2004; Kovats und Kristie 2006; Rocklöv et al. 2011). **Gesundheitliche Vorbelastungen**, Krankheiten der respiratorischen, koronaren und kardiovaskulären Systeme können die Anfälligkeit der Bevölkerung gegenüber Hitze steigern (Mackenbach et al. 1997; Kovats und Kristie 2006; McMichael et al. 2006; Klenk et al. 2010; Åström et al. 2011). Diese Erkrankungen gehen häufig mit hohem Alter einher. Bevölkerungsgruppen, die **sozial isoliert** und **ohne viele soziale Kontakte** leben, sind gegenüber Hitze besonders gefährdet (Semenza et al. 1996; Huang et al. 2011; Fouillet et al. 2006; Kovats & Kristie 2006; Åström et al. 2011). Immobilität oder psychogeriatrische Störungen können dies ebenfalls erschweren (Klenk et al. 2010). Auch diese beiden Faktoren treffen häufig auf ältere Menschen zu.

Einige Studien zeigen, dass es in der Gruppe der älteren Frauen zu einer messbar stärkeren Auswirkung von Hitzewellen kommt. Es muss im Detail betrachtet werden, wie die Studien zu dieser Aussage kommen und wie diese zu interpretieren ist. Verglichen mit anderen Bevölkerungsgruppen findet D'Ippoliti et al. (2010) beispielsweise die stärkste Zunahme in der Sterblichkeit verursacht durch respiratorische Erkrankungen bei Frauen zwischen 75 und 84 Jahren für Hitzephasen gegenüber Phasen ohne erhöhte Temperaturen. Sie führen dies auf die Tatsache zurück, dass viele ältere Frauen alleine leben sowie auf physiologische Unterschiede, wie reduzierte Schweißbildung. D'Ippoliti et al. (2010) weisen jedoch auf unterschiedliche Geschlechterverteilungen in den unterschiedlichen Altersgruppen hin, was wiederum Auswirkungen auf das „alleine wohnen“ mit sich bringt. So haben in der Schweizer Bevölkerung bei den 65-jährigen die Frauen noch eine Lebenserwartung von 22,6 Jahren, die Männer demgegenüber nur 19,8 Jahre (Bundesamt für Statistik, 2016b). Fouillet et al. (2006) fanden bei der Analyse der Hitzewelle 2003 für Frankreich eine weitaus höhere Übersterblichkeit für Frauen als für Männer. Auch diese Unterschiede konnten zum überwiegenden Teil auf eine höhere Lebenserwartung der Frauen zurückgeführt werden. Nach Einbeziehung dieses Umstandes liegt die Übersterblichkeit der Frauen 15% über derjenigen der Männer (beide Gruppen ab 55 Jahre). Weiterhin wiesen Kysely (2004), Muthers et al. (2010), Son et al. (2012) und Yu et al. (2010) ebenfalls eine höhere Sensitivität für die weibliche Bevölkerung nach. Auch hier wurde auf die Verbindung von Altersstruktur und Anteil der alleinlebenden Frauen als mögliche Ursache sowie die höhere physiologische Verletzlichkeit gegenüber höheren Temperaturen erwähnt (Kysely 2004). Andere Hitze-Mortalitätsstudien konnten keinen Zusammenhang zwischen **Geschlecht** und hitzebedingter Mortalität feststellen (O'Neill et al. 2003; Basu and Ostro 2008; Ma et al. 2012).

**Sozioökonomische Faktoren**, wie ein niedriges Ausbildungsniveau (McGeehin und Mirabelli 2001; Curriero et al. 2002; Gouveia et al. 2003; O'Neill 2003; Son et al. 2012), die Armutsrate und die Einkommensgruppen (Curriero et al. 2002; Huang et al. 2011; Son et al. 2012) haben innerhalb der Bevölkerung möglicherweise Einfluss auf die hitzebezogene Mortalität. Studien aus den USA belegen, dass die Nutzung von **Klimaanlagen** einen verringernden Effekt auf die Mortalität haben kann (Harlan et al. 2006; Curriero et al. 2002). Häufig wird in US Studien die Nutzung von Klimaanlagen als Wohlstandsindikator verwendet, was allerdings in Regionen, in denen Klimaanlagen in Wohngebäuden wenig verbreitet sind, nicht gelten kann.

### **4.3 Auswirkungen von Hitzeereignissen auf die Gesundheit in Europa bzw. der Schweiz**

Studien zu Hitze und Mortalität oder Morbidität betrachten den statistischen Zusammenhang von täglicher Temperatur und der Anzahl der täglichen Todesfälle bzw. Notfalleinsätze/Krankenhauseinlieferungen entweder unter der Gesamtbevölkerung oder eines bestimmten Bevölkerungssegments in einem Land, einer

Region oder in Städten. Meist sind die Untersuchungszeiträume unterschiedlicher Dauer. Die verwendete Temperaturmetrik ist von Studie zu Studie verschieden. Es werden die beobachtete Minimaltemperatur, die Maximaltemperatur oder die Durchschnittstemperatur auf täglicher Basis genutzt, oder deren Äquivalente der gefühlten Temperatur. Daher ist die Vergleichbarkeit der Studien beschränkt. Eine Art von Studien für gegenwärtige Klimakonditionen legt Grenzwerttemperaturen für Mortalität fest und errechnet die Übersterblichkeit<sup>7</sup> durch Hitze gegenüber einem Vergleichszeitraum, eine andere Art untersucht die Änderung des Mortalitätsrisikos von einem Temperaturperzentil zum nächsten. Studien für die Zukunft mit projizierten Klimadaten sind selten und die Aussagen zu Mortalitäts- und Morbiditätszahlen Schätzungen.

#### 4.3.1 Quantitative Aussagen zu Mortalität, Morbidität und Hitze in der Schweiz für die Gegenwart

##### *Schweiz insgesamt und regional*

Grize et al. (2005) schätzen die hitzebezogene natürliche Übersterblichkeit in der Schweiz für das Jahr 2003 gegenüber einem Referenzzeitraum von 1990 bis 2002. Es wurde eine Zunahme um 7% der hitzebezogenen natürlichen Mortalität im Jahr 2003 gegenüber der Mortalität während des Referenzzeitraums festgestellt. Für die **gesamte Schweiz** wurde von Juni bis August 2003 eine Übersterblichkeit von insgesamt 975 zusätzliche Todesfällen geschätzt, wobei 960 davon alleine auf die **Region nördlich der Alpen** entfallen. Es gab eine höhere Übersterblichkeit unter den Frauen (548) als unter den Männern (420) und innerhalb der Altersklasse > 80 Jahre wurden 659 der Todesfälle geschätzt. Aus dieser Studie ist nicht ersichtlich, wieviel diese Todesfälle prozentual an der weiblichen bzw. männlichen Bevölkerung ausmachen. Dombois und Braun-Fahrlander (2004) berufen sich auf Zahlen des Bundesamtes für Statistik, wonach es im August 2003 in der **Schweiz** 5253 Todesfälle gab, was einer Zunahme der Mortalität um 9,5% verglichen mit dem Durchschnitt der vier vorhergehenden Jahre entspricht. In der Altersklasse > 80 Jahre wurde für das Jahr 2003 verglichen mit dem Mittel der vier vorhergehenden Jahre ein Anstieg der Todesfälle registriert, wobei es bei den Frauen 19% und bei den Männern 21% mehr Todesfälle waren.

Cerutti et al. (2006) untersuchen den hitzebedingten Anstieg der natürlichen Mortalität und die Nachfrage nach Rettungsdiensten unter der älteren Bevölkerung im **Kanton Tessin** in der Südschweiz während dreier Hitzeperioden im Sommer 2003 im Vergleich zu den Sommern 2001 und 2002. Für die Gesamtbevölkerung wurde eine statistisch nicht signifikant von den Vorjahren 2001 und 2002 abweichende Mortalität im Jahr 2003 festgestellt. Lediglich in den Altersklassen > 65 und > 75 ließ sich während der ersten Hitzeperiode (9. Bis 30. Juni 2003) eine erhöhte und signifikante Abweichung von 21 und 14 Todesfällen gegenüber der erwarteten Mortalität erkennen. Die geringere Übersterblichkeit während der beiden folgenden Hitzeperioden lässt sich mit dem sog. Displacement bzw. Harvesting<sup>8</sup> Effekt der ersten Hitzeperiode erklären. Die Anzahl der Notfalleinsätze war während des Sommers 2003 wesentlich höher als erwartet.

Laut Robine et al. (2008) gab es in der Schweiz im Jahr 2003 vor dem Monat Juni 92 Todesfälle mehr als in der Referenzperiode 1998 bis 2002. Im Sommer wurde eine Übersterblichkeit von 1 039 Todesfällen gegenüber den Vorjahren für die Schweiz festgestellt. Davon entfallen die höchsten Übersterblichkeitswerte auf die Monate Juni (253) und August (469). Ab dem Monat Oktober 2003 gab es ein Defizit an Todesfällen gegenüber den entsprechenden Monaten der Referenzperiode. Im Vergleich unter 16 europäischen Ländern liegt die Schweiz gemäß dieser Studie im unteren Mittelfeld, was die standardisierte tägliche Häufigkeit an

---

<sup>7</sup> Anzahl von Todesfällen, die unter normalen Umständen nicht aufgetreten wären, Abweichung vom Erwartungswert

<sup>8</sup> Das zeitliche Vorziehen von Todesfällen. Nach einer Periode erhöhter hitzebedingter Mortalität sinkt die Anzahl der hitzebedingten Todesfälle unter den Erwartungswert ab, da die Todesfälle bereits eingetreten sind. Allerdings können durch thermische Belastung Todesfälle auch um Wochen oder sogar mehrere Monate verfrüht auftreten.

Todesfällen zwischen dem 3. August und dem 16. August 2003 angeht. Die Werte der Schweizer Regionen schwanken um den Median.

