DENKEN
ÜBER
MORGEN

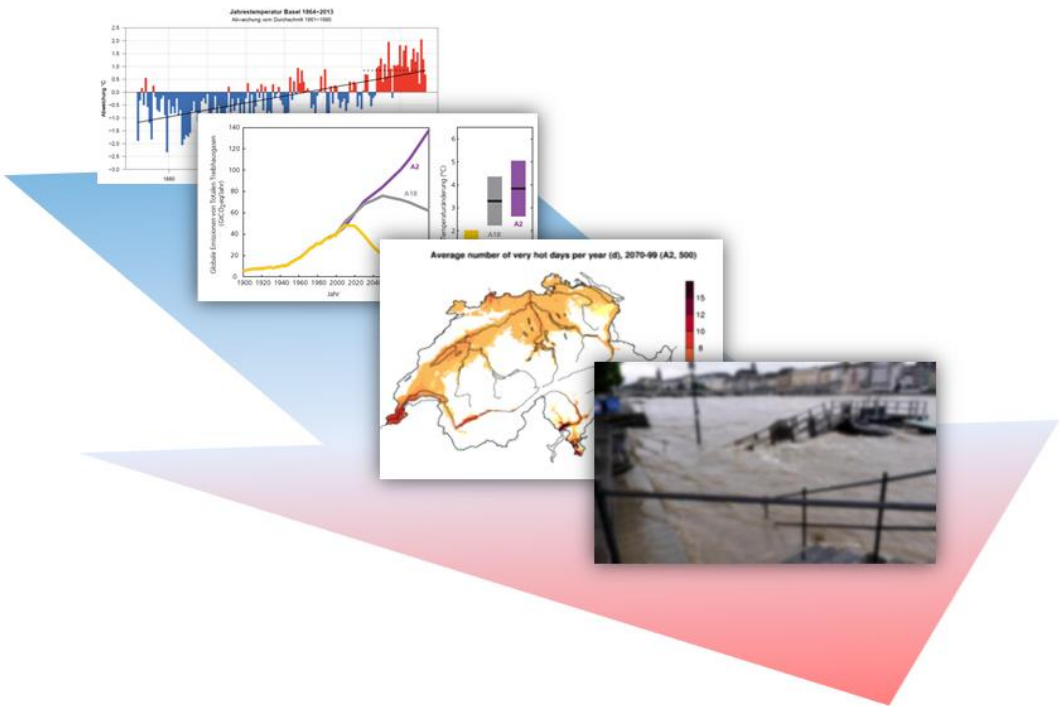
Egli Engineering

Klima, Gefahren und Effekte
Herleitungen für die Agglomerationsfallstudien

Klimabedingte Risiken und Chancen: Fallstudien Kanton Basel-Stadt und Genf 2060

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Zürich, 5. Mai 2015



INFRAS
Forschung und Beratung
www.infras.ch

Impressum

Auftraggeber
Bundesamt für Umwelt (BAFU)
Abteilung Klima
CH-3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer
INFRAS AG (Projektverantwortung)
Binzstrasse 23
8045 Zürich
Telefon +41 44 205 95 95 / zuerich@infras.ch / www.infras.ch

Egli Engineering AG
Bogenstrasse 14
9000 St. Gallen
Telefon +41 71 274 09 09 / info@naturgefahr.ch / www.naturgefahr.ch

Autoren
Jürg Füssler, INFRAS (Projektleiter)
Mario Betschart, INFRAS

Thomas Egli, Egli Engineering AG (Projektleiter Stellvertreter)
Luca Mini, Egli Engineering AG

Begleitung
Pamela Köllner-Heck, Martina Zoller, Thomas Probst, Roland Hohmann, Paul Filliger (BAFU), Franziska Schwager (Kanton Basel-Stadt, AUE Abteilung Koordinationsstelle Umweltschutz)

Hinweis
Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt sind allein die Auftragnehmer verantwortlich.

Dank
Wir danken allen Beteiligten für die konstruktiven Rückmeldungen, Verbesserungsvorschläge, Datenlieferungen und Experteneinschätzungen.

Inhalt

Glossar 4

Zusammenfassung 7

1. Klima früher, heute und um 2060 in Basel-Stadt und Genf 8

1.1. Beobachtete Klimaentwicklung und Zustand heute 8

1.1.1. Klima heute der Städte Basel und Genf mit Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts 16

1.2. Klimaszenarien um 2060 19

1.2.1. Definition der Klimaszenarien für die Fallstudien Basel-Stadt und Genf 21

1.2.2. Veränderung der Temperatur und des Niederschlags 2060: Basel-Stadt und Genf 24

1.2.3. Veränderung verschiedener Klimaindikatoren 31

2. Ableitung von Gefahren und Effekten aus Klimaszenarien 2060 53

2.1. Intensivniederschläge generell 53

2.1.1. Definition Intensivniederschläge 54

2.1.2. Abschätzung der Intensivniederschläge 2060 54

2.2. Hochwasser 60

2.3. Gewitter (inklusive Erosion und Hagel) 62

2.4. Änderung im Niederschlagsregime 62

2.5. Allgemeine Trockenheit 64

2.6. Kältewelle 65

2.7. Hitzewelle 66

2.8. Veränderung der Mitteltemperatur 67

2.9. Sturm/Orkan 68

Abbildungsverzeichnis 69

Literatur 72

Literatur Kapitel 1: Klima früher, heute und um 2060 in Basel-Stadt und Genf 72

Literatur Kapitel 2: Ableitung von Gefahren und Effekten aus Klimaszenarien 2060 76

Glossar

Eistage [Tage]	Anzahl Tage mit einer Maximumtemperatur kleiner als 0° Celsius
Monatsmitteltemperatur [°C]	Monatsmittel der Temperatur
Frosttage [Tage]	Anzahl Tage mit einer Minimumtemperatur kleiner als 0° Celsius
Frostwechseltage [Tage]	Anzahl Tage bei der die Minimumtemperatur kleiner als 0°C und die Maximumtemperatur grösser als 0°C ist
Heizgradtage [Kd]	Summe der täglich ermittelten Differenzen zwischen einer angestrebten Raumlufttemperatur von 20°C und der mittleren Tagestemperatur aller Heiztage
Heiztage [Tage]	Anzahl Tage mit Mitteltemperatur kleiner als 12°C ($HT_{20/12}$)
Hitzetage [Tage]	Anzahl Tage mit einer Maximumtemperatur grösser oder gleich 30° Celsius
Hitzewelle	Periode von mindestens sechs aufeinanderfolgenden Tagen von Mai bis September mit Maximaltemperaturen, welche das 90ste Perzentil der lokalen Maximaltemperaturen der Referenzperiode (1981-2010) übersteigen
Hitzewellentage	Anzahl Tage pro Jahr die einer Hitzewelle zugeordnet werden.
Intensivniederschläge	Starkniederschläge oder Dauerregen
Kältewelle	Periode von mindestens sechs aufeinanderfolgenden Tagen von November bis März mit Minimaltemperaturen, welche das 10tel Perzentil der lokalen Minimaltemperaturen der Referenzperiode (1981-2010) unterschreiten.
Kühlgradtage [Kd]	Summe der Differenzen zwischen der Tagesmitteltemperatur und der Referenztemperatur von 18.3°C
Kühltage [Tage]	Anzahl Tage mit Mitteltemperatur grösser als 18.3°C
Niederschlagmengen [mm]	Niederschlagsummen in mm
Niederschlagsregime	Das Niederschlagsregime charakterisiert die Niederschläge (Intensität, Dauer, Menge und zeitliche Verteilung) an einem bestimmten Ort
Niederschlagssummen über 24h	Summe aller Niederschläge pro 24 Stunden.
Niederschlagstage [Tage]	Anzahl Tage mit 1mm oder mehr Niederschlag
Neuschneetage [Tage]	Anzahl Tage mit 1 cm oder mehr Neuschnee
Orkan	Starker Sturm von über 117 km/h, bzw. Windstärke 12

Sehr heisse Tage [Tage]	Tage mit Maximaltemperatur >35°C und Minimaltemperatur >20°C
Sommertage [Tage]	Anzahl Tage mit einer Maximumtemperatur grösser oder gleich 25°Celsius
Starkniederschlag	Von Starkregen spricht man bei großen Niederschlagsmengen pro Zeiteinheit. Typische Schwellwerte sind Niederschlagsmengen >=10mm/1h oder >=20mm/6h (gemäss DWD, Wetterlexikon)
Sturm	Starker Wind von über 75 km/h bzw. Windstärke 9
Tagesniederschläge	Summe aller Niederschläge pro 24 Stunden
Trockenheit	Als Mass für die Trockenheit wird in dieser Studie der Term „Trockenperioden“ verwendet und dabei wie folgt definiert: Dauer von aufeinanderfolgenden Trockentagen (Tage mit weniger als 1mm Niederschlag), in der Masseinheit Tagen
Vegetationsperiode [Tage]	Tage pro Kalenderjahr zwischen dem ersten Auftreten einer mindestens 6 Tage langen Periode mit Tagesmitteltemperaturen über 5°C und dem ersten Auftreten einer mindestens 6 Tage langen Periode mit Tagesmitteltemperaturen unter 5°C nach dem 1. Juli

Zusammenfassung

Das Klima verändert sich. Die Temperaturen in der Schweiz werden im Laufe des 21. Jahrhunderts weiter steigen. Die Niederschlagsmengen sowie deren Intensitäten werden sich wandeln. Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) lancierte zusammen mit der Klimaanpassungsstrategie des Bundesrates eine Reihe von Klimarisikoanalysen. Die zu erwartenden Risiken und Chancen sollen mit deren Hilfe bis 2060 besser identifiziert und entsprechend ihrer Relevanz beurteilt werden können. Sechs Grossräumen werden genauer untersucht. Dabei werden die klimabedingten Risiken und Chancen quantitativ und qualitativ abgeschätzt. Die Fallstudien sollen ein Gesamtbild der zu erwartenden klimabedingten Kosten und Erträge für die Schweiz schaffen. Gleichzeitig sollen die Anpassungsmassnahmen des zweiten Teils der Anpassungsstrategie kritisch beurteilt werden.

Für die Klimarisikoanalyse Kanton Uri wurden eine Reihe von Klimaindikatoren verwendet. Die detaillierte und transparente Darstellung dieser Indikatoren ermöglichte spezifische Gefahren und Effekte für das betreffende Gebiet abzuleiten. Dieses transparente Vorgehen sollte für die vorliegenden Fallstudien Basel-Stadt und Genf beibehalten werden.

Dieser technische Bericht führt zuerst die relevanten Klimainformationen detailliert auf. Die Daten unterscheiden die Zustände *heute* sowie die *Klimaszenarien schwach* und *stark* um das Jahr 2060. Wichtige Klimaindikatoren werden im Detail erläutert.

Bis 2060 nimmt die Hitzebelastung in urbanen Räumen weiter zu. Aus diesem Grund wurde für die Fallstudien Basel-Stadt und Genf zusätzlich der städtische Wärmeinsel-Effekt (*WIE* oder engl. *urban heat island effect*) in den Projektionen für den Zeitraum 2045-2074 berücksichtigt. Der WIE wurde dazu im Vorfeld approximativ bestimmt.

Die Gefahren und Effekte für Basel-Stadt und Genf werden im zweiten Teil hergeleitet.

Im Hauptbericht (INFRAS/Egli Engineering 2015a) werden die vorliegenden quantitativen Abschätzungen angewandt. Die vorgenommenen Erläuterungen dienen somit als Grundlage für weitere Analysen. Wo nötig, wird im Hauptbericht auf diese technischen Ausführungen referenziert.

1. Klima früher, heute und um 2060 in Basel-Stadt und Genf

1.1. Beobachtete Klimaentwicklung und Zustand heute

Grossräumige Beobachtungen

Globale Veränderungen des Klimas wirken sich regional unterschiedlich stark aus. Die mittlere Temperatur der Schweiz hat sich seit dem Beginn der Industrialisierung (1864-2011) um 1.8°C erhöht. Damit ist der Erwärmungstrend in der Schweiz etwa doppelt so stark wie auf der Nordhalbkugel (Perroud und Bader 2013). Die Niederschlagstrends hingegen sind in der Schweiz nicht signifikant (Begert et al. 2005; Perroud und Bader 2013).

In der Wissenschaft besteht ein breiter Konsens darüber, dass der anthropogene Anteil an zusätzlichen Treibhausgasen in der Atmosphäre der Hauptverursacher für die klimatischen Änderungen darstellt (IPCC 2013). Die Konzentration von CO_2 (als eines der wichtigsten Treibhausgase) in der Atmosphäre ist in Folge menschlicher Aktivitäten von einem vorindustriellen Wert von 280 ppm (parts per million) im Jahr 1750 auf über 393 ppm im Jahr 2011 angestiegen (Perroud und Bader 2013). Im Mai 2012 wurde auf Mauna Loa, Hawaii sogar zum ersten Mal seit Beginn der CO_2 Aufzeichnungen die Marke von 400 ppm überschritten (NOAA 2012). Die heutigen CO_2-Konzentrationen übertreffen die aus Eisbohrkernen der Antarktis bekannte Bandbreite der letzten 650 000 Jahre (180 bis 300 ppm) bei Weitem (IPCC 2007).

Besonderheiten der Agglomerationen

Die klimatischen Bedingungen der Agglomerationen unterscheiden sich vom jeweiligen Umland. Fehlende Vegetation, dichte Bebauung sowie Emissionen von Luftschadstoffen und Abwärme führen zu einer höheren Durchschnittstemperatur (MeteoSchweiz 2013a). Aufgrund der eingeschränkten Durchlüftung sind die generellen Windstärken meist schwächer ausgeprägt als in den umliegenden Regionen, wo die Winde ungehindert auftreten können. Grössere Gebäude beeinflussen zudem die Windverhältnisse und können eine deutliche Abweichung vom Windregime des Umlandes bewirken (MeteoSchweiz 2013a).

Beobachtete Klimaentwicklung und das Klima heute der Agglomeration Basel-Stadt

Um die Entwicklung des Klimas von der Vergangenheit bis heute aufzuzeigen, wird auf homogenisierte Temperaturdaten von MeteoSchweiz zurückgegriffen (Bergert et al. 2005). Mit Hilfe der langjährigen und einzigartigen Messreihe von Basel/Binningen könnten Entwicklungen seit 1753 aufgezeigt werden. Aufgrund der Konsistenz zwischen den einzelnen Klimarisikofallstudien wird lediglich die Entwicklung seit 1864 aufgezeigt.

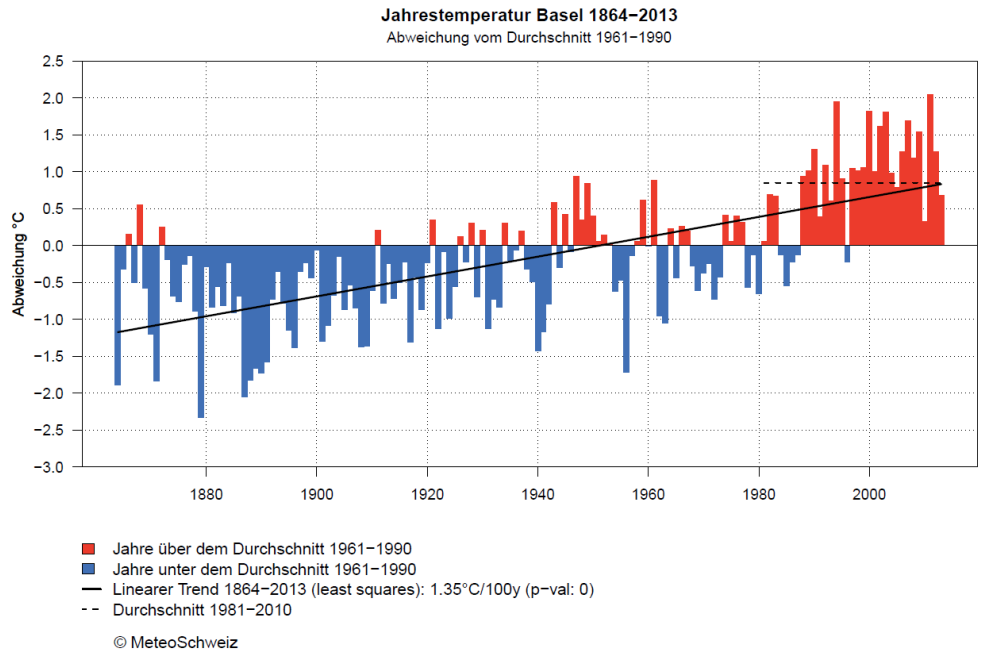
Die Zunahme der Temperatur im Zeitraum 1864-2013 betrug im Mittel an der Station Basel/Binningen[1] (BAS) 0.14°C pro Dekade (Abbildung 1). Die zehn wärmsten Jahre seit Messbeginn wurden dabei in den letzten zwei Dekaden gemessen. Exemplarisch für die Veränderung des Klimas in Basel sei an dieser Stelle auch die Veränderung der Anzahl Hitzetage dargestellt (Abbildung 2). Seit 1961 wird ein deutlicher Trend in Richtung mehr Hitzetage[2] sichtbar. Waren im 11-jährlichen Mittel 1965 rund 5 Hitzetage zu verzeichnen, waren es um das Jahr 2010 bereits rund 15 Tage mit Maximaltemperaturen über 30°C. Betrachtet man die Zeitreihe der jährlichen Niederschlagssummen (Abbildung 3), so ist seit Messbeginn neben der hohen Variabilität kein signifikanter Trend feststellbar. Die maximalen 1-Tagesniederschläge (Abbildung 4) weisen ebenfalls eine hohe Variabilität aus, wobei auch hier kein signifikanter Trend sichtbar ist.

Für die Normperiode 1981-2010 wurde an der Messstation Basel/Binningen (316 m.ü.M.) eine mittlere Temperatur von 10.5°C gemessen (siehe Tabelle 1). Im Mittel werden an diesem Standort rund 64 Frosttage und knapp 13 Eistage gezählt. Mit 52 Sommertagen und rund 11 Hitzetagen zählt Basel zu den wärmsten Standorten der Schweiz auf der Alpennordseite. Während des Jahres fallen 842 mm Niederschlag. Akkumuliert fallen davon rund 37 cm als Schnee, wobei im Mittel an 11 Tagen mit Neuschnee zu rechnen ist.

[1] Station des SwissMetNet. Das SwissMetNet stellt das Messnetz der automatischen Bodenstationen des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) dar.
(http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/messsysteme/boden/swissmetnet.html)

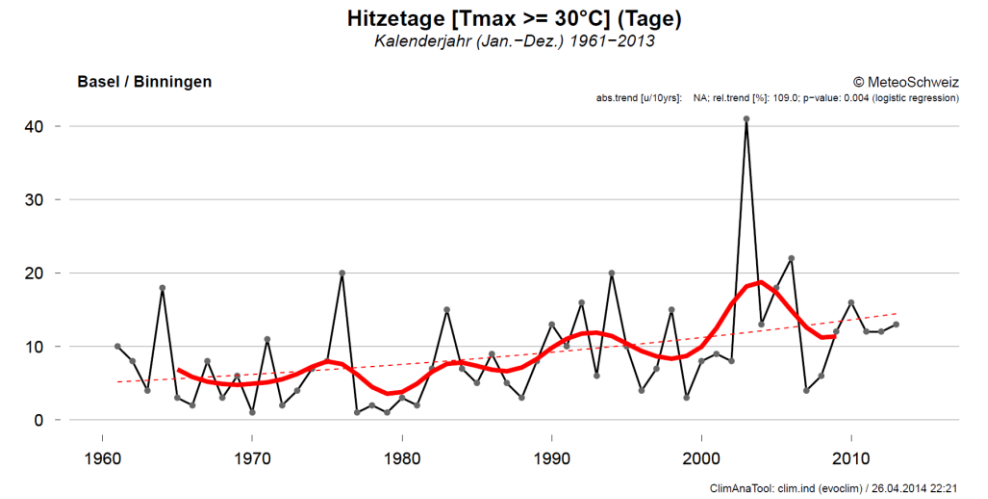
[2] Tage mit Maximaltemperatur ≥ 30°C

Abbildung 1: Entwicklung der Jahrestemperatur in Basel/Binningen 1864-2013



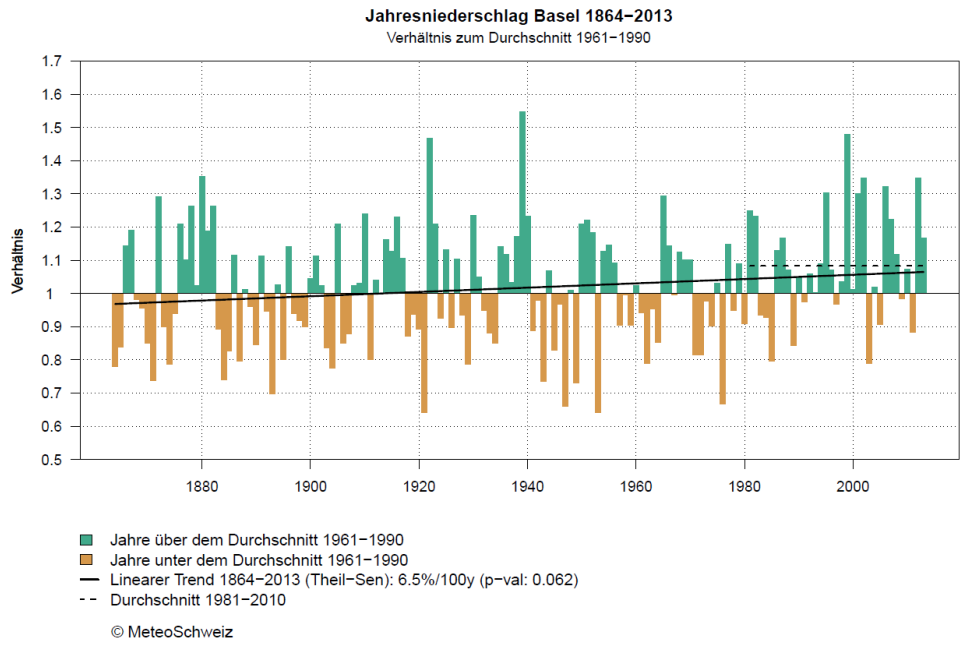
Entwicklung der Jahrestemperatur von 1864-2013 an der Station Basel/Binningen (BAS) auf 316 m.ü.M. und deren Abweichungen (Anomalien) im Vergleich zur Periode 1961-1990. Quelle: MeteoSchweiz 2014a.

Abbildung 2: Anzahl Hitzetage in Basel/Binningen 1961-2013



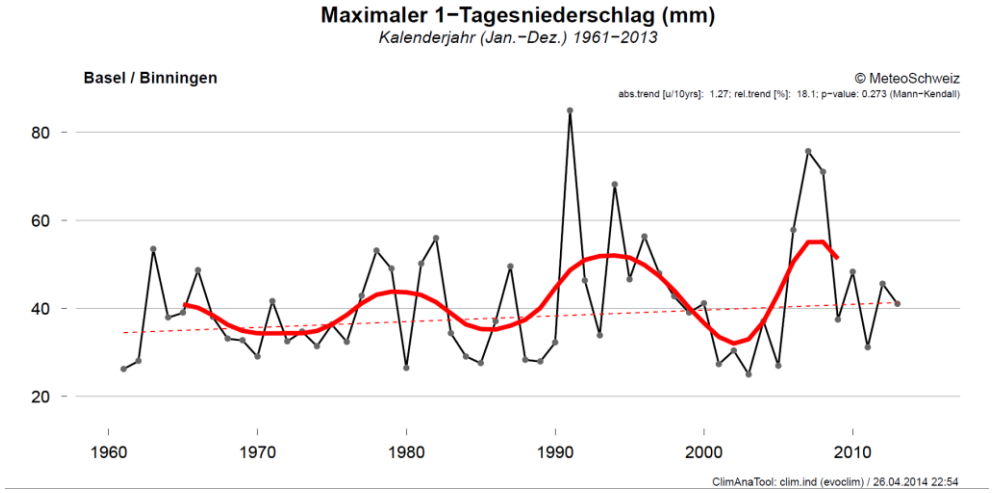
Anzahl Hitzetage [Tage] an der Messstation Basel/Binningen zwischen 1961 und 2013. Die rote Linie zeigt den geglätteten Verlauf der Originalwerte (die Werte werden über 11 Jahre gemittelt dargestellt). Die gestrichelte Linie entspricht dem langfristigen Trend. Quelle: MeteoSchweiz 2014b.

Abbildung 3: Entwicklung des Jahresniederschlags in Basel/Binningen 1864-2013



Entwicklung der jährlichen Niederschlagssummen von 1864-2013 an der Station Basel/Binningen (BAS) auf 316 m.ü.M. und deren Abweichungen (Anomalien) im Vergleich zur Periode 1961-1990. Quelle: MeteoSchweiz 2014a.

Abbildung 4: Maximaler 1-Tagesniederschlag in Basel/Binningen 1961-2013



Entwicklung des maximalen 1-Tagesniederschlags (mm) 1961-2013 an der Station Basel/Binningen (BAS). Die rote Linie zeigt den geglätteten Verlauf der Originalwerte (die Werte werden über 11 Jahre gemittelt dargestellt). Die gestrichelte Linie entspricht dem langfristigen Trend. Quelle: MeteoSchweiz 2014b.

Tabelle 1: Jahresmittelwerte Basel/Binningen heute

Station Basel-Binningen	Jahresmittelwert der Normperiode 1981-2010
Temperatur [°C]	10.5
Maximumtemperatur [°C]	14.9
Eistage [Tage]	12.9
Frosttage [Tage]	63.9
Sommertage [Tage]	52.3
Hitzetage [Tage]	10.8
Niederschlag [mm]	842.0
Niederschlag [Tage]	120.4
Neuschnee [cm]	36.9
Neuschnee [Tage]	11.1

Ausgewählte Klimanormwerte für die Normperiode 1981-2010 der Station Basel/Binningen. Legende siehe Glossar. Quelle: MeteoSchweiz (2014c)

Beobachtete Klimaentwicklung und das Klima heute der Agglomeration Genf

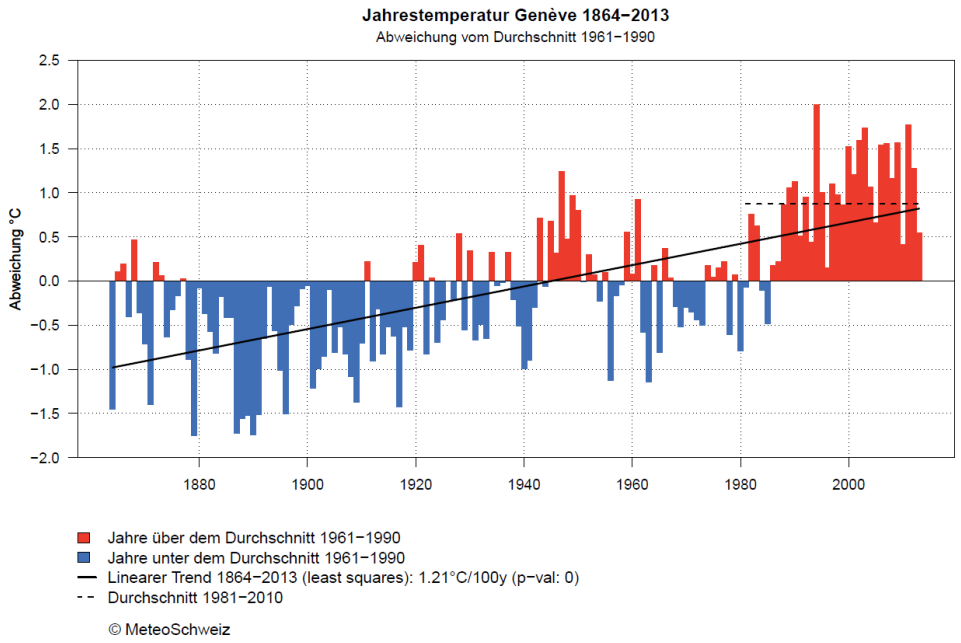
Um die Entwicklung des Klimas von der Vergangenheit bis heute aufzuzeigen, wird auf homogenisierte Temperaturdaten von MeteoSchweiz zurückgegriffen (Bergert et al. 2005). Mit Hilfe der langjährigen und einzigartigen Messreihe von Genève-Cointrin könnten Entwicklungen seit 1753 aufgezeigt werden. Aufgrund der Konsistenz zwischen den einzelnen Klimarisikofallstudien wird lediglich die Entwicklung seit 1864 aufgezeigt.

Wird die Station Genève-Cointrin[3] (GVE) betrachtet, beträgt die Zunahme der Temperatur im Zeitraum 1864-2013 im Mittel 0.12°C pro Dekade (Abbildung 5). In Genf sind die wärmsten Jahre seit Messbeginn in den letzten zwei Dekaden gemessen worden. Exemplarisch für die Veränderung des Klimas in Genf wird die Veränderung der Anzahl Hitzetage dargestellt (Abbildung 6). Seit 1961 wird ein deutlicher Trend in Richtung mehr Hitzetage sichtbar. Waren im 11-jährlichen Mittel 1965 rund 10 Hitzetage zu verzeichnen, waren es um das Jahr 2010 bereits 15 Hitzetage. Die Zeitreihe der jährlichen Niederschlagssummen von Genève-Cointrin (Abbildung 7) zeigt seit Messbeginn eine hohe Variabilität. Es ist jedoch kein signifikanter Trend feststellbar. Die maximalen 1-Tagesniederschläge (Abbildung 8) weisen ebenfalls eine hohe Variabilität aus, wobei hier kein signifikanter Trend nachweisbar ist.

[3] Station des SwissMetNet. Das SwissMetNet stellt das Messnetz der automatischen Bodenstationen des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) dar. (http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/messsysteme/boden/swissmetnet.html)

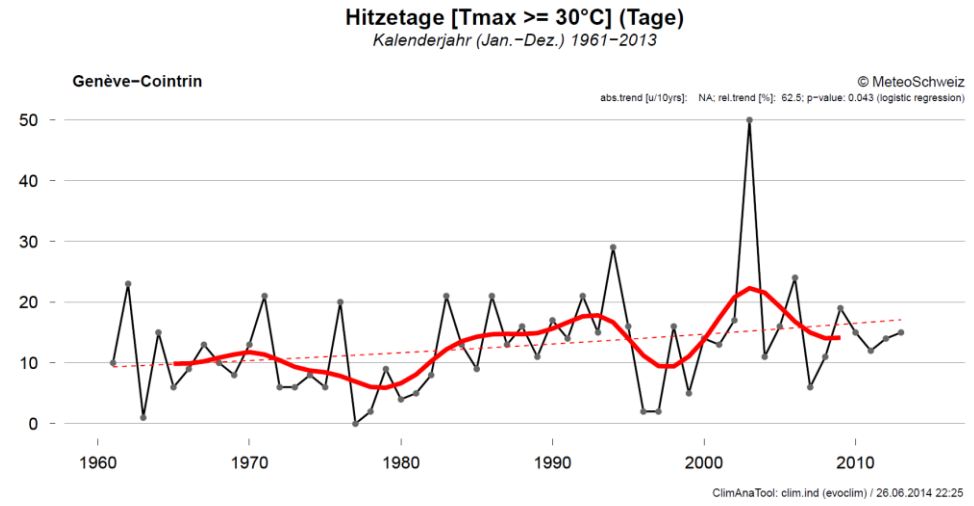
Für die Normperiode 1981-2010 beträgt die Mitteltemperatur der Messstation Genève-Cointrin (320 m.ü.M.) 10.5°C (siehe Tabelle 2). Ausgeprägter präsentiert sich die Wärmeindikatoren: 60 Sommertage und 15 Hitzetage. Im Mittel werden rund 73 Frosttage und 9 Eistage gezählt. Über das ganze Jahr betrachtet, fallen rund 1005 mm Niederschlag, davon 32 cm als Schneefall. Es sind im Mittel insgesamt 8 Neuschneetage zu erwarten.

Abbildung 5: Entwicklung der Jahrestemperatur in Genève-Cointrin 1864-2013



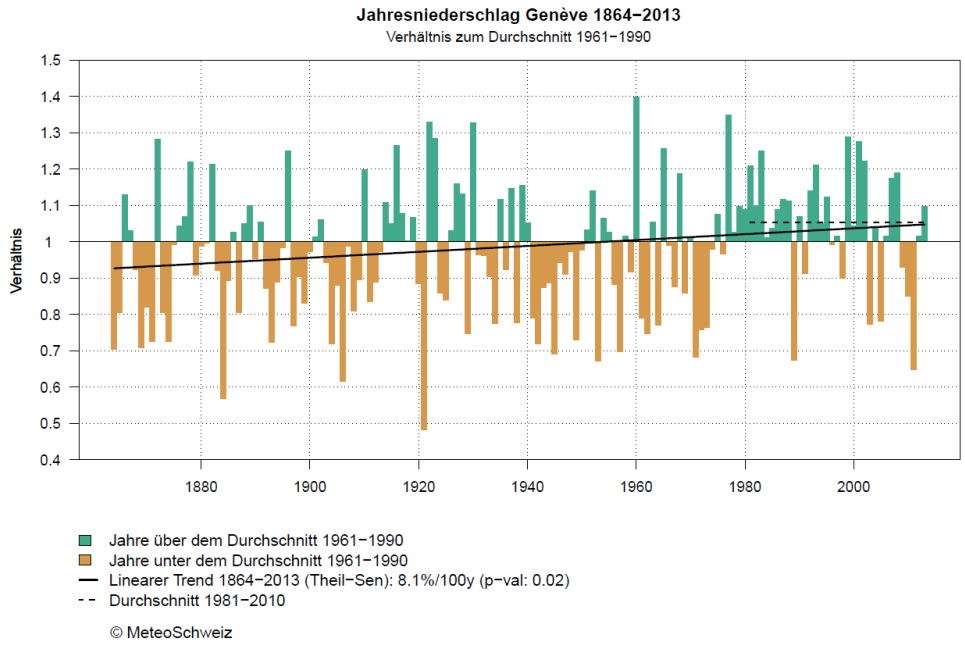
Entwicklung der Jahrestemperatur von 1864-2013 an der Station Genève-Cointrin (GVE) auf 420 m.ü.M. und deren Abweichungen (Anomalien) im Vergleich zur Periode 1961-1990. Quelle: MeteoSchweiz 2014a.

Abbildung 6: Anzahl Hitzetage in Genève-Cointrin 1961-2013



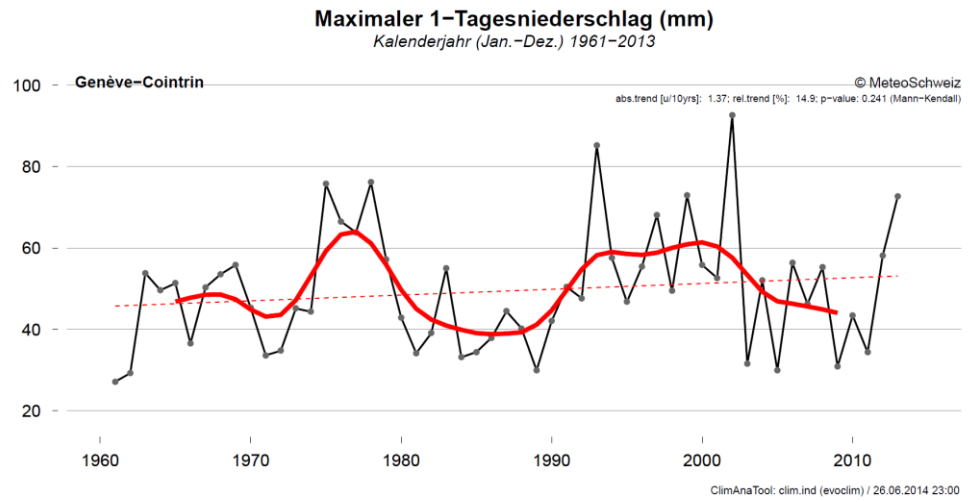
Anzahl Hitzetage [Tage] an der Messstation Genève-Cointrin (GVE) zwischen 1961 und 2013. Die rote Linie zeigt den geglätteten Verlauf der Originalwerte (die Werte werden über 11 Jahre gemittelt dargestellt). Die gestrichelte Linie entspricht dem langfristigen Trend. Quelle: MeteoSchweiz 2014b.

Abbildung 7: Entwicklung des Jahresniederschlags in Genève-Cointrin 1864-2013



Entwicklung der jährlichen Niederschlagssummen von 1864-2013 an der Station Genève-Cointrin (BVE) auf 320 m.ü.M. und deren Abweichungen (Anomalien) im Vergleich zur Periode 1961-1990. Quelle: MeteoSchweiz 2014a.

Abbildung 8: Maximaler 1-Tagesniederschlag in Genève-Cointrin 1961-2013



Entwicklung des maximalen 1-Tagesniederschlags (mm) 1961-2013 an der Station Genève-Cointrin (GVA). Die rote Linie zeigt den geglätteten Verlauf der Originalwerte (die Werte werden über 11 Jahre gemittelt dargestellt). Die gestrichelte Linie entspricht dem langfristigen Trend. Quelle: MeteoSchweiz 2014b.

Tabelle 2: Jahresmittelwerte Genève-Cointrin heute

Station Genève-Cointrin	Jahresmittelwert der Normperiode 1981-2010
Temperatur [°C]	10.5
Maximumtemperatur [°C]	15.2
Eistage [Tage]	9.0
Frosttage [Tage]	73.2
Sommertage [Tage]	60.0
Hitzetage [Tage]	15.0
Niederschlag [mm]	1005.0
Niederschlag [Tage]	109.0
Neuschnee [cm]	32.1
Neuschnee [Tage]	8.2

Ausgewählte Klimanormwerte für die Normperiode 1981-2010 der Station Genève-Cointrin. Legende siehe Glossar. Quelle: MeteoSchweiz (2014c)

Definition Klima heute

Die für den Zustand heute aufgeführten Messgrössen der Normperiode 1981-2010 bilden zugleich die gültige Referenz der Klimarisikoanalysen des Kantons Basel-Stadt und des Kantons Genf für den Zeitpunkt *heute*.