Während des Hitzesommers 2015 (Juni bis August) gab es in der Schweiz insgesamt eine Übersterblichkeit von 804 Todesfällen, was einer Zunahme der natürlichen hitzebedingten Mortalität von 5,4% gegenüber der Referenzzeit 2005 bis 2014 (Vicedo-Cabrera et al. 2016) entspricht. Die höchste Zunahme der Übersterblichkeit wurde für Juli berechnet (11,6%). Die Altersklasse  $\geq 75 - 84$  waren mit einer Zunahme der Übersterblichkeit von 9,7% (381 Todesfällen absolut) am stärksten betroffen. Innerhalb der Altersklasse  $\geq 85$  gab es 235 zusätzliche Todesfälle, was einer prozentualen Zunahme von 3,6% entspricht. Regional gesehen wurden die höchsten Zunahmen in der Übersterblichkeit gegenüber den Vorjahren in den Regionen Tessin (10,3% bzw. 71 Todesfälle), Nordwestschweiz (9,5% bzw. 197 Todesfälle) und Espace Mittelland (8,9% bzw. 317) errechnet. Allein im heißesten Monat Juli 2015 gab es hohe Zunahmen in der Übersterblichkeit in der Region Genfer See (12,5% bzw. 107 Todesfällen), in der Nordwestschweiz (14,4% bzw. 100 Todesfällen) und in Espace Mittelland (15,5% bzw. 15 Todesfällen). Die Region Tessin verzeichnete die höchste Zunahme der Übersterblichkeit im Juli 2015 mit 32,8% bzw. 75 zusätzlichen Todesfällen. Da die Übersterblichkeit 2015 ähnlich derer von 2003 war, ist die Gesamtübersterblichkeit 2015 ein Indikator dafür, dass die Umsetzung von Gesundheitskampagnen und –maßnahmen innerhalb dieser Dekade keinen maßgeblichen reduzierenden Effekt auf die Übersterblichkeit durch Hitze in der Schweiz hatten. Physiologische Akklimatisierung, bessere Gesundheitsdienstleistungen sowie weitere Verbreitung von Klimaanlage und verbesserte Isolierung von Häusern schienen ebenfalls keinen nennenswerten positiven Einfluss auf hitzebezogene Mortalität 2015 gehabt zu haben. Vicedo-Cabrera et al. (2016) verdeutlicht jedoch, dass dies im Gegensatz zu Studien zu anderen Regionen in Mitteleuropa steht. So gab es sowohl in Frankreich 2006 (Fouillet et al. 2008) als auch bei einer Hitzewelle 2013 in England (Green et al. 2016) eine deutliche Reduzierung der Mortalität gegenüber früheren Hitzewellen. Dies wurde ebenfalls durch eine Studie zu 9 europäischen Städten und die dortige Hitze-Mortalitäts-Relation festgestellt (de’Donato et al. 2015). Vicedo-Cabrera et al. (2016) gehen davon aus, dass diese Verbesserung in der Schweiz bisher ausblieb, da nur eine geringe Anzahl der Kantone Hitzewarnsysteme eingeführt hatte.

Eine aktuelle Studie von Ragettli et al. (2017) vergleicht die hitzebedingte Überschussmortalität zwischen den zwei Perioden 1995 bis 2002 und 2004 bis 2013 in acht Schweizer Städten. Es wurde ein erhöhtes relatives Mortalitätsrisiko an Tagen bei Temperaturen über  $31^{\circ}\text{C}$   $T_{\text{max}}$  apparent (Maximum der gefühlten Temperatur) gefunden gegenüber Tagen mit einer optimalen Temperatur von  $21^{\circ}\text{C}$   $T_{\text{max}}$  apparent, an denen die Sterblichkeit am geringsten ist. Das Mortalitätsrisiko war zu Beginn des Sommers höher, als während der restlichen Sommermonate. Insgesamt fanden die Autoren einen nicht-signifikanten Rückgang des Effekts von Temperatur auf die hitzebedingte Überschussmortalität von der Zeit vor der Hitzewelle 2003 zur Zeit danach bis 2013 in denjenigen Städten, die ein Hitzewarnsystem nach 2003 eingeführt hatten (Lugano, Lausanne und Genf). Generell waren die Älteren gegenüber den Jüngeren einem höheren Mortalitätsrisiko ausgesetzt, genau wie die Frauen gegenüber den Männern. Das höchste Risiko wurde für die Frauen  $> 74$  Jahre errechnet, unter Berücksichtigung der täglichen Minimumtemperatur als Temperaturindikator. Die ältere Bevölkerung blieb auch nach 2003 die gefährdetste Gruppe.

### *Schweizer Städte*

Während der Hitzewelle im Sommer 2003 wurden für die Städte **Basel** und **Genf** mit jeweils 128 und 123 die höchsten absoluten Übersterblichkeitswerte ermittelt (Grize et al. 2005). Diese Werte weichen für Basel um

24,4% und für Genf um 17,5% von der Anzahl der erwarteten Todesfälle basierend auf dem gleichen Zeitraum der Vorjahre ab. Weitere erhöhte Übersterblichkeiten wurden in Lausanne mit 52 und in Zürich mit 47 zusätzlichen Todesfällen festgestellt, was jeweils Abweichungen von 13,5% und 4,9% vom Erwartungswert für die beiden Städte ergeben. Die Übersterblichkeit in Bern war mit 10 zusätzlichen Todesfällen vergleichsweise gering und in Lugano nahm sie gegenüber dem Erwartungswert sogar ab.

Für die Stadt **Zürich** im Zeitraum 1990 bis 1996 errechnet Baccini et al. (2008) die Grenztemperatur, ab der die Mortalität der Stadtbevölkerung statistisch zu steigen beginnt, bei 21,8°C. Mit jedem Temperaturanstieg von 1°C beträgt der Zuwachs in natürlicher Mortalität in Zürich 1,37%. Die durchschnittliche tägliche Gesamtmortalität während der Sommermonate April bis September betrug 11,6 (13,5 im Winter zum Vergleich). Bei 1272 Untersuchungstagen muss die absolute natürliche Mortalität für den Untersuchungszeitraum bei 14755 Todesfällen gelegen haben, wobei jedoch nicht ersichtlich wird, ob es sich um die Gesamtmortalität handelt oder um hitzebedingte Übersterblichkeit. Durchschnittliche Mortalitätswerte für kardiovaskuläre Todesfälle lagen bei 5,2 pro Tag und für die respiratorischen Todesfällen bei 0,6 pro Tag. Daten speziell für die ältere Bevölkerung Zürichs sind nicht gegeben. Diese Studie für Zürich und andere Städte basiert auf Rahmenbedingungen und Daten von Michelozzi et al. (2007).

Das Präsidiatdepartement Statistik der Stadt **Zürich** (Schwierz & Riegelning 2013) untersuchte mittels einer Regressionsanalyse die Auswirkungen der meteorologischen Rahmenbedingungen auf die Sterbefälle in Zürich für die Jahre 1993 bis 2012. Obwohl nur etwa ein Drittel der zeitlichen Schwankungen der Sterberaten mit den Witterungsbedingungen in Verbindung gebracht werden konnte, zeigte sich für auf Temperatur und die Luftfeuchte bezogene Größen eine Relevanz für die Sterblichkeit. Bei den über 80-jährigen war dies die relative Luftfeuchtigkeit und die Anzahl der Tage über 25°C. Bei der Betrachtung des Hitzesommers 2003 zeigte sich eine konkrete Zunahme der Todesfälle. Die Gesamtsterberate der über 80-jährigen (Mai bis August) lag bei den Frauen aufgrund des höheren Bevölkerungsanteils über der der Männer. Jedoch betraf die erhöhte Sterblichkeit primär die älteren Männer. Es wird vermutet, dass der rasche Wetterumschwung in Kombination mit lang anhaltender Hitze zur Erhöhung der Sterberaten führte. Die witterungsbedingten Auswirkungen auf die Sterbefälle sind laut der Studie im Winter stärker als im Sommer.

#### **4.3.2 Quantitative Aussagen zu Mortalität, Morbidität und Hitze in Nachbarregionen der Schweiz für die Gegenwart**

##### *Regionale Vergleichswerte*

Aus der Studie von Robine et al. (2008) werden auch Vergleichswerte zu Übersterblichkeiten im Jahr 2003 gegenüber der Referenzzeit 1998 bis 2002 aus mit der Schweiz vergleichbaren gemäßigt warmen Ländern ersichtlich. In **Deutschland** waren es über den Sommer 9355 zusätzliche Todesfälle (+ 3,6%), in **Österreich** 345 (+ 1,45%) und in **Tschechien** 418 (+ 1,2%), während es in **Belgien** 1 175 (+ 3,62%) waren. Diese Länder rangieren, mit Ausnahme Südwestdeutschlands, wie die Schweiz im unteren Mittelfeld, was die standardisierte tägliche Häufigkeit an Todesfällen zwischen dem 3. August und dem 16. August 2003 angeht. Das bedeutet, dass hier eine tägliche Frequenz von Todesfällen feststellbar ist, die leicht über und unter den Median der jeweiligen Verteilung schwankt.

Im August 2003 gab es in **Baden-Württemberg** ungefähr 1250 Todesfälle, die der Hitzeperiode zugerechnet werden können. Ungefähr 800 Frauen und 450 Männer machen die Anzahl der Todesfälle aus (Studie des Sozialministeriums von Baden-Württemberg in: Dombois und Braun-Fahrländer 2004). Zwischen 249 und 335 Bewohnerinnen und Bewohner von Pflegeheimen in Baden-Württemberg fielen der Hitze zum Opfer.

Weitere Ergebnisse aus Südwestdeutschland unter der Bevölkerung in Pflegeheimen zwischen 2001 und 2005 bestätigen die hohe Anfälligkeit dieser Bevölkerungsgruppe (Klenk et al. 2010). Für August 2003 waren es laut dieser Studie > 400 zusätzliche Todesfälle, die ab 26°C täglicher Maximaltemperatur auftraten. Die Überschussmortalität war besonders hoch in der Altersklasse  $\geq 90$  Jahre und unter denjenigen, die besonders pflegebedürftig waren. Die Übersterblichkeit war an den Tagen 1-7 nach der Hitzeexposition mit 86 Todesfällen höher als am Tag der Exposition mit 3 Todesfällen. An den Tagen 8-14 war die Übersterblichkeit mit 258 Todesfällen am höchsten.

#### *Urbane Vergleichswerte*

Die Mortalität in den bayrischen Städten **München**, **Nürnberg** und **Augsburg** wurden im Zusammenhang mit der Temperaturänderung vom 90. zum 99. Perzentil<sup>9</sup> der zwei- und vierzehntägigen Durchschnittstemperatur von 1990 bis 2006 für das ganze Jahr analysiert (Breitner et al. 2014). In allen drei Städten wurde ein Anstieg für die natürliche Mortalität (8,1% in München, 15,4% in Nürnberg und 14,6% in Augsburg) wie auch für die kardiovaskuläre Mortalität (9,1% in München, 15,7% in Nürnberg und 8,7% in Augsburg) in Verbindung mit der Änderung der zweitägigen Durchschnittstemperatur vom 90. zum 99. Perzentil verzeichnet. Ein statistisch signifikanter Anstieg der Mortalität über die vierzehntägige Durchschnittstemperatur wurde für München (6,8%) und Nürnberg (12,1%) errechnet. In der Altersklasse  $\geq 85$  Jahren konnte für die zweitägige wie für die vierzehntägige Durchschnittstemperatur ein Zuwachs in natürlicher und kardiovaskulärer Mortalität mit der Temperaturerhöhung gezeigt werden. Für die Geschlechter getrennt wurden keine Auffälligkeiten gefunden. Absolute Zahlen sind in dieser Studie nicht gegeben und Rückschlüsse lassen sich nicht ziehen.

In **München**<sup>10</sup> wurde unter der älteren Bevölkerung > 65 Jahre von Juni bis August eine Zunahme der natürlichen täglichen Todesfälle von 7,6% errechnet (D'Ippoliti et al. 2010). Dies sind Änderungen um 3,9% bei den täglichen respiratorisch bedingten Todesfällen, 8,2% bei den kardiovaskulären und 14,7% bei den zerebrovaskulär<sup>11</sup> bedingten Todesursachen. Im Vergleich sind die Werte für **Mailand**<sup>12</sup> höher. Hier gab es eine Zunahme von 33,6% unter den natürlichen Todesfällen. Bei den spezifischen Todesursachen (respiratorisch, kardiovaskulär und zerebrovaskulär) waren Zunahmen von jeweils 92,5%, 39% und 50% zu verzeichnen. Schweizer Städte rangieren demnach möglicherweise zwischen diesen Werten.

Für **Turin** und **Mailand** wurden Grenztemperaturen für die tägliche Übersterblichkeit während des Sommers festgelegt (Baccini et al. 2008). In Turin wurden 1519 Tage von 1991 bis 1999 untersucht. Hier gab es im Durchschnitt 19,1 natürliche Todesfälle, 7,9 kardiovaskulär bedingte und 1 respiratorisch bedingten Todesfall pro Tag. Die Übersterblichkeit begann ab einer gefühlten täglichen Höchsttemperatur von 27°C zu steigen. Die Zunahme der natürlichen Mortalität betrug 3,3% mit jedem Grad Erwärmung der gefühlten täglichen Maximaltemperatur. In Mailand waren es 1769 Untersuchungstage von 1990 bis 2000. Die natürlichen Todesfälle pro Tag waren 26,3 und es gab 9,9 kardiovaskulär bedingte Todesfälle pro Tag sowie 1,7 respiratorisch bedingte. Hier stieg die natürliche Mortalität statistisch gesehen erst ab einer gefühlten täglichen Höchsttemperatur von 31,8°C an und zwar mit einer Rate von 4,3% mit jedem Grad Erwärmung der gefühlten täglichen Maximaltemperatur. Im Vergleich zu Zürich sind die Grenzwerttemperaturen in Turin und Mailand bei höheren Durchschnittstemperaturen im Sommer höher, was auf ein höheres Level der Hitzetoleranz in den italienischen Städten schließen lässt. Allerdings steigt in Zürich die Mortalität weniger schnell an.

---

<sup>9</sup> 90. und 99. Perzentile: München 20.3 °C, 25.2 °C. Nürnberg 20.0 °C, 25.2 °C. Augsburg 19.4 °C, 24.1 °C.

<sup>10</sup> 1992-2004

<sup>11</sup> Die Blutgefäße des Gehirns betreffend

<sup>12</sup> 1990-2003

Für **Grenoble** wurden für die Hitzeperiode vom 1. August bis zum 19. August 2003 148 Todesfälle registriert, was einer Übersterblichkeit von 28% entspricht verglichen mit dem Referenzzeitraum der Jahre 1999 bis 2002 (Vandentorren et al. 2004). Außerdem gab es 108 Todesfälle in Krankenhäusern, was einem Zuwachs der Mortalität von 24% gegenüber dem Jahr 2002 entspricht. In **Straßburg** waren es 253 Todesfälle und eine Übersterblichkeit von 51% verglichen mit dem Referenzzeitraum (Vandentorren et al. 2004). Bei den Todesfällen in Krankenhäusern in Straßburg waren es 157 Fälle und ein Zuwachs von 33% gegenüber dem Vorjahr. Grenoble ist temperaturmäßig ungefähr vergleichbar mit Lugano, allerdings sind die monatlichen Niederschläge in Lugano höher. Der Jahresgang der Temperatur in Straßburg ist ähnlich derer in Genf und Zürich. Allerdings gibt es in Straßburg weniger Niederschläge. Der Anteil des klimatischen Einflusses auf die Übersterblichkeiten ist also jeweils ähnlich. Andere unbekannte Faktoren werden wahrscheinlich zu abweichenden Werten für die drei Schweizer Städte führen.

In **Wien** gab es an Tagen während einer Hitzewelle (min. 3 Tage mit Maximaltemperatur  $\geq 30^{\circ}\text{C}$ ) von Mai bis September in den Jahren 1998 bis 2004 durchschnittlich 44 Todesfälle pro Tag gegenüber 40 Todesfällen an normalen Tagen (Hutter et al. 2007). Davon entfielen 35 Todesfälle an Hitzetagen auf die Altersklasse  $\geq 65$  Jahre. An Tagen außerhalb einer Hitzewelle waren es hingegen 32 Todesfälle. Wien ist temperaturmäßig mit wärmeren Städten in der Schweiz vergleichbar.

## 5. Zukunftsszenarien für die hitzebedingten Auswirkungen auf die Gesundheit

Zusätzlich zu den täglichen normalen Todesfällen lässt sich in der Schweiz eine Überschussmortalität als Folge von Hitzeereignissen in den Jahren 2003 und 2015 nachweisen. Insbesondere für den Sommer 2003 zeigte sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen erhöhten Umgebungstemperaturen und Exzessmortalität gegenüber den Vorjahren für die gesamte Schweiz, für die urbanen Räume und für die ältere Bevölkerung (Grize et al. 2005).

Um aus den gewonnenen Erkenntnissen der durchgeführten Hitze-Mortalitätsstudien Rückschlüsse auf die zukünftigen hitzebedingten Auswirkungen auf die Gesundheit schließen zu können, müssen eine Reihe von Unsicherheiten und Herausforderungen beachtet werden. Diese ergeben sich vor allem durch klimatische und demographische Daten.

- Die Zuordnung bzw. Zuschreibung von Hitzeereignissen zum Klimawandel stellt eine große Herausforderung dar, denn nicht alle Extremereignisse müssen durch den Klimawandel aufgetreten sein. Statistisch signifikante Aussagen lassen sich erst zu Mittelwerten und Trends über längere Zeiträume machen.
- Beim Vergleich der Ergebnisse bzw. bei der Bestimmung der Ursachen von hitzebezogener Mortalität in vorhandenen Studien muss die Verwendung unterschiedlicher Indikatoren zur Identifikation eines Hitzeereignisses (Tageshöchsttemperatur, Luftfeuchtigkeit, komplexere Hitzeindizes usw.) beachtet werden.
- Diese beobachteten meteorologischen Daten müssen statistisch mit beobachteten messbaren Gesundheitsfolgen und demographischen Aspekten des gleichen Zeitraums in Relation gebracht werden, damit Aussagen über den funktionalen Zusammenhang zwischen Hitzeereignis und Gesundheitsfolgen gemacht werden können. Diese Daten beinhalten weitere Unsicherheiten, welche in einen Vergleich bzw. eine Interpretation eingehen müssen.
- Es bestehen Unsicherheiten in den Mortalitätsdaten durch eventuelle Ungenauigkeit/Uneinheitlichkeit bei der Zuordnung der Todesursache.

- Untersuchungen sind teilweise nur für Teile der Bevölkerung, z.B. bestimmte Altersklassen, ursachenspezifische Mortalität, nach Geschlechtern getrennt, Stadtbevölkerung bzw. Gesamtbevölkerung, angefertigt.
- Durchführung der Studien an unterschiedlichen Orten mit lokalspezifischen klimatischen, demographischen, naturräumlichen, sozioökonomischen und bautypischen Rahmenbedingungen. Oder auch auf unterschiedlichen räumlichen Skalen (Stadt, Region, Land).

#### *Herausforderungen bei der Abschätzung der hitze-bedingten Überschussmortalität in der Zukunft*

Wie im Kapitel 3 dargestellt zeigen verschiedene Studien zum einen, wie Hitzewellen bereits in den letzten Jahrzehnten durch den anthropogenen Klimawandel an Häufigkeit und Intensität zugenommen haben und zum anderen, dass Häufigkeit und Intensität auch weiter zunehmen werden. Allerdings lässt sich diese Zunahme an Hitzeereignissen nicht einfach auf die Anzahl der zusätzlichen Todesfälle in Zukunft übertragen. Anpassungsmaßnahmen und physiologische Akklimatisierung des menschlichen Körpers an höhere Umgebungstemperaturen können vermutlich die zusätzlichen Todesfälle durch Hitze langfristig reduzieren. Während die kurzfristige Akklimatisierung in 3 bis 12 Tagen abgeschlossen ist, könnten solche langfristigen Akklimatisierungsprozesse an ungewohnte Umgebungstemperaturen mehrere Jahre dauern (Koppe et al. 2004). Ebenfalls schwer vorherzusehende Einflussfaktoren, wie die Bevölkerungszusammensetzung bezüglich der Altersklassen und auch der Gesundheitszustand der Bevölkerung oder die zukünftige Stadtstruktur spielen ebenfalls eine Rolle für die zukünftige Mortalität durch Hitzeereignisse. Die Unsicherheiten und Herausforderungen zur Abschätzung der Überschussmortalität durch klimawandelbedingte Hitzeereignisse in der Zukunft nehmen gegenüber den Unsicherheiten der gegenwärtigen Studien zu. Im Folgenden werden Herausforderungen in Bezug auf Daten zum zukünftigen Klima, der Demographie und Stadtstruktur, wie auch zur Anpassung und Akklimatisierung erläutert.