Klima heute:	Klimaparameter gemäss Normperiode 1981-2010

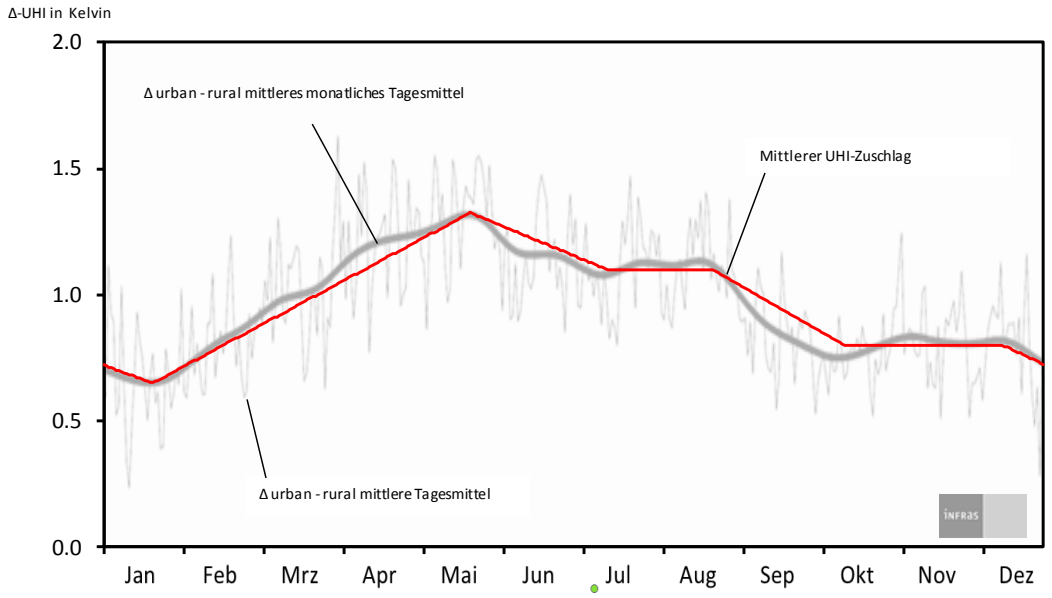
1.1.1. Klima heute der Städte Basel und Genf mit Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts

Städtischer Wärmeinsel-Effekt

Die Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts (WIE) ist für die beiden Fallstudien Basel-Stadt und Genf insbesondere bei der Abschätzung von gesundheitsrelevanten Fragestellungen von entscheidender Bedeutung. Während es an den Messstationen Basel/Binningen (BAS) und Genève-Cointrin (GVE) möglich ist die Wärmeinsel-Effekte der Agglomeration zu erfassen und die Änderung für 2060 abzuschätzen, gestaltet sich die korrekte Erfassung des städtischen Klimas schwierig. Um die klimabedingte Änderung insbesondere von extremeren Indikatoren wie jener der Hitzetage oder Tropennächte bis 2060 unter Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts abschätzen zu können, wurde im Rahmen der beiden Risikoanalysen versucht, den Effekt der städtischen Wärmeinsel von Basel-Stadt approximativ zu quantifizieren. Die Approximation des Wärmeinsel-Effekts wurde schliesslich für die Klimaindikatoren Basel-Stadt und Genf übernommen.

Abbildung 9 illustriert den Temperaturunterschied zwischen ruraler und urbaner Messstation für Basel-Stadt. Dieser wird zur Abschätzung des Wärmeinsel-Effekts zur heutigen Klimatologie ebenso addiert wie auf die projizierten Temperaturen für beide Klimaszenarien (siehe unten). Details zur Methodik, den Resultaten und den dahinter befindlichen Annahmen können aus INFRAS (2015) entnommen werden. Die entsprechend generierte Datenreihe findet sich in INFRAS (2014).

Abbildung 9: Mittlere Wärmeinsel von Basel-Stadt als einfache Approximation für die Fallstudien

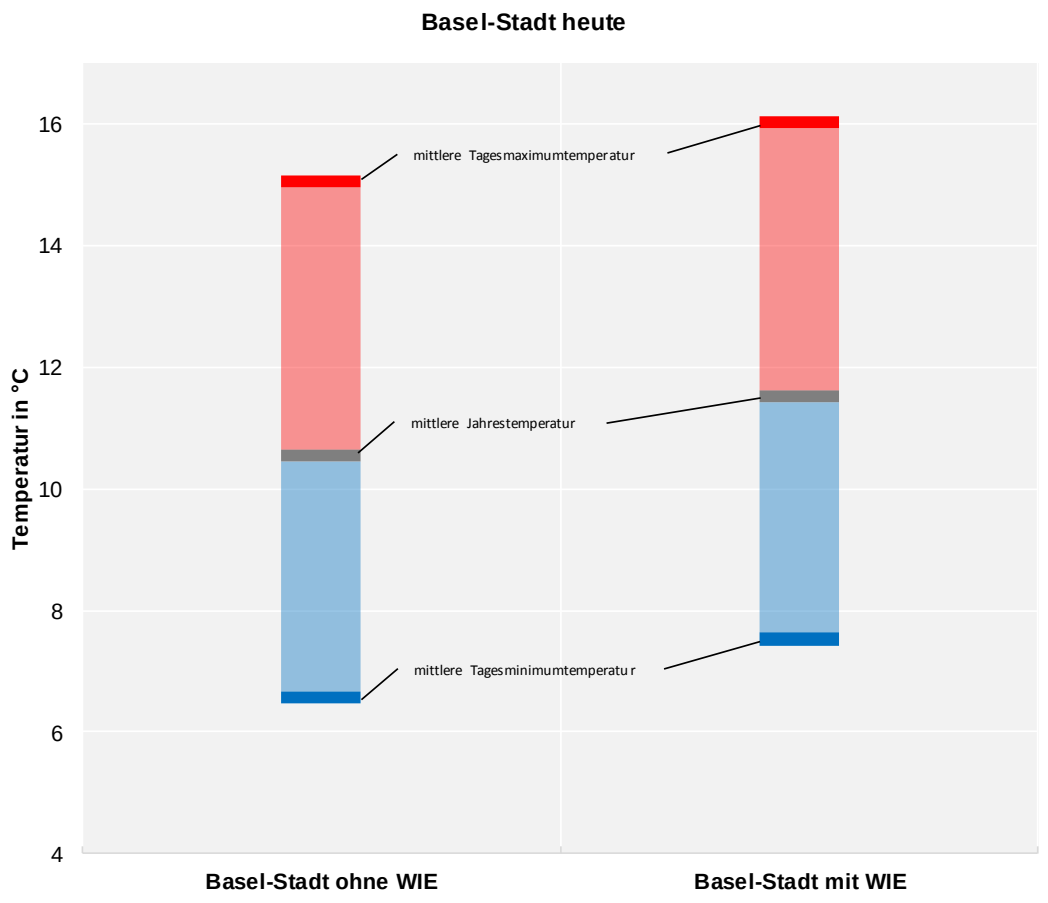


Die Abbildung illustriert die mittlere Wärmeinsel (WIE) von Basel-Stadt als additives Delta zur Tagesmitteltemperatur in Kelvin (rote Linie). Der mittlere Wärmeinsel-Jahresgang von Basel-Stadt sowie deren Bandbreiten der Variabilität wurden durch INFRAS abgeschätzt. Die ursprüngliche Grafik (Zeitreihe im Hintergrund) stammt aus Vogt und Parlow (2011).

Temperatur heute in den Städten Basel und Genf unter Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts

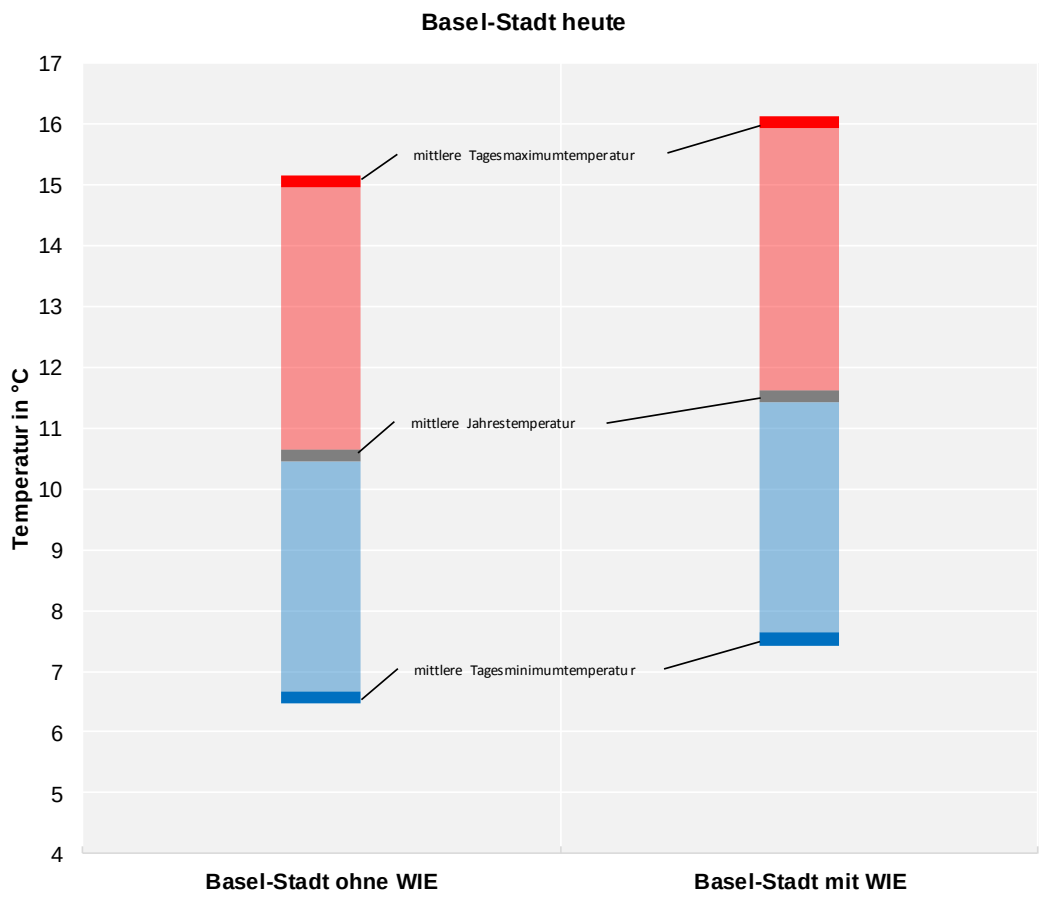
Die mittlere Jahrestemperatur, die mittlere Tagesminimumtemperatur sowie die mittlere Tagesmaximumtemperatur von Basel-Stadt und Genf sind in Abbildung 10 und Abbildung 11 für den Zustand *heute* einmal ohne und einmal mit Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts dargestellt. Die Bestimmung des Wärmeinsel-Effekts erfolgte gemäss INFRAS (2015). Die Berechnungen wurden von MeteoSchweiz vorgenommen (MeteoSchweiz 2014d). Die dargestellten Werte verstehen sich lediglich als jährliches geglättetes Signal des Wärmeinsel-Effekts (WIE). Der städtische WIE kann an einzelnen Tagen weit grösser sein. Der mittlere jährliche Wärmeinsel-Zuschlag beträgt rund 1°C. Die Veränderungen einzelner Klimaindikatoren zwischen den beiden Zeiträumen *heute* und 2060 und Berücksichtigung der *Klimaszenarien schwach und stark* sind weiter unten dargestellt.

Abbildung 10: Mittlere Temperatur in Basel-Stadt heute



Mittlere Jahrestemperatur (grau), mittlere Tagesmaximumtemperatur (rot) und mittlere Tagesminimumtemperatur (blau) an der Station Basel/Binningen. Links: Basel-Stadt ohne Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts (WIE). Rechts: Basel-Stadt mit Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts (WIE) gemäss INFRAS (2015). Modelldaten: MeteoSchweiz 2014d.

Abbildung 11: Mittlere Temperatur in Genf heute



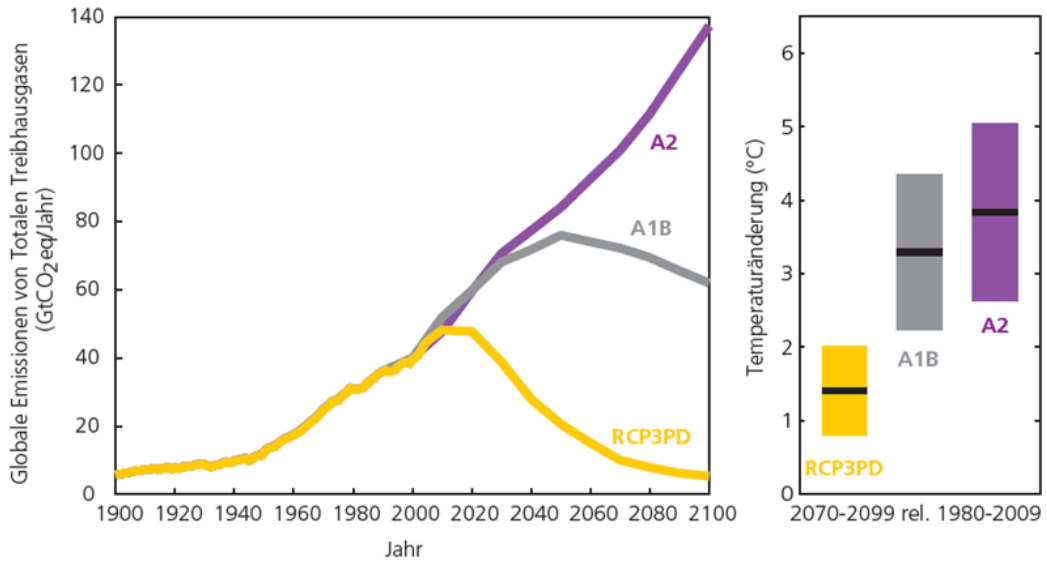
Mittlere Jahrestemperatur (grau), mittlere Tagesmaximumtemperatur (rot) und mittlere Tagesminimumtemperatur (blau) an der Station Genève-Cointrin (GVE). Links: Genf ohne Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts (WIE). Rechts: Genf mit Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts (WIE) gemäss INFRAS (2015). Modelldaten: MeteoSchweiz 2014d.

1.2. Klimaszenarien um 2060

Das Ausmass der Klimaänderung in der Schweiz ist von der Region, der Jahreszeit und insbesondere vom Verlauf der zukünftigen globalen Treibhausgasemissionen abhängig (CH2011 2011). Die CH2011-Klimaszenarien zeigen daher mögliche Änderungen von Klimagrössen wie Temperatur und Niederschlag auf, welche primär durch Emission von Treibhausgasen verursacht werden. Da unsicher ist, wie sich der zukünftige Ausstoss von Treibhausgasen entwickelt, werden für die CH2011-Klimaszenarien drei mögliche Emissionsszenarien (A2, A1B und RCP3PD) berücksichtigt (MeteoSchweiz 2013a).

Für die aktuelle Studie zur Abschätzung der klimabedingten Risiken und Chancen 2060 der Kantone Basel-Stadt und Genf wurden die zwei Emissionsszenarien A1B und RCP3PD gemäss Vorgabe des BAFUs berücksichtigt. Das Emissionsszenario A1B geht davon aus, dass die Treibhausgasemissionen bis ins Jahr 2050 weiter zunehmen und danach aufgrund angenommenen technologischen Fortschritts leicht zurückzugehen (Meinshausen et al. 2011). Für das Szenario RCP3PD wird angenommen, dass die Emissionen bis ins Jahr 2050 halbiert werden und im Jahr 2100 auf die Werte um 1900 abfallen. Dies ist nur mit strengen globalen Mitigationsmassnahmen möglich (van Vuuren et al. 2007). Sollte der Verlauf der Treibhausgasemissionen dem Szenario RCP3PD folgen, so sollte sich die globale Erwärmung auf 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau beschränken lassen. Bei den beiden anderen Klimaszenarien würde die Temperatur auch nach 2060 weiter zunehmen, wobei im Vergleich zur Referenzperiode 1980-2009 insbesondere beim Emissionsszenario A2 eine Erwärmung von gegen 5°C bis ins Jahr 2100 (gemittelt über die ganze Schweiz) eintreten könnte. Figur 8 zeigt die drei möglichen Emissionsszenarien für die Berechnung der Klimaszenarien CH2011 und die zu erwartenden mittleren Temperaturveränderungen in der Schweiz für die Periode 2070-2099 gegenüber der Referenz (1980-2009).

Abbildung 12: Globale Treibhausgasemissionsszenarien



Globale Emissionsszenarien (links) und die entsprechenden Temperaturänderungen im Mittel für 2070-2099 im Vergleich zur Referenzperiode 1980-2009. Quelle: CH2011 (2011).

1.2.1. Definition der Klimaszenarien für die Fallstudien Basel-Stadt und Genf

Zur Abschätzung der klimabedingten Risiken und Chancen 2060 für die Fallstudiengebiete Kanton Basel-Stadt und Genf (Mittelwert der Periode 2045-2074) werden basierend auf den Klimaszenarien CH2011 die obere Schätzung vom Szenario A1B und die mittlere Schätzung vom Szenario RCP3PD für die Grossregion „Agglomerationen“ verwendet (CH2011 2011; MeteoSchweiz 2013a). Es handelt sich um ein optimistisches Szenario *schwacher Klimawandel* und ein pessimistisches Szenario – business as usual - *starker Klimawandel*. Im Rahmen des Aktionsplans Anpassung an den Klimawandel (BAFU 2012) definieren sich die beiden Klimaszenarien wie folgt:

Klimaszenario schwach:	Mittlere Schätzung RCP3PD 2060 (Mittelwert 2045-2074) für die Temperatur (gerundet auf 0.1°C) und den Niederschlag (gerundet).

Klimaszenario stark:	Obere Schätzung A1B 2060 (Mittelwert 2045-2074) für die Temperatur im ganzen Jahr (gerundet auf 0.1°C) und den Niederschlag (gerundet) im Winter und im Frühling. Für den Niederschlag im Sommer und im Herbst wird die untere Schätzung A1B verwendet, um eine möglichst starke Abnahme zu betrachten.

Unsicherheiten der Klimaszenarien

Die in den Fallstudien definierten *Klimaszenarien schwach und stark* (siehe oben) wurden im Methodenbericht zu den Klimarisikoanalysen des Bundes (EBP/SLF/WSL 2013) vorgestellt. Die beiden Szenarien wurden so gewählt, dass durch die entstehende Differenz zwischen dem *Klimaszenario schwach und stark* eine realistische Bandbreite der zu erwartenden Veränderungen abgebildet werden kann. Die beiden vorgegebenen Klimaszenarien verstehen sich somit als oberer und unterer Unsicherheitsbereich, in dem sich die klimabedingten Veränderungen höchstwahrscheinlich abspielen werden.

Klimaszenarien sind immer mit Unsicherheiten behaftet. Die in CH2011 (2011) vorgestellten Klimaszenarien wurden jeweils als mittlere Schätzung (best guess/50% Perzentil), oberer und unterer Schätzung (2.5 % und 97.5% Perzentile) der Temperatur angegeben. Gemäss Experteneinschätzung versteht sich der durch die obere und untere Schätzung entstehende Bereich als Bandbreite der tatsächlichen Klimaveränderung für das entsprechende Szenario. Die tatsächliche Wahrscheinlichkeit, dass die Werte im angegebenen Bereich liegen werden, wird auf ungefähr 66% geschätzt (CH2011 2011). Für die Projektionen des Niederschlags sind die Unsicherheiten generell grösser. Es wird daher erwartet, dass die klimabedingte Veränderung

des Niederschlags mit einer Wahrscheinlichkeit von rund 50% innerhalb dieser Bandbreite stattfinden wird (CH2011 2011).