- Die Projektionen des Klimas unterliegen Unsicherheiten und zusätzlich werden die gemittelten Entwicklungen von natürlichen kurzfristigen Schwankungen überlagert.
- Die Indikatoren zur Identifikation eines Hitzeereignisses sollten für die Zukunft einheitlich sein, um die Vergleichbarkeit für Studien über die Zukunft zu gewährleisten.

Für die Abschätzung der hitzebedingten zusätzlichen Mortalität in der Zukunft kommen weitere Herausforderungen, welche auf eine Bandbreite von Annahmen gestützt werden müssen:

- Unsicherheit herrscht bei der Bevölkerungsprognose. Dies betrifft einmal die Gesamtgröße der Bevölkerung (nur für absolute Angaben der Mortalität relevant) als auch die Verteilung der Altersgruppen – beide Größen bestimmen die jeweilige hitzeexponierte Bevölkerungsgruppe. Eine mögliche Näherung ist die Annahme, dass sich die Bevölkerung sowohl in Gesamtgröße als auch in der Verteilung nicht ändert. Zumindest für die Gesamtgröße können andererseits die Bevölkerungsszenarien für die Schweiz insgesamt (Bundesamt für Statistik 2015) bzw. für die Kantone (Bundesamt für Statistik, 2016a) genutzt werden. Diese gliedern sich jeweils in ein „Referenzszenario“, bei dem die bisherige Entwicklung fortgeführt wird, in ein „Hohes Szenario“ und in ein „Tiefes Szenario“. Basierend auf einer Bevölkerungsgröße von 8,35 Mio. im Jahr 2015 werden in den drei Szenarien für 2045 für die gesamte Schweiz jeweils Änderungen in der Wohnbevölkerung von +22%, +32% und +12% erwartet.
- Eine Vielzahl an Studien zur zukünftigen hitzebezogenen Mortalität hat die Änderung der Bevölkerungsgröße und Zusammensetzung nicht miteinbezogen (Hayhoe et al. 2004; Knowlton et al. 2007; Doyon et al. 2008; Cheng et al. 2009; Baccini et al. 2011). Dies ist ebenfalls eine starke Einschränkung der Aussage-

fähigkeit der Ergebnisse, da eine Zunahme der Bevölkerung auch eine höhere Anzahl an Menschen bedeutet, welche den Klimafolgen ausgesetzt sind. Auch ein höherer Anteil an älteren Menschen, wie er in den meisten Ländern Europas wahrscheinlich sein wird, wird die Anzahl der vulnerablen Menschen erhöhen.

- Bezüglich des zukünftigen Anteils der Frauen für die Schweiz lässt sich die Studie von Kontis et al. (2017) anführen. Für das Jahr 2030 wird prognostiziert, dass 65-jährige Frauen in der Schweiz eine zusätzliche Lebenserwartung von 24,6 Jahren haben werden und Männer 21,5 Jahre. Da Frauen auch in Zukunft statistisch gesehen länger leben werden, stellen Frauen im hohen Alter bereits aus diesem Grund eine Risikogruppe dar.
- Weiter ist die Entwicklung der Stadtstruktur abzuschätzen. Dies wird teilweise mit der Bevölkerungsentwicklung korrelieren, aber auch von der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen abhängen. Der aus der Stadtstruktur resultierende urbane Hitzeinseleffekt muss noch auf die klimatische Projektion der Modelle aufaddiert werden. Eine mögliche Annahme könnte hier einerseits eine Stadtstruktur ohne Änderungen sein. Andererseits sind vielerorts Verdichtungskonzepte geplant, die beispielsweise der Zersiedelung des ländlichen Raumes entgegenwirken sollen. Für die Stadt Zürich beispielsweise wurden für 2030 Bevölkerungszahlen für ein unteres, mittleres und oberes Szenario errechnet (Stadt Zürich 2016b):

<b>2015</b>	<b>2030 unteres Szenario</b>	<b>2030 mittleres Szenario</b>	<b>2030 oberes Szenario</b>
410 404	469 800	494 700	519 600

Dabei steigt der Anteil der Bevölkerung an der Gesamtbevölkerung Zürichs laut Stadt Zürich (2016a) in den Altersklassen 60-69 von 8,1% auf 9,2% an, die Altersklasse 70-79 wird ebenfalls einen leichten Zuwachs um 0.2 Prozentpunkte erfahren. Für die Altersklasse 80+ mit ihrem Anteil von 5,1% an der Gesamtbevölkerung Zürichs wird keine Änderung prognostiziert (Stadt Zürich 2016a).

Für die Stadt Bern steigt die Wohnbevölkerung ebenfalls von 140 567 Einwohnern im Jahr 2015 auf 144 715 im Jahr 2030 an. Der Anteil der Bevölkerung in der Altersklasse 65-79 Jahre wird vermutlich von 10,9 % auf 11,6 % steigen, während es einen geringen Abfall von 5,7 % auf 5,3 % in der Altersklasse 80+ geben wird (Stadt Bern 2017).

Herausforderungen, die die Anpassung und die Akklimatisierung betreffen, sind teils in der Literatur noch nicht hinreichend geklärt.

- Inwieweit die zukünftige Gesellschaft aus bereits eingetretenen Hitzeereignissen lernen und entsprechende Anpassungsmaßnahmen implementieren wird, ist noch unklar. Laut Fouillet et al. (2008) fiel die tatsächliche Übersterblichkeit in Frankreich im Jahr 2006 wesentlich geringer aus, als der von einem statistischen Modell berechnete Erwartungswert. Nach der Hitzewelle 2003 wurden in Frankreich Anpassungsmaßnahmen eingeführt, was möglicherweise die geringe Übersterblichkeit 2006 erklärt. Allerdings gab es 1978 bis 2003 einen generellen negativen Trend in der Übersterblichkeit, der sich auch bis 2006 mit und ohne Anpassungsmaßnahmen fortgesetzt hätte (Fouillet et al. 2008). Ähnliche Beobachtungen gibt es für Italien (Schifano et al. 2012), wo die Abnahme der Sterblichkeit durch Hitze eher an städtischen Hitzeplänen lag, als am nationalen Hitzeplan. Diese Ergebnisse sind jedoch vorsichtig zu interpretieren. In spanischen Städten wurde ebenfalls eine Abnahme der Überschussmortalität errechnet, allerdings vor der Einführung des nationalen Hitzeplans (Linares et al. 2015). Möglicherweise sind Hitzepläne auf kommunaler Ebene effektiver.
- Berücksichtigung finden sollte u.a. auch, wie sich die Gesellschaft und auch der einzelne Mensch an neue klimatische Bedingungen anpassen können und wieviel Zeit dafür notwendig ist. Diese Anpassung kann

damit entweder außer Acht gelassen werden, oder es kann eine plausible Annahme über die Akklimatisierung gewählt werden, wie beispielsweise der R-Wert nach Ballester et al. (2011). Mögliche Näherungen dafür sind  $R=0$  und  $R=1$  als Extremfälle.  $R=0$  entspräche einer Entwicklung ohne jegliche Akklimatisierung der Bevölkerung. Ballester et al. (2011) argumentieren für die Verwendung eines relativ kleinen R-Wertes, solange nicht umfangreiche Anpassungsmaßnahmen installiert sind. Das andere Extrem wäre  $R = 1$ , das heißt eine unmittelbare oder verzögerungsfreie Akklimatisierung an veränderte klimatische Bedingungen. Cheng et al. (2009) schätzen die Akklimatisierung über die Unterschiede in der hitzebezogenen Sterblichkeit im heißesten und kältesten Sommer der Region (South-central Canada) in der Vergangenheit ab und kommen auf eine Rate von 40%. Das heißt, die Auswirkungen des Klimawandels auf die hitzebezogene Sterblichkeit sind um 40% reduziert. Kalkstein & Greene (1997) verwenden 20-40%, Dessai (2003) 40-54%, Hayhoe et al. (2004) 20-25% und Knowlton et al. (2007) ebenfalls 25%.

#### *Quantitative Aussagen zu Morbidität und Mortalität und Hitze für die Zukunft*

Spezifisch für die Schweiz finden sich sehr wenige Projektionen für zukünftige Mortalität. Baccini et al. (2011) sehen einen Anstieg der Mortalität durch Hitze in **Zürich** für das Jahr 2030 im Vergleich zu 1990 bis 2000. Während der Referenzperiode traten pro Jahr 29 zusätzliche Todesfälle durch Hitze auf. Für 2030 wird unter dem niedrigen IPCC Emissionsszenario B1 eine Überschussmortalität von 32 Toten durch Hitze erwartet. Für das mittlere Emissionsszenario A1B sind es bereits 35 und für das hohe Emissionsszenario A2 werden 37 zusätzliche Todesfälle durch Hitze geschätzt. Vergleichswerte aus **Mailand** und **Turin** können hier ebenfalls aus Baccini et al. (2011) herangezogen werden. Für Mailand wurde eine Überschussmortalität von 95 und für Turin von 121 pro Jahr während der Referenzperiode 1990 bis 2000 errechnet. Für beide Städte wird ebenfalls eine Zunahme der Überschussmortalität im Jahr 2030 erwartet. Unter dem niedrigen Emissionsszenario B1 sind es für Mailand 116 und für Turin 136 zusätzliche Todesfälle. Das mittlere Emissionsszenario A1B ergibt Übersterblichkeiten von 130 für Mailand und von 148 für Turin. Die höchsten Übersterblichkeiten werden im Fall des hohen Emissionsszenarios A2 geschätzt, dies sind 139 für Mailand und 156 für Turin.

Daraus lässt sich schließen, dass in der Schweiz und in den angrenzenden Regionen in der näheren Zukunft eine Zunahme der Überschussmortalität pro Jahr zu erwarten ist. Aus einem Überblicksartikel von Huang et al (2011) geht hervor, dass die überwiegende Zahl der Studien zur zukünftigen hitzebezogenen Mortalität diese Zunahme für weitere Städte außerhalb Europas bestätigen. So nehmen beispielsweise Kalkstein & Greene (1997) nur einen geringen Effekt für die Kältetoten und eine Zunahme von 70 bis über 100% (je nach Klimamodell) für die Sommermortalität an (Betrachtung für vier US-Städte). Doyon et al. (2008) und Cheng et al. (2009) analysieren die zukünftige Mortalität durch Hitze in verschiedenen kanadischen Städten. Diese weisen ein feuchtes und überwiegend kühles Kontinentalklima mit der Köppen-Geiger-Klimaklassifikation Dfb auf (abgesehen von der Stadt Windsor mit Dfa) und ähneln damit, zumindest klimatologisch, Regionen in der Schweiz (siehe Abschnitt 3.2). Für Montreal, Quebec und Saguenay analysieren Doyon et al. (2008) die saisonale Entwicklungen in der Sterblichkeit und finden eine signifikante Zunahme für den Sommer, eine signifikante Abnahme für den Herbst und geringe, nicht signifikante Änderungen für Frühling und Winter. Die projizierte jährliche Sterblichkeit wird dominiert von der sommerlichen Zunahme. Für Ottawa, Montreal und Windsor ermitteln Cheng et al. (2009) für die hitzebezogene Sterblichkeit eine Verdoppelung bis in die 2050ziger und eine Verdreifachung bis in die 2080ziger Jahre. Takahashi et al. (2007) untersuchen die Entwicklung der hitzebedingten Übersterblichkeit weltweit und finden auf Länderebene Änderungsraten von +100 bis +1000%. Takahashi et al. nehmen jedoch an, dass es zu keinerlei Anpassung, keiner Akklimatisierung der Bevölkerung und keiner Änderung in der Bevölkerungsdichte kommen wird. Dadurch können die Ergebnisse lediglich eine obere Abschätzung ergeben.

Ballester et al. (2011) beziehen neben hitzebedingter Mortalität auch die Mortalität durch Kälte sowie die Akklimatisierung der Bevölkerung an höhere Umgebungstemperaturen mit ein. Diese Studie ist auf die Europäischen NUTS<sup>13</sup> Regionen, also den sieben Großregionen der Schweiz entsprechend, ausgelegt. Die Änderung der Sterberaten wird einmal ohne und einmal mit Berücksichtigung der Änderung der Luftfeuchte im Sommer betrachtet. In beiden Fällen wird die Gesamtmortalität am Ende des Jahrhunderts in den südlichen Regionen Europas steigen und damit die sinkende Mortalität durch seltenere Kälteereignisse kompensieren. Ebenfalls unabhängig von der Entwicklung der Luftfeuchte wird die Zunahme der Mortalität durch Hitze bis zum Ende des Jahrhunderts (2070-2100) in etwa zur Kompensation der Mortalität durch Kälte in der Schweiz gegenüber den Jahren 1980-2010 führen. Die Studie von Tol (2002) geht davon aus, dass die Anzahl der Kältetoten in Europa stärker zurückgehen wird, als die Anzahl der Hitzetoten zunimmt. Eine Studie, für welche jedoch von Huber et al. (2017) Fehler in der Bilanzierung von Mortalität durch Hitze und Kälte nachgewiesen werden konnten.

Die Studie von Forzieri et al. (2017) erfuhr große mediale Aufmerksamkeit nachdem darin eine Zunahme der Opfer von Extremwetter in Europa um den Faktor 50 prognostiziert wurde. Zum überwiegenden Teil handelt es sich dabei um Hitzeopfer. Die sehr hohe Änderungsrate basiert auf der Verwendung eines relativ „extremen“ Hitzeindicators (100-jähriges Ereignis). Je extremer, also seltener das indizierte Ereignis, desto stärker die von den Klimamodellen projizierte Änderung. Gasparrini et al. (2015) kritisieren diese Beschränkung der Analyse der hitzebezogenen Mortalität auf solche sehr extremen Ereignisse, da die Mehrzahl der Todesfälle durch Hitze bereits bei moderat warmen Temperaturen auftreten. Moderatere Indizes jedoch, weisen in den Projektionen der Klimamodelle deutlich geringere Änderungsraten auf.

#### *Abschätzung der zukünftigen Mortalität durch Hitze für die Schweiz*

Nach der Wahl bestimmter Annahmen zum Klima, der Bevölkerungsentwicklung und Zusammensetzung der Altersstruktur, der zukünftigen Stadtstruktur sowie zu Anpassung und Akklimatisierung lassen sich Abschätzungen über die zukünftige Mortalität durch Hitze in der Schweiz erstellen.

Aus Abschnitt 3.4 lässt sich entnehmen, dass die Projektionen (business-as-usual-Pfad) für die Entwicklung der Häufigkeit von Hitzeereignissen bis zum Ende des Jahrhunderts sich im Bereich vom Faktor 2 bis Faktor 5 bewegen (Beniston 2004 und Zubler et al. 2014). Unter der starken Annahme, dass die Bevölkerung unverändert bleibt (sowohl in der Gesamtgröße als auch in der Verteilung), die Stadtstrukturen unverändert bleiben (Urbanisierungsgrad stabil), ergibt sich für die drei Akklimatisierungswerte  $R=0$ ,  $R=0.5$  und  $R=1$  folgende Änderungsrate für die hitzebedingte Mortalität in der Schweiz:

- $R=0$ : Regionsabhängige Erhöhung um Faktor 2 bis 5 in der hitzebedingten Mortalität
- $R=0.5$ : Regionsabhängige Erhöhung um 50% bis 200% in der hitzebedingten Mortalität
- $R=1$ : Die gesamte Zunahme an Hitzeereignissen kann durch autonome Anpassung ausgeglichen werden.

Zusammenfassend würde dann die gesamte Bandbreite möglicher Pfade der Änderung der hitzebedingten Mortalität bis zum Ende des Jahrhunderts unter den genannten Bedingungen zwischen gleichbleibend und dem Faktor 5 liegen, wobei die äußeren Grenzen, welche sich aus  $R=0$  und  $R=1$  ergeben, sehr unwahrscheinlich sind. Wahrscheinlicher ist eine Akklimatisierung von etwa 50%, welche je nach Region eine Zunahme von 50% bis 200% in der hitzebedingten Sterblichkeit mit sich bringen würde. Wir nehmen im Vergleich zur Lite-

---

<sup>13</sup> Administrative Einheiten in der EU. Entsprechen in Deutschland den Regierungsbezirken (<http://ec.europa.eu/eurostat/web/nuts/national-structures-eu>)

ratur einen relativ hohen Wert für die Akklimatisierung an – da wir eine starke Anpassungsfähigkeit der Gesellschaft (insbesondere eine mit hohem sozioökonomischen Level) für sehr wahrscheinlich halten. Weiterhin deuten viele Beobachtungen (unterschiedliche Grenztemperatur in Nord- und Südeuropa; Baccini et al. 2008) auf eine starke Anpassungsfähigkeit des Menschen hin. Diese wird teilweise erst mit zeitlicher Verzögerung einsetzen, jedoch bis zum Ende des Jahrhunderts kontinuierlich voranschreiten.

## Referenzen

- Abrutzky, R., Dawidowski, L., Matus, P., & Romero Lankao, P. (2012). Health Effects of Climate and Air Pollution in Buenos Aires: A First Time Series Analysis. *Journal of Environmental Protection*, 03(03), 262–271. doi:10.4236/jep.2012.33033
- Akademien der Wissenschaften Schweiz. (2016). Brennpunkt Klima Schweiz. Grundlagen, Folgen, Perspektiven. *Swiss Academies Reports*, 11(5).
- Akbari, H., Menon, S., & Rosenfeld, A. (2008). Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO<sub>2</sub>. *Climatic Change*, 94(3-4), 275–286. doi:10.1007/s10584-008-9515-9
- Alberts SC, Archie EA, Gesquiere LR, et al. The Male-Female Health-Survival Paradox: A Comparative Perspective on Sex Differences in Aging and Mortality. In: Committee on Population; Division of Behavioral and Social Sciences and Education; National Research Council; Weinstein M, Lane MA, editors. *Sociality, Hierarchy, Health: Comparative Biodemography: A Collection of Papers*. Washington (DC): National Academies Press (US); 2014 Sep 22. 15. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK242444/>
- Almeida, S. P., Casimiro, E., & Calheiros, J. (2010). Effects of apparent temperature on daily mortality in Lisbon and Oporto, Portugal. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 9, 12. doi:10.1186/1476-069X-9-12
- Anderson, G. B., & Bell, M. L. (2009). Weather-related Mortality: How Heat, Cold, and Heat Waves Affect Mortality in the United States. *Epidemiology*, 20(2), 205–213. doi:10.1097/EDE.0b013e318190ee08
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1–26. Retrieved from <http://doi.wiley.com/10.1002/joc.859>
- Åström, D. O., Forsberg, B., & Rocklöv, J. (2011). Heat wave impact on morbidity and mortality in the elderly population: a review of recent studies. *Maturitas*, 69(2), 99–105. doi:10.1016/j.maturitas.2011.03.008
- Baccini, M., Kosatsky, T., Analitis, A., Anderson, H. R., D’Ovidio, M., Menne, B., ... Biggeri, A. (2011). Impact of heat on mortality in 15 European cities: Attributable deaths under different weather scenarios. *J. Epidemiol. Community Health*, 65(1), 64–70. doi:10.1136/jech.2008.085639
- Baccini, M., Biggeri, A., Accetta, G., Kosatsky, T., Katsouyanni, K., Analitis, A., ... Michelozzi, P. (2008). Heat effects on Mortality in 15 European Cities. *Epidemiology*, 19(4), 711–719. doi:10.1097/EDE.0b013e318176bfcd
- Bader, S. (2004). Arbeitsbericht MeteoSchweiz. *Arbeitsbericht MeteoSchweiz*, 200, 1–25.
- Ballester, J., Robine, J.-M., Herrmann, F. R., & Rodó, X. (2011). Long-term projections and acclimatization