Die Szenarien beschreiben zwei mögliche zukünftige Klimazustände im Jahre 2060 (2045-2074). Es wird angenommen, dass entweder das eine oder andere Szenario eintritt. Durch dieses Vorgehen werden zwar realistische Abschätzungen zum eintretenden Klima generiert, jedoch keine Unsicherheiten der beiden vordefinierten Klimaszenarien gerechnet oder abgeschätzt.

Die Berechnungen des künftigen Klimas basieren dabei auf einem räumlichen Gitter von 2x2 km. Als Basis für die Berechnung der Klimaänderung an den Stationen werden die den Stationen nächsten Gitterpunkte auf ähnlicher Höhe verwendet. Die Resultate sind stets vor diesem Hintergrund mit der nötigen Vorsicht zu interpretieren. Detailliertere Informationen zur Methodik können in Zubler et al. (2014a) nachgelesen werden.

Besondere Vorsicht ist bei der Interpretation von Indikatoren geboten, welche sich jeweils am oberen oder unteren Ende der Temperatur- oder Niederschlagsskala befinden - wie beispielsweise die Indikatoren “sehr heisse Tage”, Hitzetage und Tropennächte. Bei diesen Indikatoren führen kleine Veränderungen in der Temperaturverteilung - z.B. eine Verschiebung hin zu generell wärmeren Temperaturen und/oder eine breitere Verteilung durch eine Zunahme in der Variabilität - zu grossen relativen Veränderungen. Da in dem hier gewählten Ansatz die Veränderungen der Tag-zu-Tag- und Jahr-zu-Jahr Variabilität nicht berücksichtigt werden können – die Änderung in der Persistenz also nicht Teil der Betrachtung ist, man jedoch Hinweise für eine Zunahme aus Modellen hat, sind die hier gezeigten Veränderungen bei extremen Indikatoren eher als konservative Schätzungen zu verstehen. Die tatsächlichen Änderungen könnten noch stärker ausfallen. In Abbildung 13 ist dieser Umstand illustriert.

In Schär et al. (2004) wird beispielsweise eine zukünftige Zunahme der Jahr-zu-Jahr Variabilität für die Sommermitteltemperaturen – mit Anzeichen in Richtung Dürren – projiziert. Fischer et al. (2014) zeigte auf, dass sich die Niederschlagsvariabilität ebenfalls ändern wird (Abnahme der Frequenz). Für den Sommer wird gemäss Autoren bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine Abnahme der Anzahl Niederschlagstage erwartet.

Unschärfen der Naturgefahren

Die Veränderungen der Naturgefahren werden mit Hilfe vorhandener Klimainformationen abgeleitet – wie beispielsweise die Naturgefahr Hochwasser. Die Veränderungen sind mit Unsicherheiten verbunden. Sie werden in grobe Klassen eingestuft und als sogenannte Unschärfeklassen angegeben. Die Definitionen dieser Unschärfeklassen sind im Hauptbericht (INFRAS/Egli Engineering 2015a) angegeben.

Abbildung 13: Sensitivität der Änderung der Frequenz von Temperatur und Niederschlag

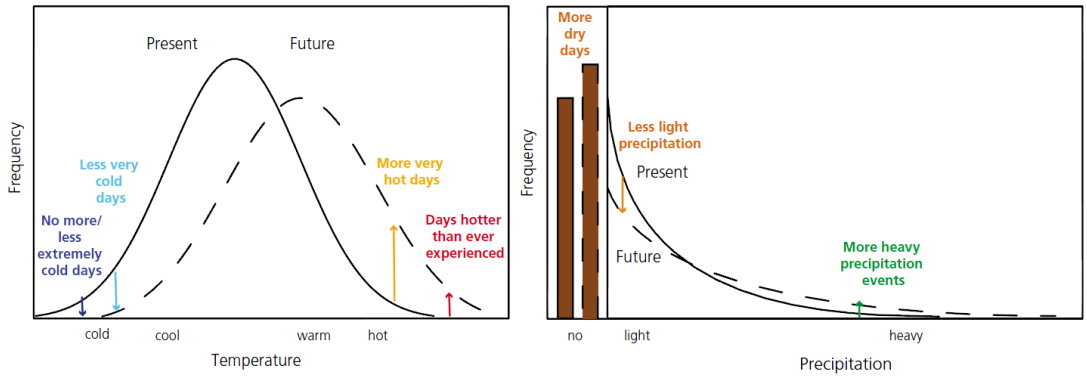


Illustration potenzieller Änderungen der Frequenz und Intensität der Temperatur- und Niederschlagsextreme in einem sich ändernden Klima. Aktuelle und potenzielle Verteilungen sind mit ausgezogenen respektive gestrichelten Linien dargestellt. Quelle: CH2011 (2011).

Änderung der Unsicherheitsbetrachtung im Vergleich zur Fallstudie Uri

Im Gegensatz zur Fallstudie Uri (INFRAS/Egli Engineering 2015b) werden die klimarelevanten Grössen wie die Temperatur, der Niederschlag und verschiedene Klimaindikatoren für die Fallstudien Basel-Stadt und Genf ohne Unsicherheiten angegeben. Wie oben beschrieben werden die beiden *Klimaszenarien schwach und stark* als fixe Szenarien betrachtet. Die aus den Daten von CH2011 (2011) berechneten klimarelevanten Grössen für die beiden Fallstudien entsprechen bereits den vordefinierten *Klimaszenarien schwach und stark*, welche per Definition einer klassischen Szenarienbetrachtung keine Unsicherheiten ausweisen.

Das Vorgehen in der Fallstudie Uri (INFRAS/Egli Engineering 2015b) führte dazu, dass zusätzlich zur Betrachtung der beiden *Klimaszenarien schwach* und *stark* auch noch eine Art Modellunsicherheit in Bezug auf die Berechnung dieser Szenarien-Grössen miteingeflossen ist, welche über die eigentliche Szenarienbetrachtung hinausging.

1.2.2. Veränderung der Temperatur und des Niederschlags 2060: Basel-Stadt und Genf

Temperaturveränderung ohne Wärmeinsel-Effekt

Veränderung der Jahresmitteltemperatur

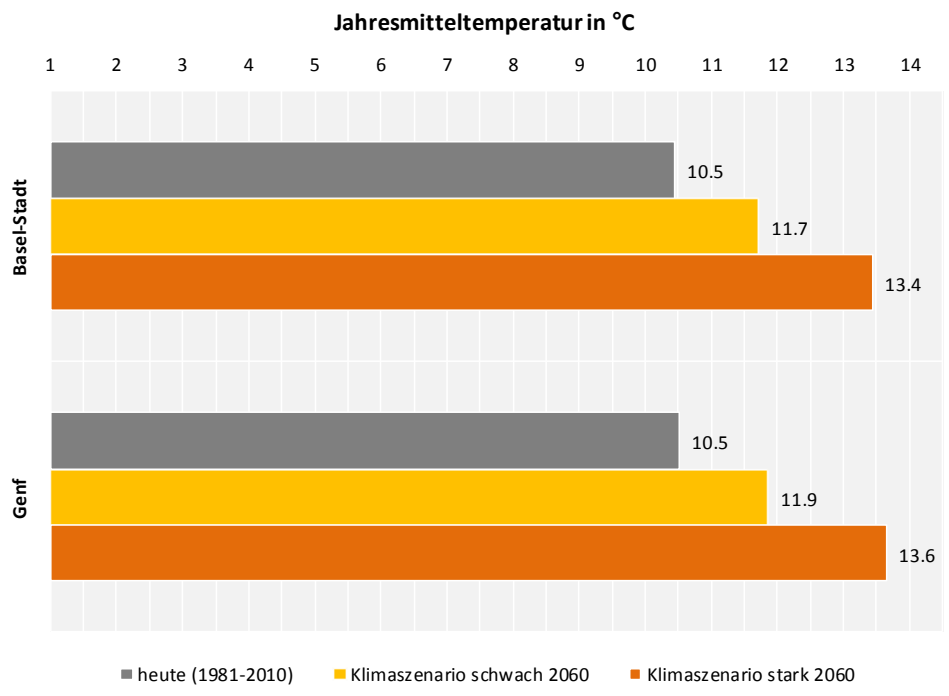
Projektionen der zukünftigen Klimaänderung basieren auf numerischen Modellen, welche physikalische Prozesse im Klimasystem simulieren (CH2011 2011). Klimamodelle sind heute in der Lage, die wichtigsten Klimagrössen der Vergangenheit mit hinreichender Genauigkeit wiederzugeben und entsprechend vorherzusagen. Für die Temperatur können relativ zuverlässige Aussagen für die Zukunft gemacht werden (MeteoSchweiz 2013a).

Abbildung 14 illustriert die mittlere Jahrestemperatur von Basel-Stadt und Genf für die *Klimaszenarien schwach* und *stark* im Jahr 2060, sowie der Normperiode 1981-2010 (*heute*). Bis 2060 ist an beiden Messstationen eine deutliche Temperaturzunahme zu erwarten. Die Zunahme fällt für das *Klimaszenario stark* deutlicher aus. An der Station Basel/Binningen (BAS) wird eine mittlere Temperaturzunahme von +1.2°C für das *Klimaszenario schwach* und +2.9°C für das *Klimaszenario stark* projiziert. Ähnliches ist für 2060 auch in Genf zu erwarten, wo die mittleren Jahrestemperaturen um +1.4°C respektive +3.1°C zunehmen werden.

Bei diesen Überlegungen darf nicht ausser Acht gelassen werden, dass es sich hierbei lediglich um zu erwartende Jahresmittelwerte der Klimaszenarien handelt.

Die meisten grossen Agglomerationen erwarten um 2060 Sommermitteltemperaturen von über 21°C. Dies bedeutet ähnliche Verhältnisse wie sie im Hitzesommer 2003 vorgeherrscht haben (MeteoSchweiz 2013a).

Abbildung 14: Jahresmitteltemperatur heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf



Jahresmitteltemperaturen (gerundet) *heute* (grau), und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange) an den Stationen Basel/Binningen (BAS) und Genève-Cointrin (GVE). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

Veränderung der Niederschlagssummen

Veränderung der saisonalen und jährlichen Niederschlagssummen

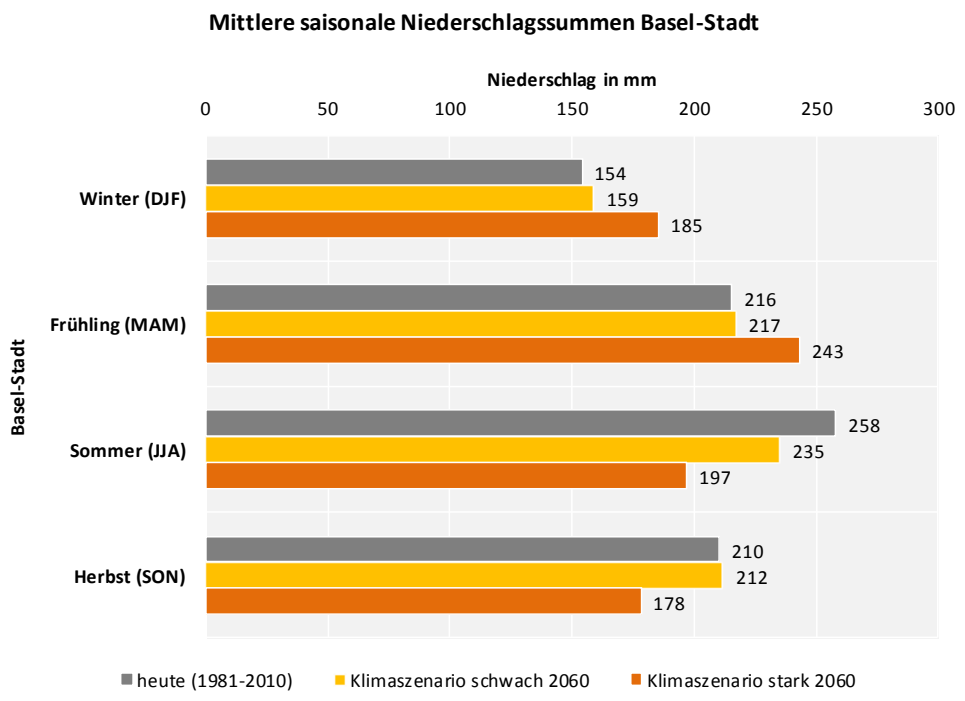
Die berechneten saisonalen Niederschlagssummen für das Jahr 2060 sind mit grösseren Unsicherheiten behaftet als die Projektionen der Temperatur. Aufgrund der Definition der beiden *Klimaszenarien schwach* und *stark* (siehe Abschnitt 1.2.1) resultiert grundsätzlich eine Zunahme der mittleren saisonalen Niederschlagssummen im Winter und Frühling und eine Abnahme dieser im Sommer und Herbst.

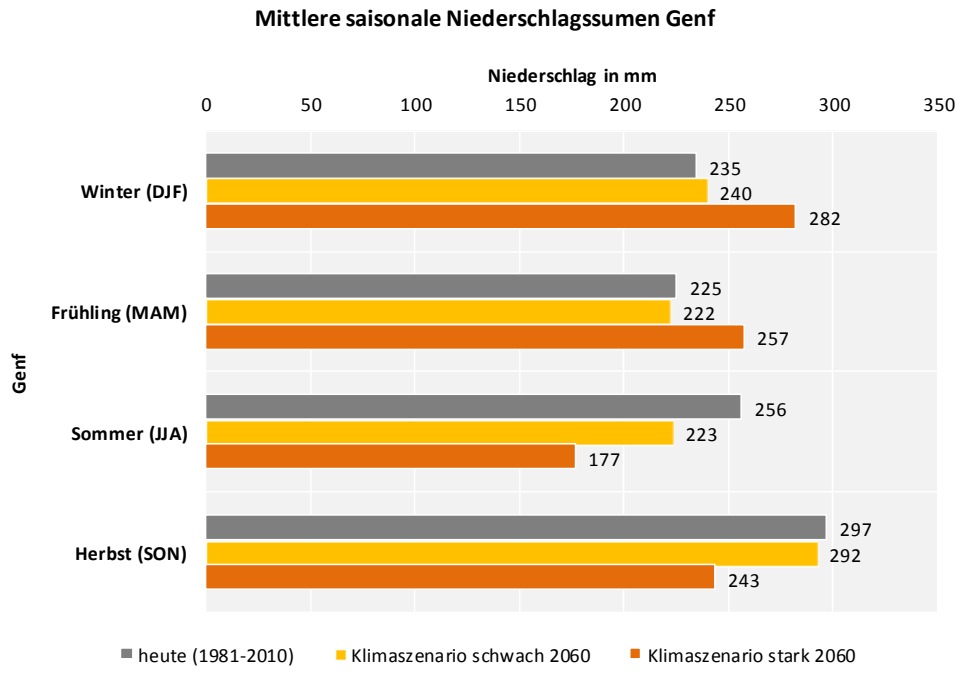
Dieser Umstand soll jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass die mittleren saisonalen Niederschlagssummen auch während den Wintermonaten gleichermassen abnehmen könnten. Das *Klimaszenario schwach* verwendet den Median des RCP3PD-Szenarios, der in Bezug auf die Änderung sehr nahe am Nullpunkt liegt (keine Änderung). Die geringen Schwankungen bei den jahreszeitlichen Änderungen lassen sich daher nur bedingt interpretieren.

Die bei eintretendem *Klimaszenario stark* zu erwartenden Änderungen der mittleren saisonalen Niederschlagssummen zeigen ein deutlicheres Signal. Im Winter und Frühling nehmen die Niederschläge zwischen 13 und 20% zu. Im Sommer und Herbst werden Abnahmen der mittleren saisonalen Niederschlagssummen zwischen 15 und 30% erwartet (Abbildung 15).

Betrachtet man die jährlichen Niederschlagssummen, wird das Gesamtbild deutlich geglättet (Abbildung 16). Die Änderungen beider Klimaszenarien sind im Vergleich zur heutigen Referenz gering (-4% bis -5%). Die Auswirkungen einer Verschiebung der saisonalen Niederschläge (Veränderung des Niederschlagsregimes) bis 2060 werden im Hauptbericht genauer betrachtet.