- scenarios of temperature-related mortality in Europe. *Nature Communications*, 2(may), 358. doi:10.1038/ncomms1360
- Barriopedro, D., Fischer, E. M., Luterbacher, J., Trigo, R. M., & García-Herrera, R. (2011). The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. *Science*, 332(6026), 220–224. doi:10.1126/science.1201224
- Basu, R., Ostro, B. D., California Energy Commission., California Environmental Protection Agency., & California Climate Change Center. (2009). A multi-county analysis identifying the vulnerable populations for mortality associated with high ambient temperature in California : final paper, (August 2009), vi, 11 p.
- Bell, M. L., O'Neill, M. S., Ranjit, N., Borja-Aburto, V. H., Cifuentes, L. a, & Gouveia, N. C. (2008). Vulnerability to heat-related mortality in Latin America: a case-crossover study in Sao Paulo, Brazil, Santiago, Chile and Mexico City, Mexico. *International Journal of Epidemiology*, 37(4), 796–804. doi:10.1093/ije/dyn094
- Beniston, M. (2004). The 2003 heat wave in Europe: A shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. *Geophysical Research Letters*, 31(2), L02202. doi:10.1029/2003GL018857
- Beniston, M., & Diaz, H. F. (2004). The 2003 heat wave as an example of summers in a greenhouse climate? Observations and climate model simulations for Basel, Switzerland. *Global and Planetary Change*, 44(1-4), 73–81. doi:10.1016/j.gloplacha.2004.06.006
- Beniston, M., & Goyette, S. (2007). Changes in variability and persistence of climate in Switzerland: Exploring 20th century observations and 21st century simulations. *Global and Planetary Change*, 57(1-2), 1–15. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.004
- Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., & Tinz, B. (2011). Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 515–535. doi:10.1007/s00484-011-0453-2
- Breitner, S., Wolf, K., Devlin, R. B., Diaz-Sanchez, D., Peters, A., & Schneider, A. (2014). Short-term effects of air temperature on mortality and effect modification by air pollution in three cities of Bavaria, Germany: A time-series analysis. *Sci. Total Environ.*, 485-486(1), 49–61. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.03.048
- Bundesamt für Statistik. (2015). *Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung der Schweiz*. Neuchâtel. Retrieved from <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bevoelkerung/zukuenftige-entwicklung/schweiz-szenarien.html>
- Bundesamt für Statistik. (2016a). *Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung der Kantone 2015-2045*. Neuchâtel. Retrieved from <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bevoelkerung/zukuenftige-entwicklung/kantonale-szenarien.html>
- Bundesamt für Statistik. (2016b). *Lebenserwartung*. Neuchâtel. Retrieved from <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bevoelkerung/geburtentodesfaelle/lebenserwartung.html>
- Cerutti, B., Tereanu, C., Domenighetti, G., Cantoni, E., Gaia, M., Bolgiani, I., ... Cassis, I. (2006). Temperature related mortality and ambulance service interventions during the heat waves of 2003 in Ticino (Switzer-

- land). *Sozial- Und Präventivmedizin SPM*, 51(4), 185–193. doi:10.1007/s00038-006-0026-z
- CH2011. (2011). *Swiss Climate Change Scenarios. Change*. doi:10.3929/ethz-a-006720559
- Cheng, C. S., Campbell, M., Li, Q., Li, G., Auld, H., Day, N., ... Lin, H. (2009). Differential and combined impacts of extreme temperatures and air pollution on human mortality in south-central Canada. Part II: Future estimates. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2(4), 223–235. doi:10.1007/s11869-009-0056-9
- Chiriaco, M., Bastin, S., Yiou, P., Haeffelin, M., Dupont, J. C., & Stéfanon, M. (2014). European heatwave in July 2006: Observations and modeling showing how local processes amplify conducive large-scale conditions. *Geophysical Research Letters*, 41(15), 5644–5652. doi:10.1002/2014GL060205
- Christidis, N., Jones, G. S., & Stott, P. A. (2015). Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave. *Nature Climate Change*, 5, 46–50. doi:10.1038/NCLIMATE2468
- Climate-data.org. (2016). *Klima: Schweiz*. Retrieved November 29, 2016, from <http://de.climate-data.org/country/221/>
- Coumou, D., Robinson, A., & Rahmstorf, S. (2013). Global increase in record-breaking monthly-mean temperatures. *Climatic Change*, 118(3-4), 771–782. doi:10.1007/s10584-012-0668-1
- Cruz, R. V., David, C. P., David, L., Espaldon, M. V., Lansigan, F., Lorenzo, F. M., ... Uy, N. (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK.
- Curriero, F. C., Heiner, K. S., Samet, J. M., Zeger, S. L., Strug, L., & Patz, J. a. (2002). Temperature and mortality in 11 cities of the eastern United States. *American Journal of Epidemiology*, 155(1), 80–7.
- D’Ippoliti, D., Michelozzi, P., Marino, C., De’Donato, F., Menne, B., Katsouyanni, K., ... Perucci, C. A. (2010). The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: results from the EuroHEAT project. *Environmental Health : A Global Access Science Source*, 9(1), 37. doi:10.1186/1476-069X-9-37
- de’ Donato, F. K., Leone, M., Scortichini, M., De Sario, M., Katsouyanni, K., Lanki, T., ... Michelozzi, P. (2015). Changes in the effect of heat on mortality in the last 20 years in nine European cities. Results from the PHASE project. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(12), 15567–15583. doi:10.3390/ijerph121215006
- Della-Marta, P. M., Haylock, M. R., Luterbacher, J., & Wanner, H. (2007). Doubled length of western European summer heat waves since 1880. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112(15), 1–12. doi:10.1029/2007JD008510
- Dessai, S. (2003). Heat stress and mortality in Lisbon Part II. An assessment of the potential impacts of climate change. *Int J Biometeorol*. doi:10.1007/s00484-003-0180-4
- Dole, R., Hoerling, M., Perlwitz, J., & Eischeid, J. (2011). Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? - Dole - 2011 - *Geophysical Research Letters* - Wiley Online Library. *Geophysical Research Letters*, 38, L12101. doi:10.1029/2010GL046582
- Retrieved from [http://www.agu.org/journals/gl/gl1105/2010GL046582/\nfile:///Users/lewiss1/Library/Application Support/Papers2/Articles/2011/Dole/2011 Dole.pdf\npapers2://publication/uuid/AB844252-1733-43A7-A660-4702C4451088](http://www.agu.org/journals/gl/gl1105/2010GL046582/\nfile:///Users/lewiss1/Library/Application%20Support/Papers2/Articles/2011/Dole/2011%20Dole.pdf\npapers2://publication/uuid/AB844252-1733-43A7-A660-4702C4451088)

- Dombois, O. T., & Braun-Fahrländer, C. (2004). Gesundheitliche Auswirkungen der Klimaänderung mit Relevanz für die Schweiz, (November), 85.
- Donat, M. G., Alexander, L. V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Dunn, R. J. H., ... Kitching, S. (2013). Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. doi:10.1002/jgrd.50150
- Doyon, B., Belanger, D., & Gosselin, P. (2008). The potential impact of climate change on annual and seasonal mortality for three cities in Quebec, Canada. *Int J Health Geogr*. doi:10.1186/1476-072X-7-23
- Ellis, F. P. (1972). Mortality from heat illness and heat-aggravated illness in the United States. *Environmental Research*, 5, 1–58.
- Fischer, E. M., Beyerle, U., & Knutti, R. (2013). Robust spatially aggregated projections of climate extremes. *Nature Climate Change*. doi:10.1038/nclimate2051
- Fischer, E. M., & Knutti, R. (2015). Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change*, 5(6), 560–564. doi:10.1038/nclimate2617
- Fischer, E. M., Oleson, K. W., & Lawrence, D. M. (2012). Contrasting urban and rural heat stress responses to climate change. *Geophysical Research Letters*, 39(3), 1–8. doi:10.1029/2011GL050576
- Fischer, E. M., & Schär, C. (2009). Future changes in daily summer temperature variability: Driving processes and role for temperature extremes. *Climate Dynamics*. doi:10.1007/s00382-008-0473-8
- Fischer, E. M., Seneviratne, S. I., Vidale, P. L., Lüthi, D., & Schär, C. (2007). Soil moisture-atmosphere interactions during the 2003 European summer heat wave. *Journal of Climate*, 20(20), 5081–5099. doi:10.1175/JCLI4288.1
- Fischer, E. M., & Schär, C. (2010). Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nature Geoscience*, 3(June), 398–403. doi:10.1038/NGEO866
- Fischer, E. M. (2017). Die Schweiz ist besonders stark betroffen. Tagesanzeiger. Retrieved from <https://www.tagesanzeiger.ch/wissen/natur/bereits-eine-erwaermung-um-ein-halbes-grad-hat-folgen/story/30341213>
- Forzieri, G., Cescatti, A., e Silva, F. B., & Feyen, L. (2017). Increasing risk over time of weather-related hazards to the European population: a data-driven prognostic study. *The Lancet Planetary Health*, 1(5), e200–e208. doi:10.1016/S2542-5196(17)30082-7
- Fouillet, a, Rey, G., Laurent, F., Pavillon, G., Bellec, S., Guihenneuc-Jouyaux, C., ... Hémon, D. (2006). Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 80(1), 16–24. doi:10.1007/s00420-006-0089-4
- Fouillet, A., Rey, G., Wagner, V., Laaidi, K., Empereur-Bissonnet, P., Le Tertre, A., ... Hamon, D. (2008). Has the impact of heat waves on mortality changed in France since the European heat wave of summer 2003? A study of the 2006 heat wave. *International Journal of Epidemiology*, 37, 309–317.
- Gago, E. J., J. Roldan, Pacheco-Torres, R., & Ordóñez, J. (2013). The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 749–758.

- Gasparrini, A., Guo, Y., Hashizume, M., Kinney, P. L., Petkova, E. P., & Lavigne, E. (2015). Temporal Variation in Heat – Mortality Associations : A Multicountry Study, *1200*(11), 1200–1207.
- García-Herrera, R., Díaz, J., Trigo, R. M., Luterbacher, J., & Fischer, E. M. (2010). A Review of the European Summer Heat Wave of 2003. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *40*(4), 267–306. doi:10.1080/10643380802238137
- Gouveia, N., Hajat, S., & Armstrong, B. G. (2003). Socioeconomic differentials in the temperature-mortality relationship in Sao Paulo, Brazil. *International Journal of Epidemiology*, *32*, 390–397. doi:10.1093/ije/dyg077
- Green, H. K., Andrews, N., Armstrong, B., Bickler, G., & Pebody, R. (2016). Mortality during the 2013 heat-wave in England - How did it compare to previous heatwaves? A retrospective observational study. *Environmental Research*, *147*(May), 343–349. doi:10.1016/j.envres.2016.02.028
- Grize, L., Huss, A., Thommen, O., Schindler, C., & Braun-Fahrländer, C. (2005). Heat wave 2003 and mortality in Switzerland. *Swiss Medical Weekly*, *135*(13-14), 200–205. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15909237>
- Guo, Y., Barnett, A. G., & Tong, S. (2013). Spatiotemporal model or time series model for assessing city-wide temperature effects on mortality? *Environ Res*, *120*, 55–62. doi:10.1016/j.envres.2012.09.001
- Hajat, S., & Kosatky, T. (2010). Heat-related mortality: a review and exploration of heterogeneity. *Journal of Epidemiology and Community Health*, *64*(9), 753–60. doi:10.1136/jech.2009.087999
- Hanna, J. M., & Brown, D. E. (1983). Human Heat Tolerance: An Anthropological Perspective. *Annual Review of Anthropology*, *12*(1), 259–284. doi:10.1146/annurev.an.12.100183.001355
- Harlan, S. L., Brazel, A. J., Prashad, L., Stefanov, W. L., & Larsen, L. (2006). Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress. *Social Science Medicine*, *63*(11), 2847–2863. doi:10.1016/j.socscimed.2006.07.030
- Hayhoe, K., Cayan, D., Field, C. B., Frumhoff, P. C., Maurer, E. P., Miller, N. L., ... Verville, J. H. (2004). Emissions pathways, climate change, and impacts on California. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. doi:10.1073/pnas.0404500101
- Haylock, M. R., Hofstra, N., Klein Tank, A. M. G., Klok, E. J., Jones, P. D., & New, M. (2008). A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *113*(20).
- Huang, C., Barnett, A. G., & Wang, X. (2011). Projecting future heat-related mortality under climate change scenarios: a systematic review. *Environmental Health*, (12), 1681–1690. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3261978/>
- Huber, V., Ibarreta, D., & Frieler, K. (2017). Cold- and heat-related mortality: A cautionary note on current damage functions with net benefits from climate change. *Climatic Change*, *142*(3-4), 407–418. doi:10.1007/s10584-017-1956-6
- Hutter, H. P., Moshhammer, H., Wallner, P., Leitner, B., & Kundi, M. (2007). Heatwaves in Vienna: Effects on mortality. *Wien. Klin. Wochenschr.*, *119*(7-8), 223–227. doi:10.1007/s00508-006-0742-7

- Iñiguez, C., Ballester, F., Ferrandiz, J., Pérez-Hoyos, S., Sáez, M., López, A., & Tempro-Emecas. (2010). Relation between temperature and mortality in thirteen Spanish cities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(8), 3196–3210. doi:10.3390/ijerph7083196
- IPCC. (2007). Climate Change 2007 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. *Science*, (October 2009), 1009. doi:volume
- IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Text* (Vol. 1). Retrieved from [http://www.ipcc-wg2.gov/SREX/images/uploads/SREX-All\\_FINAL.pdf](http://www.ipcc-wg2.gov/SREX/images/uploads/SREX-All_FINAL.pdf)
- IPCC. (2013). *Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. (D. L. Hartmann, A. M. G. K. Tank, & M. Rusticucci, Eds.) IPCC (Vol. AR5). Cambridge University Press.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, ... L. L. White, Eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Kalkstein, L. S., & Greene, J. S. (1997). An evaluation of climate/mortality relationships in large U.S. cities and the possible impacts of a climate change. *Environmental Health Perspectives*. doi:10.1289/ehp.9710584
- Keatinge, W. R., & Donaldson, G. C. (2006). Heat acclimatization and sunshine cause false indications of mortality due to ozone. *Environmental Research*, 100(3), 387–93. doi:10.1016/j.envres.2005.08.012
- Keeling, C. D., Bacastow, R. B., Bainbridge, A. E., Ekdahl Jr., C. A., Guenther, P. R., Waterman, L. S., & Chin, J. F. S. (1976). Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. *Tellus*. doi:10.3402/tellusa.v28i6.11322
- Kenney, W. L. (1985). A review of comparative responses of men and women to heat stress. *Environmental Research*, 37(1), 1–11.
- Kim, H., Mph, J. H., & Park, J. (2006). High Temperature, heat index, and mortality in 6 major cities in South Korea. *Archives of Environmental and Occupational Health*, 61(6), 37–41.
- Kim, Y.-M., Kim, S., Cheong, H.-K., & Kim, E.-H. (2011). Comparison of temperature indexes for the impact assessment of heat stress on heat-related mortality. *Environmental Health and Toxicology*, 26, e2011009.
- Klenk, J., Becker, C., & Rapp, K. (2010). Heat-related mortality in residents of nursing homes. *Age Ageing*, 39(2), 245–252. doi:10.1093/ageing/afp248
- Knowlton, K., Lynn, B., Goldberg, R. A., Rosenzweig, C., Hogrefe, C., Rosenthal, J. K., & Kinney, P. L. (2007). Projecting heat-related mortality impacts under a changing climate in the New York City region. *American Journal of Public Health*. doi:10.2105/AJPH.2006.102947
- Kontis, Vasilis et al. (2017): Future life expectancy in 35 industrialised countries: projections with a Bayesian model ensemble. *The Lancet*, Volume 389 , Issue 10076 , 1323 – 1335.
- Koppe, C., Kovats, S., Jendritzky, G., & Menne, B. (2004). *Heat-waves: risks and responses*.

- Kovats, R. S., & Hajat, S. (2008). Heat Stress and Public Health : A Critical Review. *Annual Reviews of Public Health*, 29(October), 41–55. doi:10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843
- Kovats, R. S., & Kristie, L. E. (2006). Heatwaves and public health in Europe. *European Journal of Public Health*, 16(6), 592–9. doi:10.1093/eurpub/ckl049
- Kyselý, J. (2004). Mortality and displaced mortality during heat waves in the Czech Republic. *International Journal of Biometeorology*, 49(2), 91–97. doi:10.1007/s00484-004-0218-2
- Linares, C., Sánchez, R., Mirón, I. J., & D'iaz, J. (2015). Has there been a decrease in mortality due to heat waves in Spain? Findings from a multicity case study. *J. Integr. Environ. Sci.*, 12(2), 153–163. doi:10.1080/1943815X.2015.1062032
- Lorenz, R., Jaeger, E. B., & Seneviratne, S. I. (2010). Persistence of heat waves and its link to soil moisture memory. *Geophysical Research Letters*, 37(9), 1–5. doi:10.1029/2010GL042764
- Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., Grosjean, M., Wanner, H., Dartois, E., ... Jones, a P. (2004). European Seasonal and Annual Temperature Variability, Trends, and Extremes Since 1500. *Science*, 303(5663), 1499–1503. doi:10.1126/science.1093877
- Ma, W., Zeng, W., Zhou, M., Wang, L., Rutherford, S., Lin, H., ... Chu, C. (2015). The short-term effect of heat waves on mortality and its modifiers in China: An analysis from 66 communities. *Environment International*, 75, 103–109. doi:10.1016/j.envint.2014.11.004
- Mackenbach, J. P., Borst, V., & Schols, J. M. G. A. (1997). Heat-related mortality among nursing-home patients. *Lancet*, 349, 1297–1298.
- McCarthy, M. P., Best, M. J., & Betts, R. A. (2010). Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophysical Research Letters*, 37(9), 1–5. doi:10.1029/2010GL042845
- McGeehin M. A. und Mirabelli, M. (2001). The potential impacts of climate variability and change on temperature-related morbidity and mortality in the United States. *Environmental Health Perspectives*, 109, 185–189.
- McMichael, A. J., Woodruff, R. E., & Hales, S. (2006). Climate change and human health: present and future risks. *Lancet*, 367(9513), 859–69. doi:10.1016/S0140-6736(06)68079-3
- Medina-Ramón, M., & Schwartz, J. (2007). Temperature, temperature extremes, and mortality: a study of acclimatisation and effect modification in 50 US cities. *Occup Environ Med*, 64(12), 827–33. doi:10.1136/oem.2007.033175
- Meehl, G. A., & Tebaldi, C. (2004). More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305(5686), 994–997. doi:10.1126/science.1098704
- MeteoSchweiz. (2015). *Klimabulletin Sommer 2015*. Zürich.
- MeteoSchweiz. (2016). *Klima der Schweiz. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz*. Retrieved November 29, 2016, from <http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/vergangenheit.html>
- Michelozzi, P., Kirchmayer, U., Katsouyanni, K., Biggeri, A., McGregor, G., Menne, B., ... Kosatsky, T. (2007).