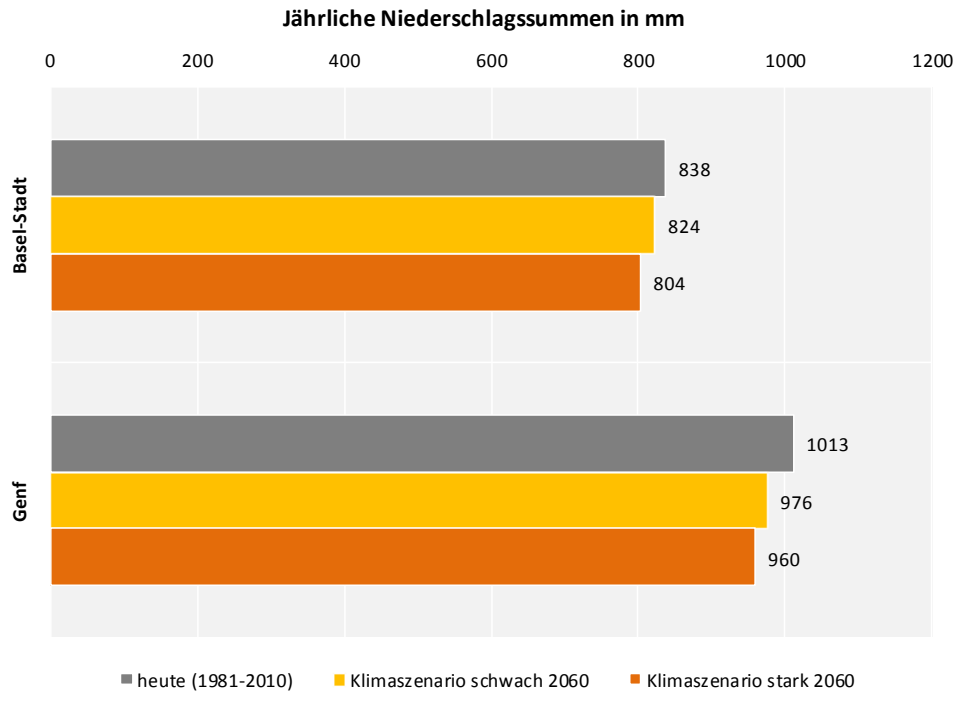
Abbildung 15: Mittlere saisonale Niederschlagssummen in Basel-Stadt und Genf





Mittlere saisonale Niederschlagssummen (gerundet) *heute* (grau) und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange) an den Stationen Basel/Binningen (BAS) und Genève-Cointrin (GVE). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

Abbildung 16: Jährliche Niederschlagssummen in Basel-Stadt und Genf



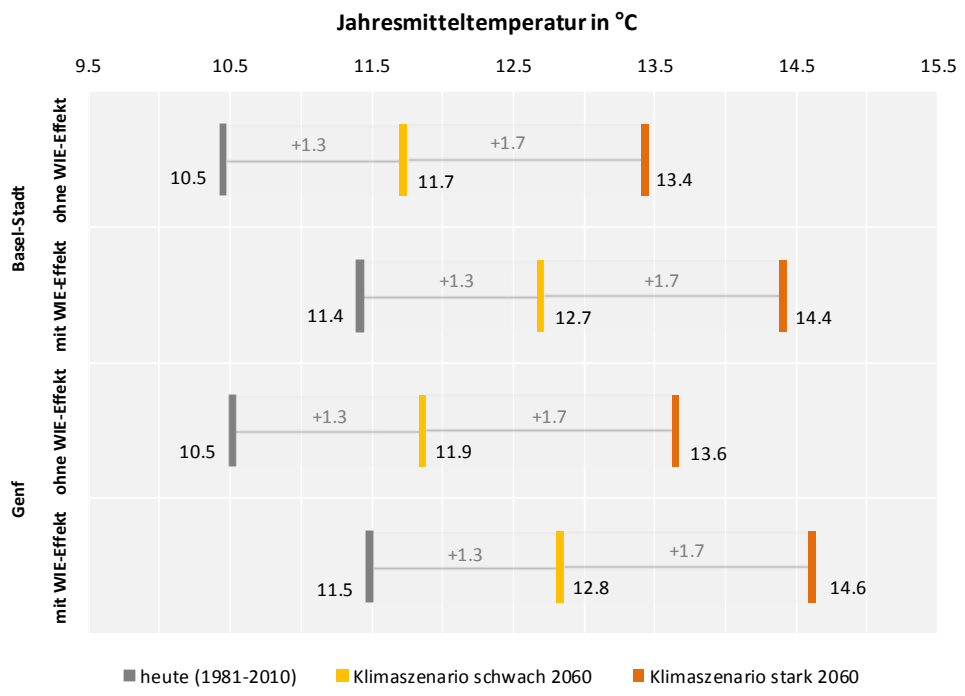
Jährliche Niederschlagssummen (gerundet) *heute* (grau) und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange) an den Stationen Basel/Binningen (BAS) und Genève-Cointrin (GVE). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

Temperaturveränderung mit Wärmeinsel-Effekt

Veränderung der Jahresmitteltemperatur mit Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts

Betrachtet man die Veränderung der Jahresmitteltemperatur unter Berücksichtigung des städtischen Wärmeinsel-Effekts (WIE), so zeigen sich aufgrund der gewählten Methodik (siehe INFRAS 2015) die gleichen Veränderungen in der mittleren Temperatur bis 2060 wie ohne Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts. Das Niveau der Temperatur ist jedoch insgesamt höher. Abbildung 17 illustriert die mittlere Jahrestemperatur von Basel-Stadt und Genf jeweils mit und ohne den WIE für den Zustand *heute* und um 2060 für die beiden betrachteten *Klimaszenarien schwach* und *stark*.

Abbildung 17: Jahresmitteltemperatur mit und ohne Wärmeinsel-Effekt in Basel-Stadt und Genf

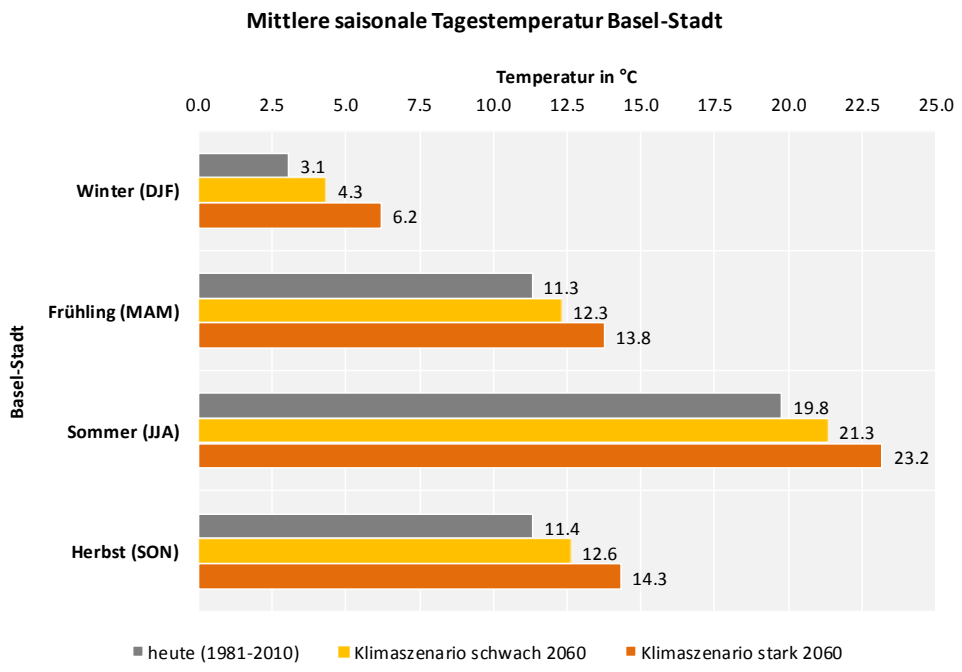


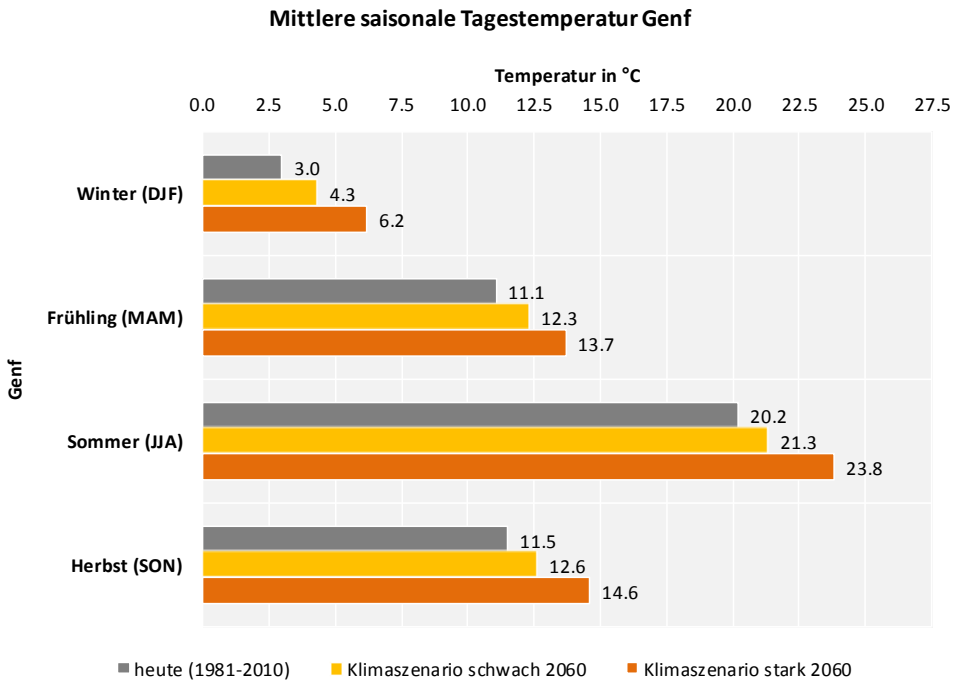
Dargestellt sind die Jahresmitteltemperaturen (gerundet) *heute* (grau) 2060 *Klimaszenario schwach* (gelb), 2060 *Klimaszenario stark* (orange) ohne Wärmeinsel-Effekt (WIE) (jeweils obere Reihe) und mit Wärmeinsel-Effekt (WIE) (jeweils untere Reihe). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

Veränderung der saisonalen Temperatur heute – 2060 mit Wärmeinsel-Effekt

Die Veränderung der saisonalen Tagesmitteltemperaturen für die Städte Basel-Stadt und Genf sind unten aufgeführt. Die Änderungen berücksichtigen den städtischen Wärmeinsel-Effekt (siehe INFRAS 2015). Die beiden Agglomerationen Basel-Stadt und Genf erwarten für die beiden Klimaszenarien Sommermitteltemperaturen von über 21°C. Das bedeutet ähnliche Verhältnisse wie im Hitzesommer 2003 (MeteoSchweiz 2013a).). Die Daten wurden von MeteoSchweiz (2014d) zur Verfügung gestellt.

Abbildung 18: Mittlere saisonale Tagestemperatur mit Wärmeinsel-Effekt in Basel-Stadt und Genf





Dargestellt sind die mittleren saisonalen Tagesmitteltemperaturen (gerundet) *heute* (grau), 2060 *Klimaszenario schwach* (gelb), 2060 *Klimaszenario stark* (orange) mit Wärmeinsel-Effekt für Basel-Stadt (oben) und Genf (unten). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

1.2.3. Veränderung verschiedener Klimaindikatoren

Temperaturbasierte Klimaindikatoren sind mit geringeren Unsicherheiten behaftet als niederschlagsbasierte. Während bei den meisten temperaturbasierten Klimaindikatoren bis 2060 grössere Änderungen auftreten, wurde in der hier verwendeten Methode die Anzahl nasser Tage konstant gehalten. Es werden somit nur Änderungen in Niederschlagsmengen berücksichtigt, aber nicht in der Häufigkeit der Niederschläge (MeteoSchweiz 2013a).

Die hier gezeigten Indikatoren basieren auf der Methodik von Zubler et al. (2014a, b). In der Folge sind für alle Indikatoren jeweils Jahresmittelwerte über 30-jährige Perioden dargestellt.

Hitzeindikatoren ohne Wärmeinsel-Effekt

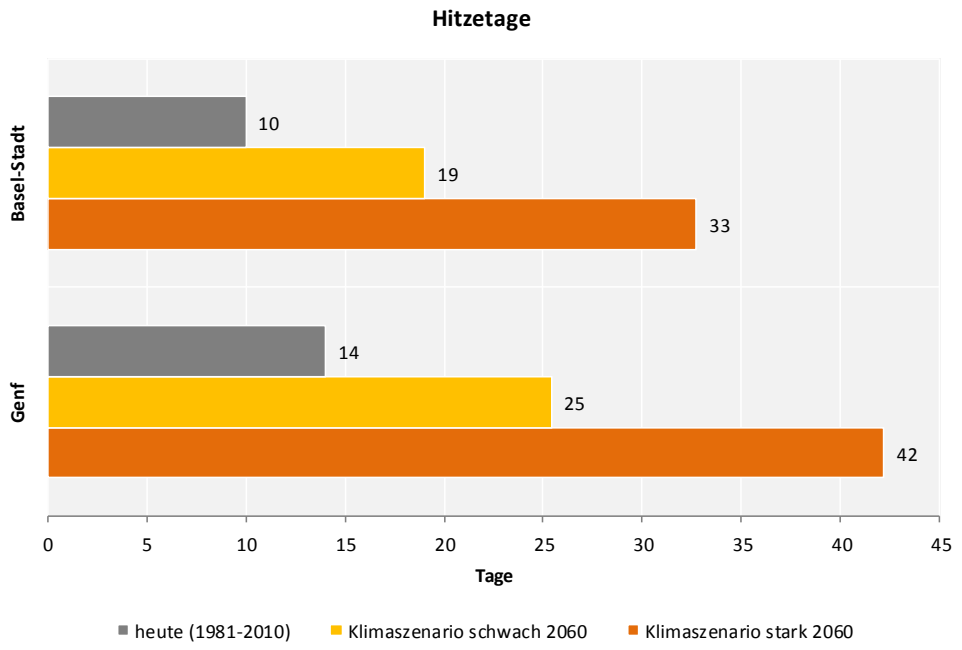
Veränderung der Anzahl Hitzetage[4]

An der Station Basel/Binningen (BAS) werden heute im Mittel 10 Hitzetage registriert. Bis ins Jahr 2060 wird beinahe eine Verdoppelung (+9 Tage) für das *Klimaszenario schwach* und eine Zunahme von rund 23 Tagen für das *Klimaszenario stark* erwartet. Zum Vergleich: Im Hitzesommer 2003 wurden in Basel/Binningen über 42 Hitzetage registriert.

Etwas ausgeprägter zeigt sich die Entwicklung in Genf. An der Station Genève-Cointrin (GVE) kommen heute rund 14 Hitzetage vor. Unter Berücksichtigung des *Klimaszenarios schwach* werden bis 2060 gegen 25 Hitzetage erwartet (+11 Tage). Betrachtet man die Situation bei Eintreffen des *Klimaszenarios stark* werden im Mittel 42 Hitzetage zu erwarten sein (+28 Tage). Im Hitzesommer 2003 wurden rund 50 Hitzetage gemessen.
Hitzeereignisse eines normalen Sommers könnten daher im Jahre 2060 durchaus die Dimensionen des Hitzesommers 2003 erreichen.

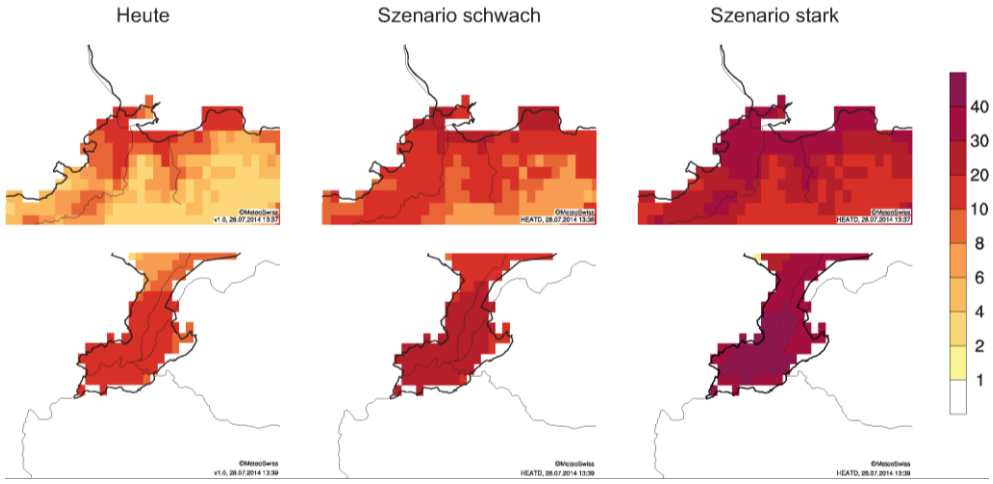
[4] Hitzetage: Tage mit Maximaltemperatur >= 30°C.

Abbildung 19: Hitzetage heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf



Anzahl Hitzetage (gerundet) *heute* (grau) und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange) an den Stationen Basel/Binningen (BAS) und Genève-Cointrin (GVE). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

Abbildung 20: Räumliche Verteilung der mittleren Anzahl Hitzetage in Basel-Stadt und Genf



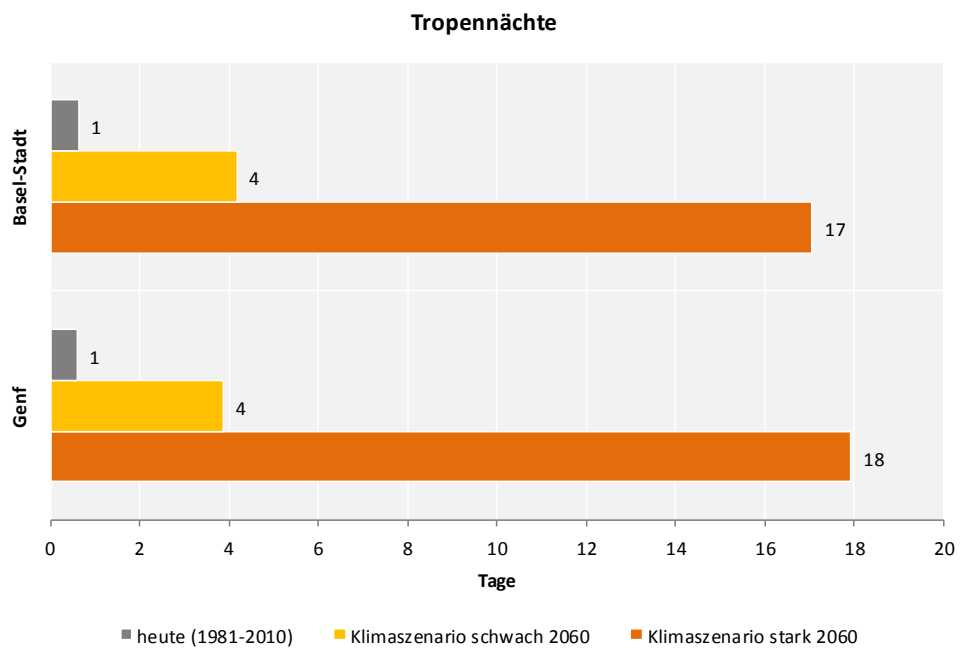
Räumliche Verteilung der mittleren Anzahl Hitzetage in Basel-Stadt (oben) und Genf (unten) für den Zustand *heute* (links), das *Klimaszenario schwach* 2060 (Mitte) und *stark* 2060 (rechts). Karten von MeteoSchweiz (2014d).

Veränderung der Anzahl Tropennächte[5]

An der Station Basel/Binningen (BAS) wird heute im Mittel eine Tropennacht pro Jahr registriert. Bis ins Jahr 2060 wird dieser Wert im Mittel auf 4 Tropennächte (*Klimaszenario schwach*) respektive 17 Tropennächte (*Klimaszenario stark*) zunehmen. Im Hitzesommer 2003 wurden am Standort Basel/Binningen 7 Tropennächte gemessen.

An der Station Genève-Cointrin (GVE) ist heute im Mittel auch eine Tropennacht pro Jahr zu erwarten (gerundet). Unter Berücksichtigung des *Klimaszenarios schwach* werden bis 2060 gegen 4 Tropennächte erwartet. Betrachtet man die Situation bei Eintreffen des *Klimaszenarios stark* werden im Mittel 18 Tropennächte zu erwarten sein. Im Hitzesommer 2003 wurden zum Vergleich 4 Tropennächte aufgezeichnet.

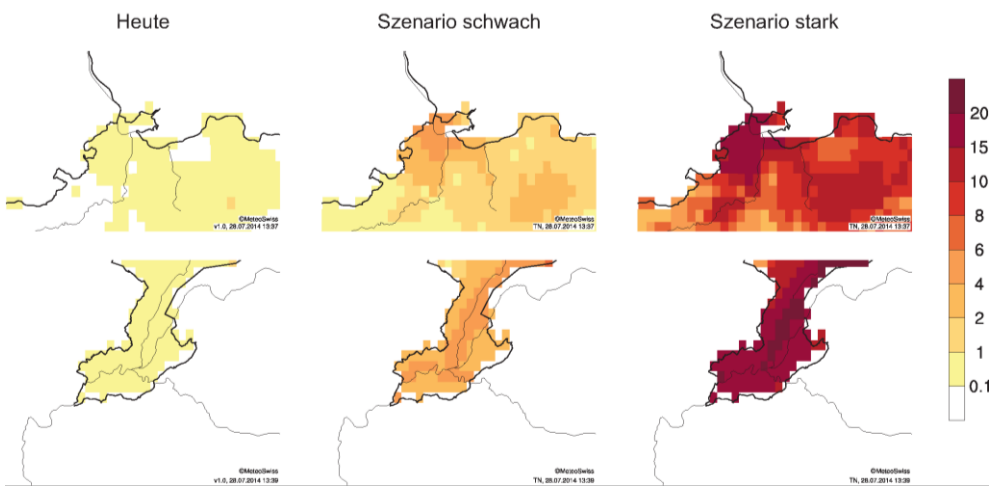
Abbildung 21: Tropennächte heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf



Anzahl Tropennächte (gerundet) *heute* (grau) und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange) an den Stationen Basel/Binningen (BAS) und Genève-Cointrin (GVE). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

[5] Tropennächte: Tage mit Minimaltemperatur >= 20°C

Abbildung 22: Räumliche Verteilung der Tropennächte in Basel-Stadt und Genf



Räumliche Verteilung der Anzahl Tropennächte in der Schweiz für den Zustand *heute* (oben), das *Klimaszenario schwach* 2060 (Mitte) und das *Klimaszenario stark* 2060 (unten). Karten von MeteoSchweiz (2014d).

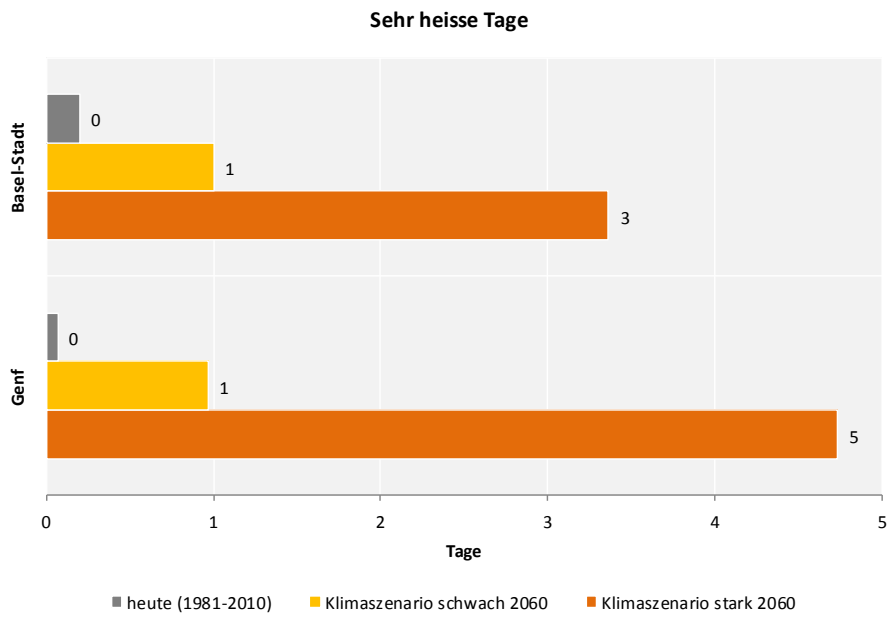
Veränderung der Anzahl "sehr heisse Tage"[6]

"Sehr heisse Tage" treten *heute* im langjährigen Mittel mit Ausnahme einzelner Jahre (e.g. 2003, 2006, 2007) in der Schweiz nicht auf. Bis ins Jahr 2060 nimmt deren Anzahl bei Eintreffen des *Klimaszenarios schwach* nur minim auf rund einen Tag pro Jahr zu (Mittelwert). Die Anzahl "sehr heisse Tage" steigt im *Szenario stark* in Basel-Stadt auf 5. Für den Hitzesommer 2003 wurden in der Region Basel 5 "sehr heisse Tage" registriert.

Für Genf präsentiert sich das Bild ähnlich. Zum Zeitpunkt *heute* werden im Mittel keine "sehr heisse Tage" beobachtet. Dort steigt deren Anzahl bis 2060 auf einen (*Klimaszenario schwach*) respektive 3 (*Klimaszenario stark*) an. Im Hitzesommer 2003 wurden in der Region Genf 3 "sehr heisse Tage" gemessen.

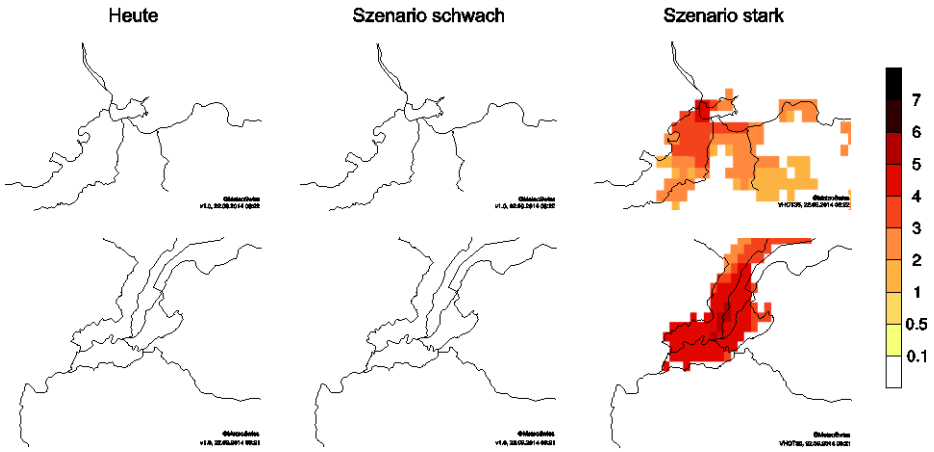
[6] "sehr heisse Tage": Tage mit Maximaltemperatur >35°C und Minimaltemperatur >20°C.

Abbildung 23: "Sehr heisse Tage" heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf



Anzahl "sehr heisse Tage" (gerundet) *heute* (grau) und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange) an den Stationen Basel/Binningen (BAS) und Genève-Cointrin (GVE). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d). Die Anzahl Tage geringer als 1 sind Werte, die sich gemittelt über die Referenzperiode ergeben. Aufgrund von Rundungsdifferenzen und dem Vergleich von Rasterdaten (Abbildung 24) mit punktuellen Messdaten (Zustand heute in Abbildung 23) entstehen in der Darstellung leicht verschiedene Angaben zur Anzahl „sehr heisser Tage", welche sich jedoch auf dieselbe Datengrundlage beziehen.

Abbildung 24: Räumliche Verteilung der "sehr heissen Tage" in Basel-Stadt und Genf



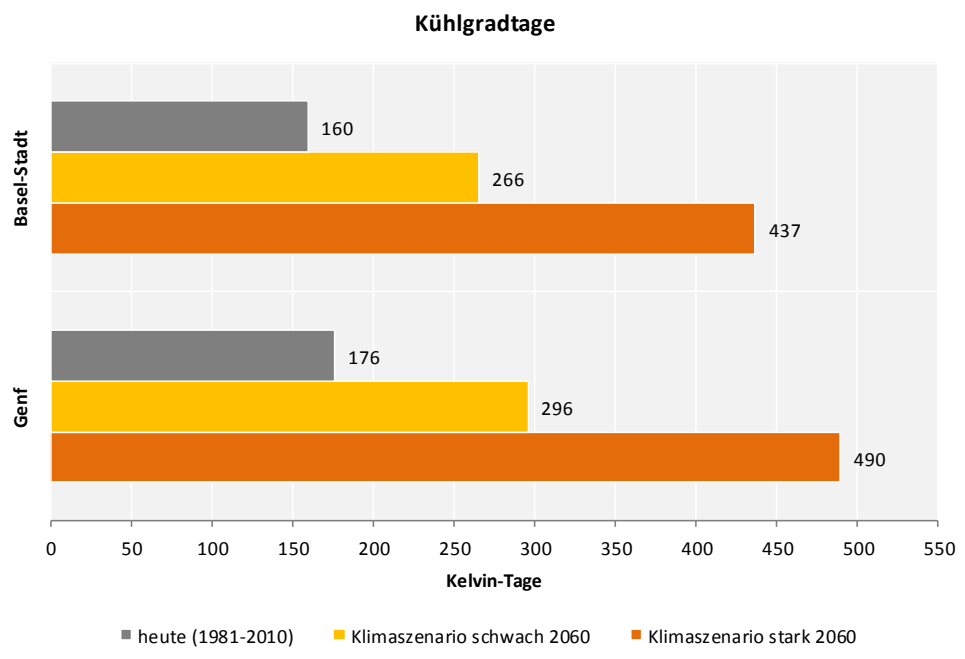
Räumliche Verteilung der Anzahl "sehr heisse Tage" in der Schweiz für den Zustand *heute* (oben), das *Klimaszenario schwach* 2060 (Mitte) und das *Klimaszenario stark* 2060 (unten). Karten von MeteoSchweiz (2014d).

Veränderung der Kühlgradtage[7]

In Basel/Binningen (BAS) werden heute im Mittel 160 Kühlgradtage registriert. Bis ins Jahr 2060 wird dieser Wert auf 266 (*Klimaszenario schwach*) respektive 437 Kühlgradtage (*Klimaszenario stark)* zunehmen.

In Genève-Cointrin (GVE) dürfen heute 176 Kühlgradtage erwartet werden. Unter Berücksichtigung des *Klimaszenarios schwach* werden bis 2060 296 Kühlgradtage erwartet. Betrachtet man die Situation bei Eintreffen des *Klimaszenarios stark,* könnten im Mittel 490 Kühlgradtage gemessen werden.

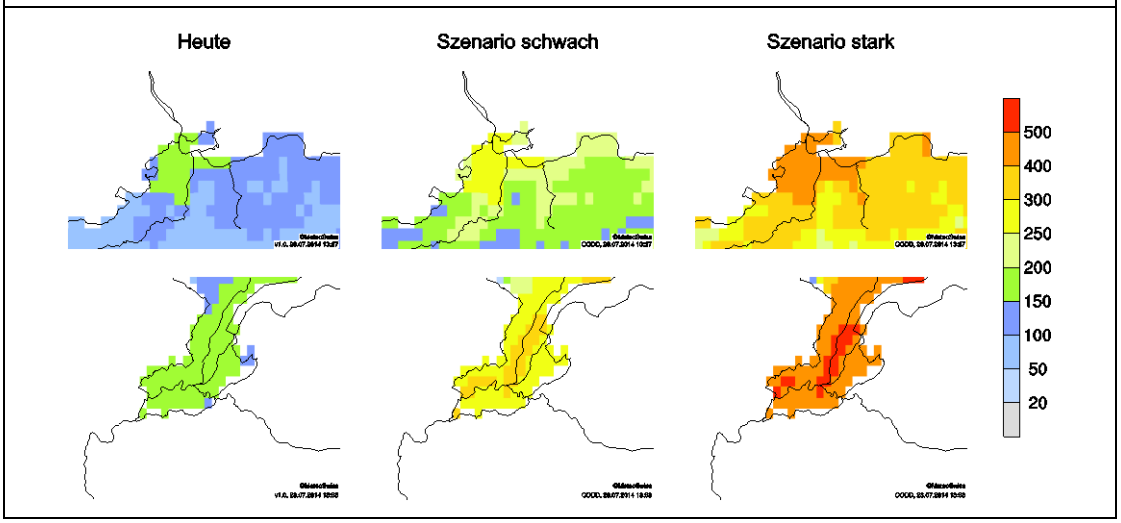
Abbildung 25: Mittlere Anzahl Kühlgradtage heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf



Anzahl Kühlgradtage [Kelvin-Tage] (gerundet) *heute* (grau) und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange) an den Stationen Basel/Binningen (BAS) und Genève-Cointrin (GVE). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

[7] Kühlgradtage: Die Summe der täglich ermittelten Differenzen zwischen einer angestrebten Raumlufttemperatur (18.3°C) und des Tagesmittels der Aussenlufttemperatur 2m über Boden aller Kühltage [Kelvin-Tage].

Abbildung 26: Räumliche Verteilung der mittleren Anzahl Kühlgradtage in Basel-Stadt und Genf



Räumliche Verteilung der mittleren Anzahl Kühlgradtage [Kd] in Basel-Stadt (oben) und Genf (unten) für den Zustand *heute* (links), das *Klimaszenario schwach* 2060 (Mitte) und das *Klimaszenario stark* 2060 (rechts). Karten von MeteoSchweiz (2014d).

Hitzeindikatoren mit Wärmeinsel-Effekt

Für die folgenden Hitzeindikatoren wurde ein mittlerer Wärmeinsel-Zuschlag gemäss INFRAS (2015) angewandt.

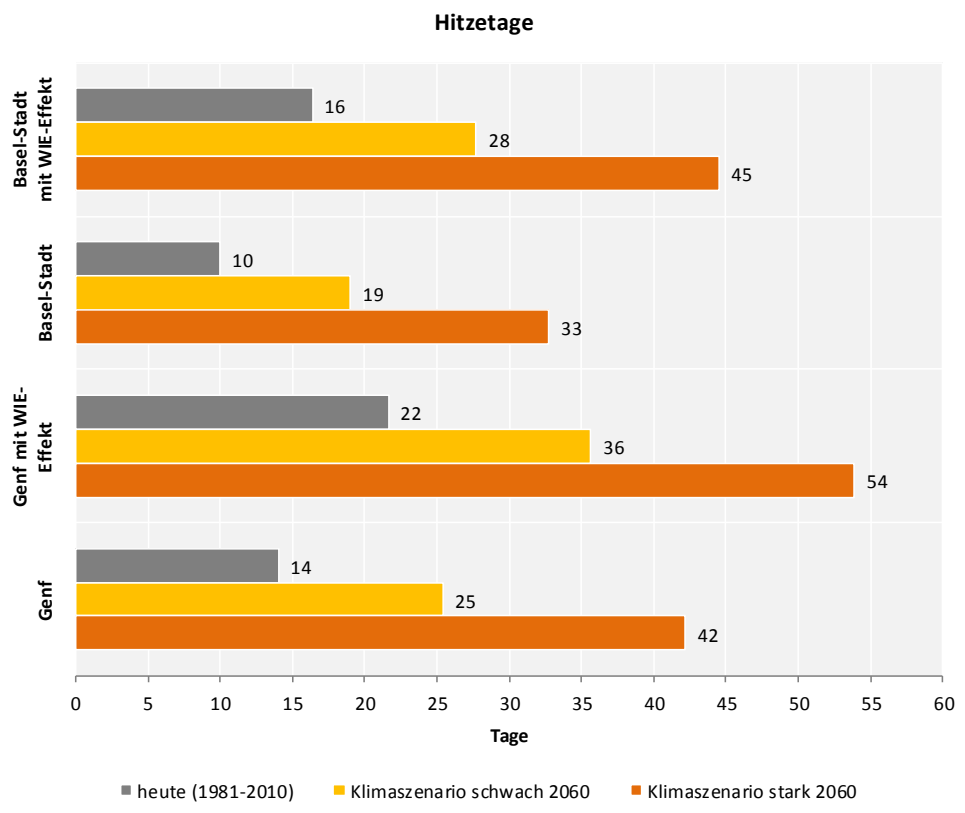
Veränderung der Anzahl Hitzetage[8] mit Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts

Wird ein mittlerer Wärmeinsel-Zuschlag berücksichtigt, so verändert sich die Anzahl Hitzetage wie folgt: In der Kernstadt von Basel werden im Mittel 16 Hitzetage erreicht (+6 Hitzetage gegenüber Basel/Binningen). Bis ins Jahr 2060 werden für das *Klimaszenario schwach* in der Kernstadt 28 Hitzetage projiziert (+9 Hitzetage gegenüber Basel/Binningen) und für das *Klimaszenario stark* sogar 45 Hitzetage (+12 Hitzetage gegenüber Basel/Binningen). Zum Vergleich: Im Hitzesommer 2003 wurden in Basel/Binningen über 41 Hitzetage gemessen.

Betrachtet man Genf unter Berücksichtigung eines mittleren Wärmeinsel-Zuschlags, so werden in der Kernstadt *heute* im Mittel 22 Hitzetage gezählt (+8 Hitzetage gegenüber Genève-Cointrin). Für das *Klimaszenario schwach* bedeutet dies bis 2060, dass rund 36 Hitzetage (+11 Hitzetage gegenüber Genève-Cointrin) erwartet werden dürften. Für das *Klimaszenario stark* sind es 54 Hitzetage (+12 Hitzetage gegenüber Genève-Cointrin). Im Hitzesommer 2003 wurden rund 50 Hitzetage an der Station Genève-Cointrin (GVE) aufgezeichnet.

[8] Hitzetage: Tage mit Maximaltemperatur >= 30°C.

Abbildung 27: Hitzetage mit und ohne Wärmeinsel-Effekt heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf



Anzahl Hitzetage (gerundet) mit und ohne Wärmeinsel-Effekt (WIE) *heute* (grau) und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange). Wärmeinsel-Zuschlag gemäss INFRAS (2015). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

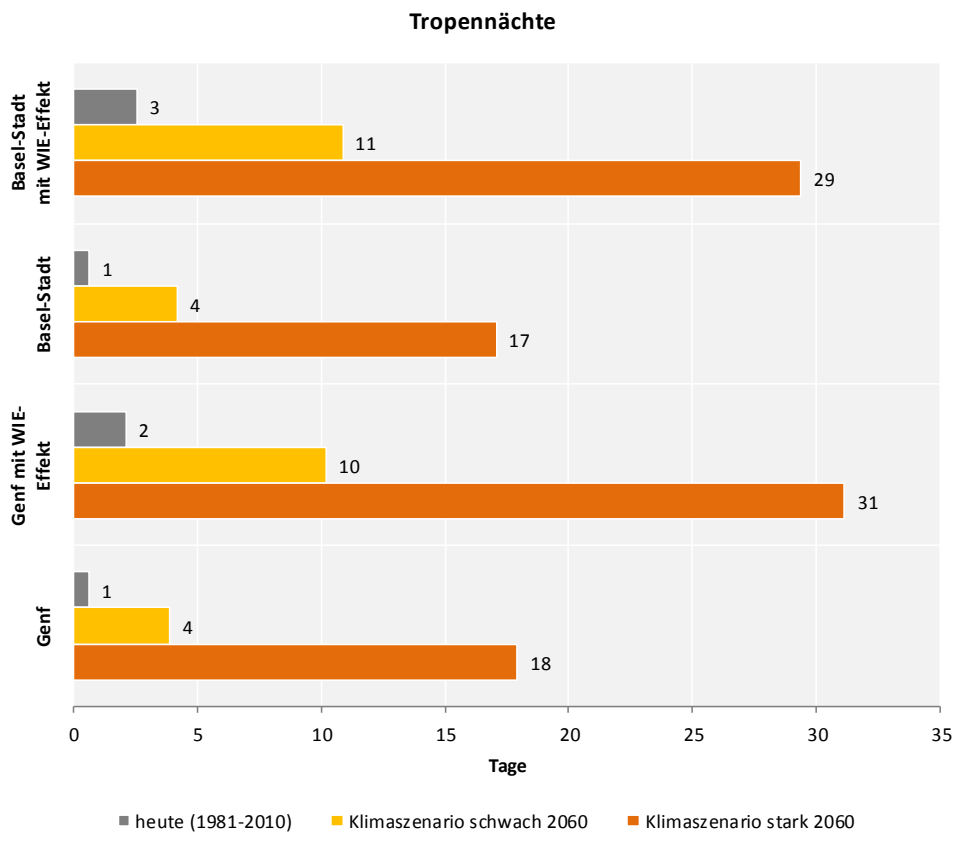
Veränderung der Anzahl Tropennächte[9] mit Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts

Berücksichtigt man einen mittleren Wärmeinsel-Zuschlag gemäss INFRAS (2015), so verändert sich die Anzahl Tropennächte wie folgt: In der Kernstadt von Basel werden im Mittel 3 Tropennächte erreicht (+2 Tropennächte gegenüber Basel/Binningen). Bis ins Jahr 2060 werden für das *Klimaszenario schwach* in der Kernstadt 11 Tropennächte projiziert (+7 Tropennächte gegenüber Basel/Binningen) und mit einem *Klimaszenario stark* gar 29 Tropennächte (+13 Tropennächte gegenüber Basel/Binningen). Zum Vergleich: Im Hitzesommer 2003 wurden in Basel/Binningen rund 4 Tropennächte registriert.