Assessment and prevention of acute health effects of weather conditions in Europe, the PHEWE project: background, objectives, design. *Env. Heal.*, 6(12). doi:10.1186/1476-069X-6-12

- Muthers, S., Matzarakis, A., & Koch, E. (2010). Climate Change and Mortality in Vienna - A Human Biometeorological Analysis Based on Regional Climate Modeling. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(7), 2965–2977. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20723054>
- Ng, E. (2012). Towards planning and practical understanding of the need for meteorological and climatic information in the design of high-density cities: A case-based study of Hong Kong. *Int J Climatol*, 32(4), 582–98. doi:10.1002/joc.2292
- NSW Government. (2016). *Emissions scenarios*. Retrieved November 28, 2016, from <http://climatechange.environment.nsw.gov.au//Climate-projections-for-NSW/About-NARcliM/Emissions-scenarios>
- Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, 7, 769–779.
- Oksuzyan A, Shkolnikova M, Vaupel JW, Christensen K, Shkolnikov VM. Sex differences in health and mortality in Moscow and Denmark. *European Journal of Epidemiology*. 2014;29(4):243–252.
- ONEILL, M. S. (2003). Modifiers of the Temperature and Mortality Association in Seven US Cities. *American Journal of Epidemiology*, 157(12), 1074–1082. doi:10.1093/aje/kwg096
- Parlow, E., Vogt, R., & Feigenwinter, C. (2014). The urban heat island of Basel - Seen from different perspectives. *Erde*, 145(1-2), 96–110. doi:10.12854/erde-145-8
- Patz, J. A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T., & Foley, J. A. (2005). Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 438(7066), 310–317. doi:10.1038/nature04188
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. a. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633–1644. doi:10.1127/0941-2948/2006/0130
- Perkins, S. E., & Alexander, L. V. (2013). On the measurement of heat waves. *Journal of Climate*, 26(13), 4500–4517. doi:10.1175/JCLI-D-12-00383.1
- Peters, G. P., Andrew, R. M., Boden, T., Canadell, J. G., Ciais, P., Quéré, C. Le, ... Wilson, C. (2013). The challenge to keep global warming below 2 °C. *Nature Climate Change*, 3(January), 4–6. doi:10.1038/nclimate1766
- Philipp, A., Della-Marta, P. M., Jacobeit, J., Fereday, D. R., Jones, P. D., Moberg, A., & Wanner, H. (2007). Long-term variability of daily North Atlantic-European pressure patterns since 1850 classified by simulated annealing clustering. *Journal of Climate*. doi:10.1175/JCLI4175.1
- ProClim. (2005). Hitzesommer 2003 - Synthesebericht. *Platform of the Swiss Academy of Sciences*.
- Ragettli, M.S., Vicedo-Cabrera, A.M., Schindler, C. & Röösli, M. (2017). Exploring the association between heat and mortality in Switzerland between 1995 and 2013. *Environmental Research* 158, 703-709. doi: 10.1016/j.envres.2017.07.021
- Rahmstorf, S., & Coumou, D. (2011). Increase of extreme events in a warming world. *Proceedings of the Na-*

*tional Academy of Sciences of the United States of America*, 108(44), 17905–17909. doi:10.1073/pnas.1101766108

- Rebetez, M., Dupont, O., & Giroud, M. (2009). An analysis of the July 2006 heatwave extent in Europe compared to the record year of 2003. *Theoretical and Applied Climatology*, 95(1-2), 1–7. doi:10.1007/s00704-007-0370-9
- Rebetez, M., Mayer, H., & Dupont, O. (2006). Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. *Annals of Forest ...*, 63, 569–577. doi:10.1051/forest
- Rebetez, M., & Reinhard, M. (2008). Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000 and 1975–2004. *Theoretical and Applied Climatology*, 91(1-4), 27–34. doi:10.1007/s00704-007-0296-2
- Robine, J.-M., Cheung, S. L. K., Le Roy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J.-P., & Herrmann, F. R. (2008). Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies*, 331(2), 171–178. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18241810>
- Robinson, P. J. (2001). On the definition of a heat wave. *Journal of Applied Meteorology*, 40(4), 762–775. doi:10.1175/1520-0450(2001)040<0762:otdoah>2.0.co;2
- Rocklöv, J., Ebi, K., & Forsberg, B. (2011). Mortality related to temperature and persistent extreme temperatures: a study of cause-specific and age-stratified mortality. *Occupational and Environmental Medicine*, 68(7), 531–536. doi:10.1136/oem.2010.058818
- Rogelj, J., den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., ... Meinshausen, M. (2016). Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature*, 534, 631–639. doi:doi:10.1038/nature18307
- Rosenzweig, C., Solecki, W., Parshall, L., Gaffin, S., Lynn, B., Goldberg, R., ... Hodges, S. (2005). Mitigating New York City's heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces.
- Ruckstuhl, C., & Norris, J. R. (2009). How do aerosol histories affect solar “dimming” and “brightening” over Europe?: IPCC-AR4 models versus observations. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(6), 1–12. doi:10.1029/2008JD011066
- Russo, S., Dosio, A., Graversen, R. G., Sillmann, J., Carrao, H., Dunbar, M. B., ... Vogt, J. V. (2014). Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 119(22), 12500–12512. doi:10.1002/2014JD022098
- Schaffner, N., Wittwer, A., Kut, E., Folkers, G., Benninger, D. H., & Candia, V. (2008). Heat pain threshold and tolerance show no left-right perceptual differences at complementary sites of the human forearm. *Neurosci. Lett.*, 440(3), 309–313. doi:10.1016/j.neulet.2008.05.084
- Schär, C., Vidale, P. L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M. A., & Appenzeller, C. (2004). The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427(6972), 332–336. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14716318>
- Scherrer, S. C., Fischer, E. M., Posselt, R., Liniger, M. A., Croci-Maspoli, M., & Knutti, R. (2016). Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. doi:10.1002/2015JD024634

- Schifano, P., Leone, M., De Sario, M., De' Donato, F., Bargagli, A. M., D'Ippoliti, D., ... Michelozzi, P. (2012). Changes in the effects of heat on mortality among the elderly from 1998-2010: results from a multicenter time series study in Italy. *Environ. Health*, *11*, 58. doi:10.1186/1476-069X-11-58
- Schwierz, C., & Riegelning, J. (2013). *Analyse Sterben in Zürich. Mortalität und Todesursachen*. Zürich.
- Semenza, J. C., Rubin, C. H., Falter, K. H., Selanikio, J. D., Flanders, W. D., Howe, H. L., & Wilhelm, J. L. (1996). Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago. *New England Journal of Medicine*, *335*(2), 84–90. doi:10.1056/NEJM199607113350203
- Son, J.-Y., Lee, J.-T., Anderson, G. B., & Bell, M. L. (2012). The impact of heat waves on mortality in seven major cities in Korea. *Environmental Health Perspectives*, *120*(4), 566–71. doi:10.1289/ehp.1103759
- Stadt Bern. (2017). T 01.8.011 Wohnbevölkerung nach Altersgruppen und Stadtteilen bis 2035 (Anfang), kleinräumig. Bern: Statistik Stadt Bern. Retrieved from <http://www.bern.ch/themen/stadt-recht-und-politik/bern-in-zahlen/katost/01bev>
- Stadt Zürich. (2016a). Zukünftige Bevölkerungsentwicklung nach Altersklasse und Stadtquartier. Zürich: Statistik Stadt Zürich. Retrieved from <https://www.stadt-zuerich.ch/prd/de/index/statistik/themen/bevoelkerung/bevoelkerungsentwicklung/bevoelkerungsszenarien.html#{#}szenarien>
- Stadt Zürich. (2016b). Zukünftige Bevölkerungsentwicklung nach Szenario. Zürich: Statistik Stadt Zürich. Retrieved from <https://www.stadt-zuerich.ch/prd/de/index/statistik/themen/bevoelkerung/bevoelkerungsentwicklung/bevoelkerungsszenarien.html#{#}szenarien>
- Steadman, R. (1984). A Universal Scale of Apparent Temperature. *J Clim Appl Meteorol*, *23*, 1674–1687. doi:[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<1674:AUSOAT>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<1674:AUSOAT>2.0.CO;2)
- Stefanon, M., D'Andrea, F., & Drobinski, P. (2012). Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. *Environmental Research Letters*, *7*(1), 014023. doi:10.1088/1748-9326/7/1/014023
- Takahashi, K., Honda, Y., & Emori, S. (2007). Assessing Mortality Risk from Heat Stress due to Global Warming. *Journal of Risk Research*. doi:10.1080/13669870701217375
- Tan, J., Zheng, Y., Tang, X., Guo, C., Li, L., Song, G., ... Chen, H. (2010). The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International Journal of Biometeorology*, *54*(1), 75–84. doi:10.1007/s00484-009-0256-x
- Taylor, J., Wilkinson, P., Davies, M., Armstrong, B., Chalabi, Z., & Mavrogianni, A. (n.d.). Mapping the effects of Urban Heat Island , housing , and age on excess heat- - related mortality in London Keywords.
- Tol, R. S. J. (2002). Estimates of the damage costs of climate change.Parts I&II .*Environmental and Resource Economics* *21*:47 & 135-160. *Environmental and Resource Economics*, *21*, 135–160. doi:10.1023/A:1014539414591
- Trenberth, K. E., & Fasullo, J. T. (2012). Climate extremes and climate change: The Russian heat wave and

other climate extremes of 2010. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117(17), 1–12. doi:10.1029/2012JD018020

Trnka, M., Kyselý, J., Možný, M., & Dubrovský, M. (2009). Changes in Central-European soil-moisture availability and circulation patterns in 1881-2005. *International Journal of Climatology*. doi:10.1002/joc.1703

UNFCCC. (2009). Draft decision - Copenhagen Accord, (C).

UNFCCC. (2015). ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT: Proposal by the President to the United Nations Framework Convention on Climate Change, 21932(December), 1–32.

Vandentorren, S., Suzan, F., Medina, S., Pascal, M., Maulpoix, A., Cohen, J. C., & Ledrans, M. (2004). Mortality in 13 French cities during the August 2003 heat wave. *Am. J. Public Health*, 94(9), 1518–1520. doi:10.2105/AJPH.94.9.1518

Vicedo-Cabrera, A., Ragettli, M., Schindler, C., & Röösli, M. (2016). Excess mortality during the warm summer of 2015 in Switzerland. *Swiss Med. Wkly.*, (December), 1–12. doi:10.4414/smw.2016.14379

Vicedo-Cabrera, A., Ragettli, M., Schindler, C., & Röösli, M. (2016). Excess mortality during the warm summer of 2015 in Switzerland. *Swiss Medical Weekly*, (December), 1–12. doi:10.4414/smw.2016.14379

Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1-2), 5–31. doi:10.1007/s10584-011-0148-z

Walther, C., & Olonscheck, M. (2016). Analysing heat exposure in two German cities by using meteorological data from both within and outside the urban area. *Meteorological Applications*, 23(3). doi:10.1002/met.1577

WMO. (2017). *WMO confirms 2016 as hottest year on record, about 1.1°C above pre-industrial era*. Retrieved from <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-confirms-2016-hottest-year-record-about-11%C2%B0c-above-pre-industrial-era>

Yu, W., Vaneckova, P., Mengersen, K., Pan, X., & Tong, S. (2010). Is the association between temperature and mortality modified by age, gender and socio-economic status? *The Science of the Total Environment*, 408(17), 3513–8. doi:10.1016/j.scitotenv.2010.04.058

Zubler, E. M., Scherrer, S. C., Croci-Maspoli, M., Liniger, M. A., & Appenzeller, C. (2014). Key climate indices in Switzerland; expected changes in a future climate. *Climatic Change*. doi:10.1007/s10584-013-1041-8