[9] Tropennächte: Tage mit Minimaltemperatur >= 20°C

Betrachtet man Genf unter Berücksichtigung eines mittleren Wärmeinsel-Zuschlags, so werden in der Kernstadt heute im Mittel 2 Tropennächte gemessen (+1 Tropennächte gegenüber Genève-Cointrin). Für das *Klimaszenario schwach* bedeutet dies bis 2060, dass rund 10 Tropennächte (+6 Tropennächte gegenüber Genève-Cointrin) erwartet werden dürften, während für das *Klimaszenario stark* gar 31 Tropennächte (+12 Tropennächte gegenüber Genève-Cointrin) projiziert werden. Im Hitzesommer 2003 wurden 4 Tropennächte an der Station Genève-Cointrin (GVE) gemessen.

Abbildung 28: Tropennächte mit und ohne Wärmeinsel-Effekt heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf



Anzahl Tropennächte (gerundet) mit und ohne Wärmeinsel-Effekt (WIE) *heute* (grau) und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange). Wärmeinsel-Zuschlag gemäss INFRAS (2015). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d)

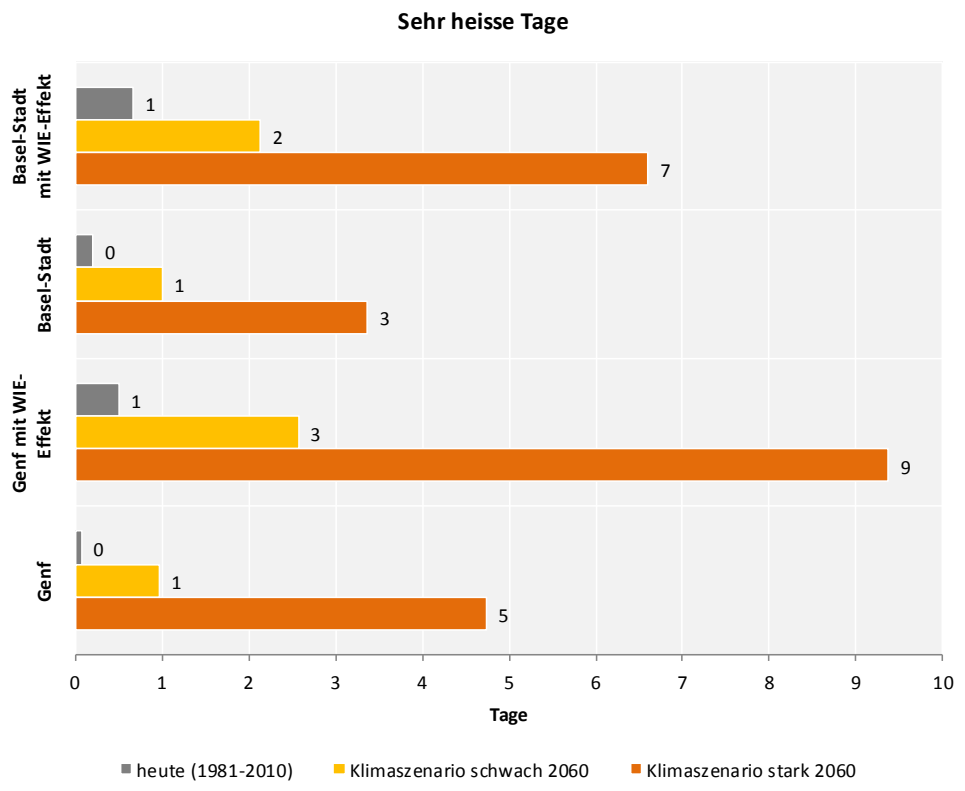
Veränderung der Anzahl "sehr heisse Tage"[10] mit Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts

Addiert man einen mittleren Wärmeinsel-Zuschlag für die Kernstadt von Basel-Stadt dazu, wird *heute* pro Jahr rund 1 "sehr heisser Tag" verzeichnet (+1 "sehr heisser Tag" gegenüber Basel/Binningen). Bis ins Jahr 2060 nimmt deren Anzahl bei Eintreffen des *Klimaszenarios schwach* nur minim auf im Mittel rund 2 "sehr heisse Tage" pro Jahr zu (+1 "sehr heisser Tag" gegenüber Basel/Binningen). Beträchtlicher fällt der Anstieg bei eintreffendem *Klimaszenario stark* aus. Die Anzahl "sehr heisse Tage" steigt in der Kernstadt von Basel-Stadt auf knapp 7 (+4 "sehr heisse Tage" gegenüber Basel/Binningen). Als Referenzwert: Für den Hitzesommer wurden in der Region Basel 5 "sehr heisse Tage" gemessen.

Für Genf präsentiert sich das Bild wie folgt: *Heute* wird Mittel, unter Berücksichtigung eines mittleren Wärmeinsel-Effekts, ebenfalls rund 1 "sehr heisser Tag" registriert (+1 "sehr heisser Tag" gegenüber Genève-Cointrin). Die Anzahl "sehr heisse Tage" nimmt bis 2060 stetig zu und erreicht bei einem *Klimaszenario schwach* rund 3 "sehr heisse Tage" (+2 "sehr heisse Tage" gegenüber Genève-Cointrin) und gar 9 "sehr heisse Tage" für das *Klimaszenario stark* (+4 "sehr heisse Tage" gegenüber Genève-Cointrin). Im Hitzesommer 2003 wurden in der Region Genf 3 "sehr heisse Tage" aufgezeichnet.

[10] "sehr heisse Tage": Tage mit Maximaltemperatur >35°C und Minimaltemperatur >20°C.

Abbildung 29: "Sehr heisse Tage" mit und ohne Wärmeinsel-Effekt heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf



Anzahl "sehr heisse Tage" (gerundet) mit und ohne Wärmeinsel-Effekt (WIE) *heute* (grau) und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange). Wärmeinsel-Zuschlag gemäss INFRAS (2015). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

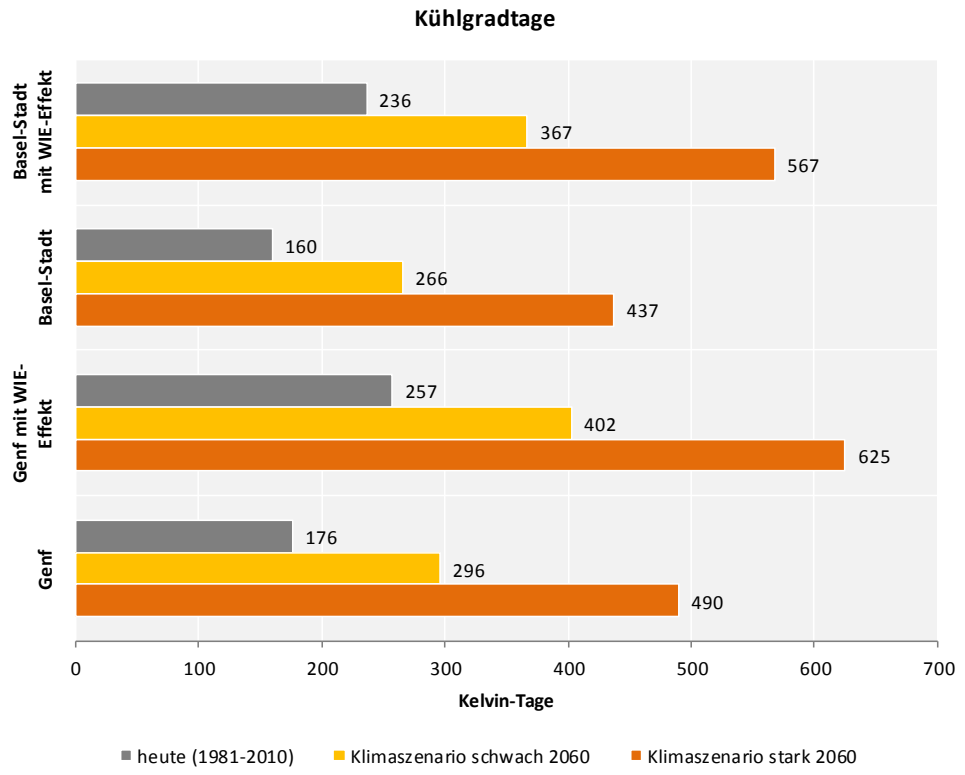
Veränderung der Anzahl Kühlgradtage[11] mit Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts

Addiert man einen mittleren Wärmeinsel-Zuschlag für die Kernstadt von Basel-Stadt dazu, werden heute pro Jahr 236 Kühlgradtage verzeichnet (+76 Kühlgradtage gegenüber Basel/Binningen). Bis ins Jahr 2060 nimmt deren Anzahl bei Eintreffen des *Klimaszenarios schwach* auf im Mittel 367 Kühlgradtage pro Jahr zu (+101 Kühlgradtage gegenüber Basel/Binningen). Beträchtlicher fällt der Anstieg bei eintreffendem *Klimaszenario stark* aus. Die Kühlgradtage steigen in der Kernstadt von Basel-Stadt auf 567 (+130 Kühlgradtage gegenüber Basel/Binningen).

[11] Kühlgradtage: Die Summe der täglich ermittelten Differenzen zwischen einer angestrebten Raumlufttemperatur (18.3°C) und des Tagesmittels der Aussenlufttemperatur 2m über Boden aller Kühltage [Kelvin-Tage].

Für Genf präsentiert sich das Bild wie folgt: Heute werden im Mittel - unter Berücksichtigung eines mittleren Wärmeinsel-Effekts - 257 Kühlgradtage registriert (+81 Kühlgradtage gegenüber Genève-Cointrin). Die Kühlgradtage nehmen bis 2060 stetig zu und erreichen bei einem *Klimaszenario schwach* 402 Kühlgradtage (+106 Kühlgradtage gegenüber Genève-Cointrin) und gar 625 Kühlgradtage für das *Klimaszenario stark* (+135 Kühlgradtage gegenüber Genève-Cointrin).

Abbildung 30: Kühlgradtage mit und ohne Wärmeinsel-Effekt heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf



Kühlgradtage [Kelvin-Tage] (gerundet) mit und ohne Wärmeinsel-Effekt (WIE) *heute* (grau) und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange). Wärmeinsel-Zuschlag gemäss INFRAS (2015). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

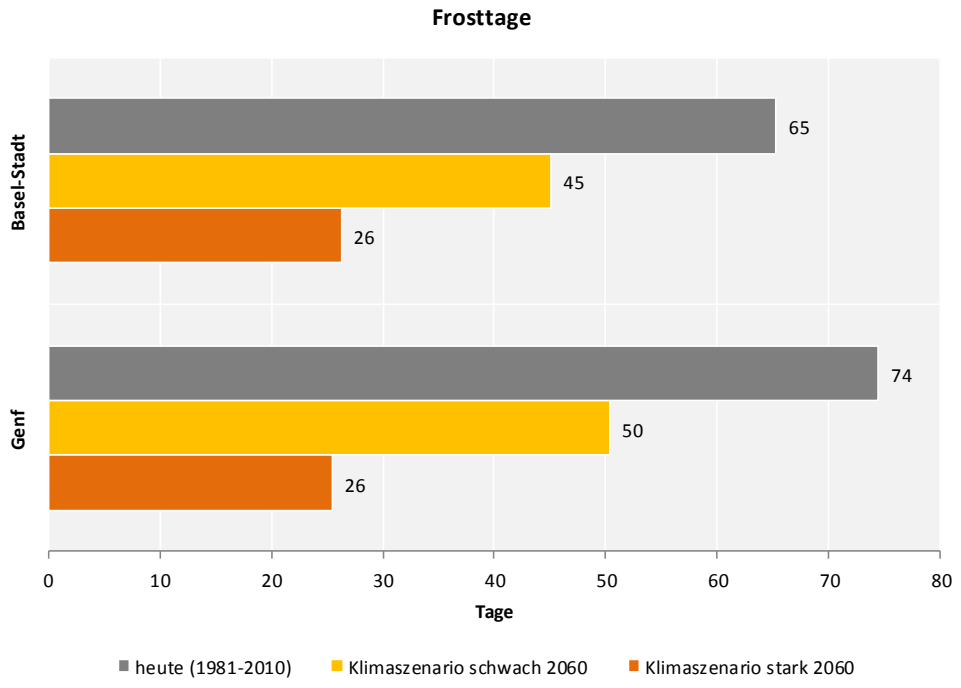
Kälteindikatoren ohne Wärmeinsel-Effekt

Veränderung der Anzahl Frosttage[12]

Die Anzahl Frosttage wird bis 2060 sowohl in Basel-Stadt als auch in Genf abnehmen. In Basel/Binningen (BAS) treten heute 65 Frosttage auf. Sollte das *Klimaszenario schwach* eintreten, dann würde deren Anzahl auf 45 abnehmen. Beim *Klimaszenario stark* wäre die Abnahme noch ausgeprägter (26 Frosttage).

In Genève-Cointrin (GVE) werden heute 74 Frosttage gezählt. Bis 2060 sind noch deren 50 (*Klimaszenario schwach*) respektive 26 Frosttage zu erwarten (*Klimaszenario stark*).

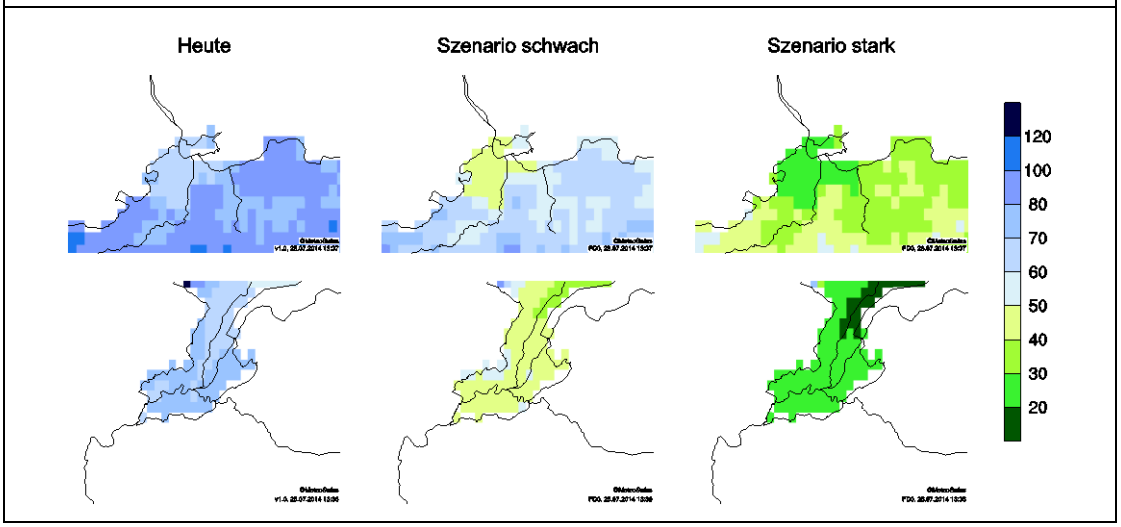
Abbildung 31: Frosttage heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf



Anzahl Frosttage (gerundet) *heute* (grau) und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange) an den Stationen Basel/Binningen (BAS) und Genève-Cointrin (GVE). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

[12] Frosttage: Anzahl Tage an denen das Tagesminimum der Lufttemperatur 2m über Boden 0°C unterschreitet (Tmin < 0°C).

Abbildung 32: Räumliche Verteilung der Anzahl Frosttage in Basel-Stadt und Genf



Räumliche Verteilung der Anzahl Frosttage in Basel-Stadt (oben) und Genf (unten) für den Zustand *heute* (links), das *Klimaszenario schwach* 2060 (Mitte) und das *Klimaszenario stark* 2060 (rechts). Karten von MeteoSchweiz (2014d).

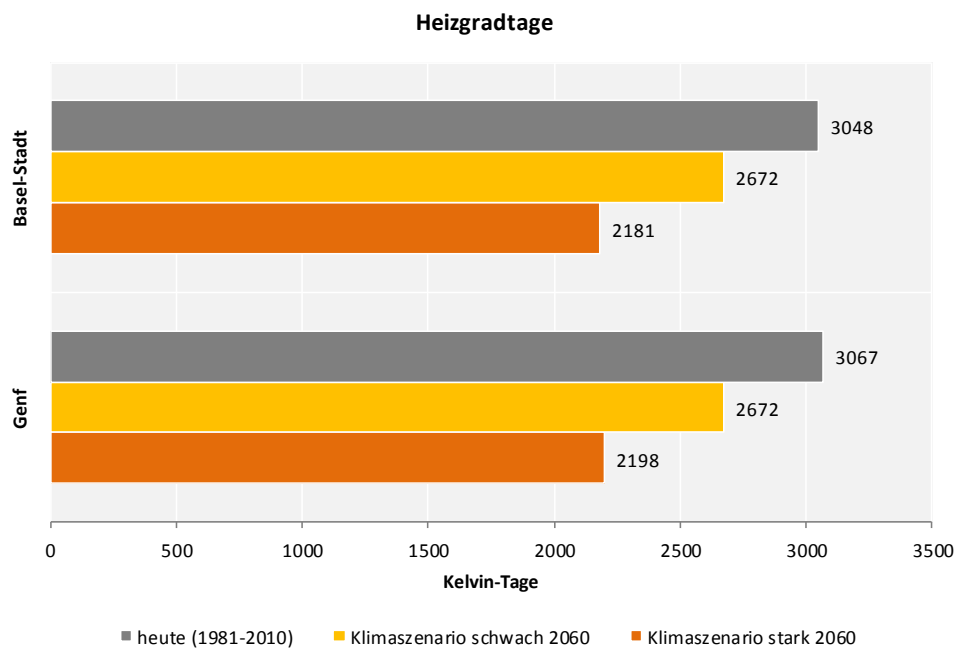
Veränderung der Anzahl Heizgradtage[13]

In Basel/Binningen (BAS) werden heute im Mittel 3048 Heizgradtage registriert. Bis ins Jahr 2060 wird dieser Wert auf 2672 (*Klimaszenario schwach*) respektive 2181 Heizgradtage (*Klimaszenario stark)* abnehmen.

Genève-Cointrin (GVE) erwartet heute 3067 Heizgradtage. Unter Berücksichtigung des *Klimaszenarios schwach* werden bis 2060 nur noch 2672 Heizgradtage projiziert. Betrachtet man die Situation bei Eintreffen des *Klimaszenarios stark,* werden im Mittel 2198 Heizgradtage auftreten.

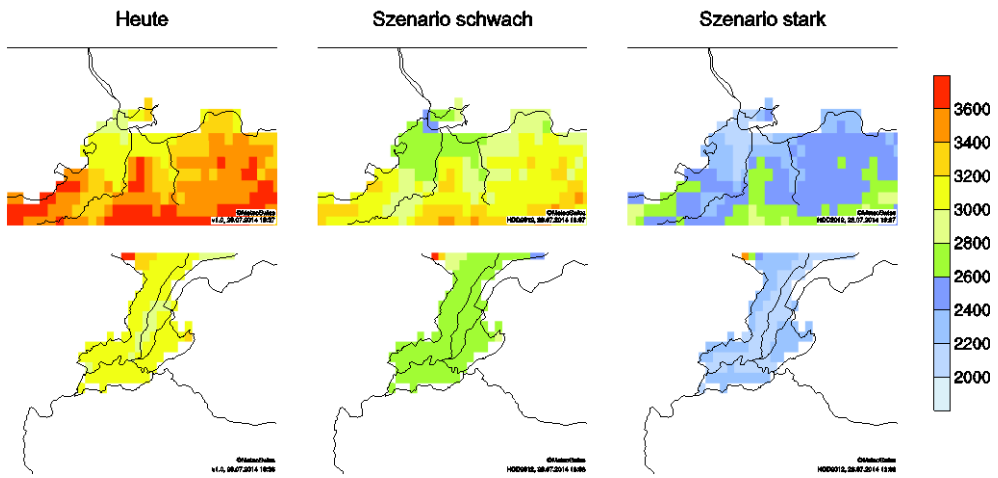
[13] Heizgradtage: Die Heizgradtage sind die über eine bestimmte Periode gebildete Summe der täglich ermittelten Differenzen zwischen der Raumlufttemperatur und der Tagesmitteltemperatur der Aussenluft aller Tage mit Tagesmitteltemperatur < 12°C dieser Periode. Gegenwärtig wird 20 °C als angestrebte Raumlufttemperatur verwendet.

Abbildung 33: Heizgradtage heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf



Heizgradtage [Kelvin-Tage] (gerundet) *heute* (grau) und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange) an den Stationen Basel/Binningen (BAS) und Genève-Cointrin (GVE). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

Abbildung 34: Räumliche Verteilung der Anzahl Heizgradtage in Basel-Stadt und Genf



Räumliche Verteilung der mittleren Anzahl Heizgradtage [Kd] in Basel-Stadt (oben) und Genf (unten) für den Zustand *heute* (links), das *Klimaszenario schwach* 2060 (Mitte) und das *Klimaszenario stark* 2060 (rechts). Karten von MeteoSchweiz (2014d).

Kälteindikatoren mit Wärmeinsel-Effekt

Der mittlere Wärmeinselzuschlag wurde in INFRAS (2015) definiert. MeteoSchweiz (2014d) berechnete die Indikatoren für welche der WIE bedeutend ist.

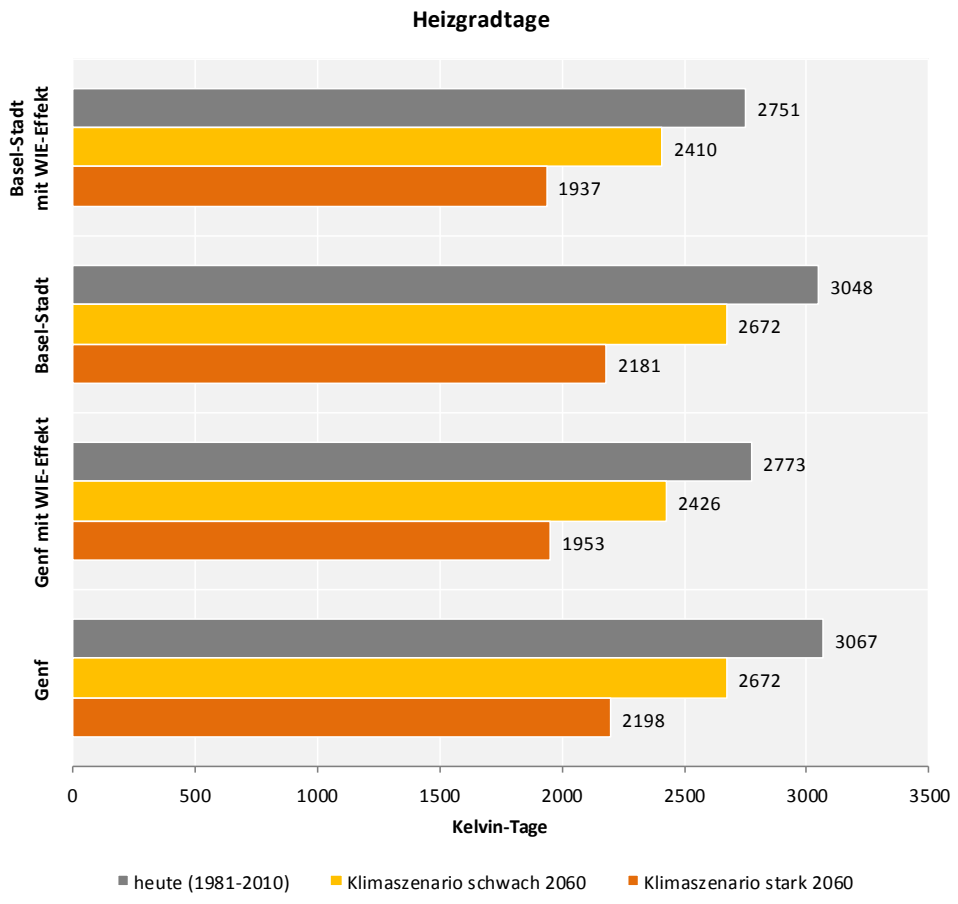
Veränderung der Anzahl Heizgradtage[14] mit Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts

Addiert man einen mittleren Wärmeinsel-Zuschlag für die Kernstadt von Basel-Stadt dazu, werden heute pro Jahr 2751 Heizgradtage verzeichnet (-297 Heizgradtage gegenüber Basel/Binningen). Bis ins Jahr 2060 nimmt deren Anzahl bei Eintreffen des *Klimaszenarios schwach* auf 2410 Kühlgradtage pro Jahr ab (-262 Kühlgradtage gegenüber Basel/Binningen). Beträchtlicher fällt die Reduktion für das *Klimaszenario stark* aus. Die Heizgradtage sinken in der Kernstadt von Basel-Stadt auf 1937 (-244 Heizgradtage gegenüber Basel/Binningen).

Für Genf präsentiert sich das Bild wie folgt: *Heute* werden im Mittel - unter Berücksichtigung eines mittleren Wärmeinsel-Effekts - 2773 Heizgradtage ausgewiesen (-294 Heizgradtage gegenüber Genève-Cointrin). Die Heizgradtage nehmen bis 2060 stetig ab. Sie erreichen für das *Klimaszenario schwach* 2426 (-246 Heizgradtage gegenüber Genève-Cointrin) und für das *Klimaszenario stark* 1953 Heizgradtage (-245 Heizgradtage gegenüber Genève-Cointrin).

[14] Heizgradtage: Die Heizgradtage sind die über eine bestimmte Periode gebildete Summe der täglich ermittelten Differenzen zwischen der Raumlufttemperatur und der Tagesmitteltemperatur der Aussenluft aller Heiztage dieser Periode. Gegenwärtig wird 20 °C als angestrebte Raumlufttemperatur verwendet.

Abbildung 35: Heizgradtage mit und ohne Wärmeinsel-Effekt heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf



Heizgradtage [Kelvin-Tage] (gerundet) mit und ohne Wärmeinsel-Effekt (WIE) *heute* (grau) und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange). Wärmeinsel-Zuschlag gemäss INFRAS (2015). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

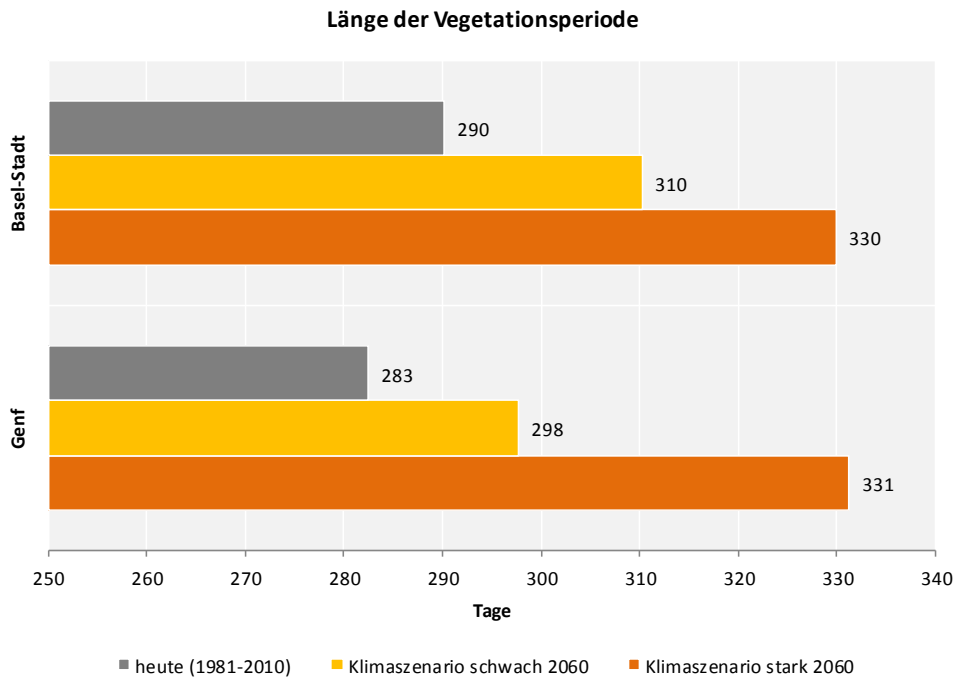
Pflanzenspezifische Indikatoren ohne Wärmeinsel-Effekt

Veränderung der Länge der Vegetationsperiode[15]

Wird nur die Änderung in der Temperatur berücksichtigt, und phänologischen Einflussfaktoren oder andere Grössen wie Strahlung vernachlässigt, wird die Länge der Vegetationsperiode bis 2060 in der ganzen Schweiz zunehmen. Für das *Klimaszenario schwac*h nimmt die Länge der Vegetationsperiode in Basel/Binningen um 20 Tage zu. Für Genf ist eine leicht geringere Zunahme von 15 Tagen zu erwarten.

Betrachtet man die Veränderung mit dem *Klimaszenario stark*, so sind Zunahmen von 40 Tagen für Basel und 48 Tagen für Genf zu erwarten.

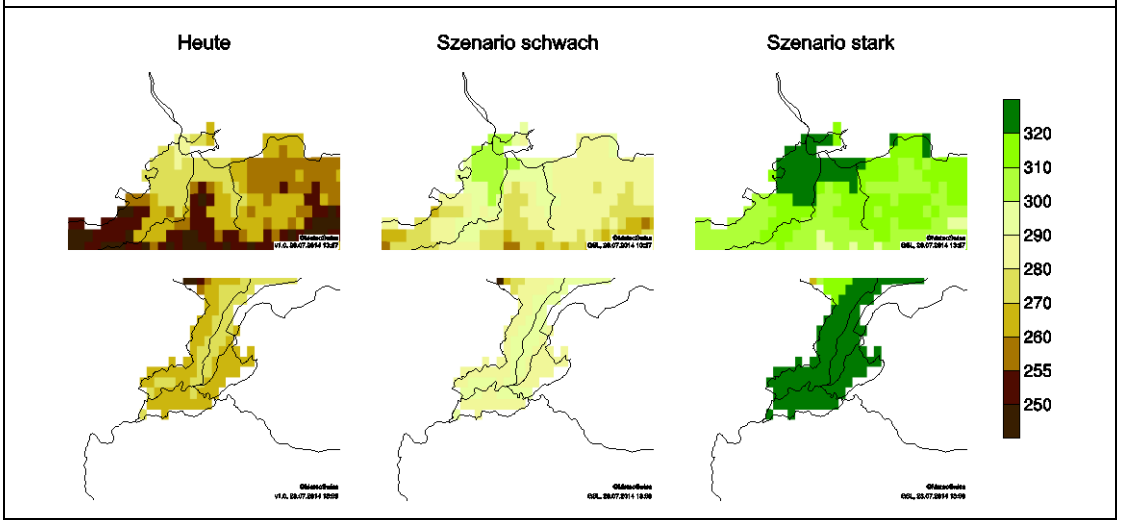
Abbildung 36: Vegetationsperiode heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf



Länge der Vegetationsperiode [Anzahl Tage] (gerundet) *heute* (grau) und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange) an den Stationen Basel/Binningen (BAS) und Genève-Cointrin (GVE). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

[15] Tage pro Kalenderjahr zwischen dem ersten Auftreten einer mindestens 6 Tage langen Periode mit Tagesmitteltemperaturen über 5°C und dem ersten Auftreten einer mindestens 6 Tage langen Periode mit Tagesmitteltemperaturen unter 5°C.

Abbildung 37: Räumliche Verteilung der Vegetationsperiode in Basel-Stadt und Genf



Räumliche Verteilung der mittleren Länge der Vegetationsperiode [Tage] in Basel-Stadt (oben) und Genf (unten) für den Zustand *heute* (links), das *Klimaszenario schwach* 2060 (Mitte) und das *Klimaszenario stark* 2060 (rechts). Karten von MeteoSchweiz (2014d).

Veränderung des Huglin-Index[16] in Genf

Der Huglin-Index ist einer nach Huglin (1978) bioklimatischer Wärmeindex. Jede Rebsorte benötigt gemäss dem Index eine bestimmte Wärmesumme, um auf Dauer in einem Gebiet erfolgreich kultiviert werden zu können (siehe Abbildung 38). Der Huglin-Index wird daher oftmals auch für Impact-Studien (e.g. Holzkämper et al. 2013; Trnka et al. 2011) verwendet, da er ein besseres Mass für das Zuckerpotenzial verschiedener Rebsorten bietet als beispielsweise die Analyse der Temperatursummen (Jones et al. 2012).

Der Huglin-Index wird nur für die Klimarisikoanalyse Fallstudie Genf betrachtet, da der Auswirkungsbereich Landwirtschaft in Basel-Stadt unbedeutend ist.

In Genf kann *heute* nach Huglin ein mittlerer Wärmeindex von 1749 berechnet werden. Rebsorten wie Pinot Noir, Chardonnay und Silvaner lassen sich gemäss Huglin daher besonders gut kultivieren.

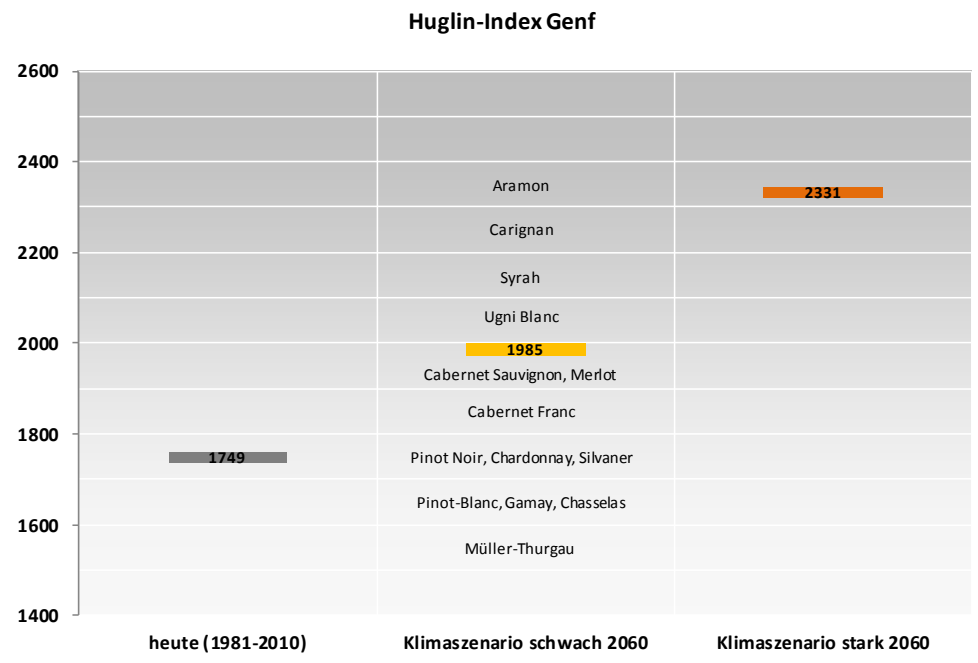
Bis ins Jahr 2060 nimmt der Huglin-Index aufgrund des Klimawandels zu. Die Wärmesumme berechnet sich nach Huglin für das *Klimaszenario schwach* auf 1985. Für das *Klimaszenario stark* ergibt sich die Indexzahl 2331. Die potenzielle Rebsorten-Eignung verschiebt sich damit in

[16] Huglin-Index: Bioklimatischer Wärmeindex bei dem die Temperatursumme >10°C von April bis September summiert wird.

Richtung Cabernet-Sauvignon, Merlot und Ugni Blanc sowie Aramon. Sollte das *Klimaszenario stark* tatsächlich eintreten, wäre das obere Ende der potenziellen Anbau-Skala nach Huglin bereits im Jahr 2060 erreicht.

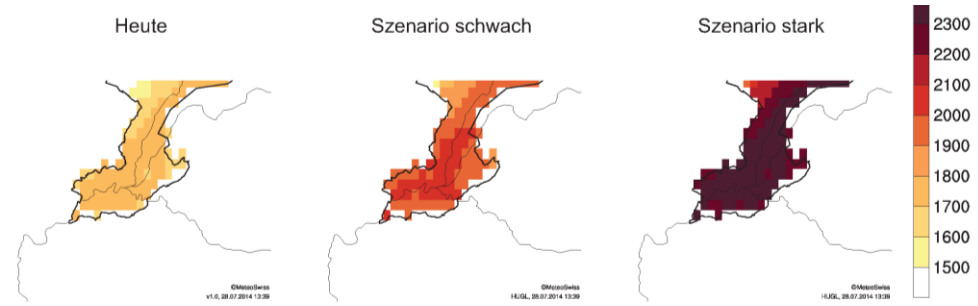
Besonders anspruchsvolle Sorten wie Merlot profitieren durch den weiteren Temperaturanstieg in der Schweiz. In der Vergangenheit hat sich ihr potenzielles Anbaugebiet daher vom Tessin in die Region Wallis, Genf und Basel ausgedehnt. Nutzniesser einer weiteren Erwärmung wären besonders kühlere Gebiete (Holzkämper et al. 2013).

Abbildung 38: Huglin-Index heute und 2060 in Genf



Huglin-Index: Zustand *heute* in Genf grauer Balken (links), 2060 unter Berücksichtigung des *Klimaszenarios schwach* gelber Balken (Mitte), 2060 unter Berücksichtigung des *Klimaszenarios stark* oranger Balken (rechts). Die nach Huglin-Index geeigneten Rebsorten sind in der Mitte angegeben (Huglin 1973; Holzkämper 2013). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

Abbildung 39: Räumliche Verteilung des Huglin-Indexes in Genf



Räumliche Verteilung der des Huglin-Indexes in Genf für den Zustand *heute* (links), das *Klimaszenario schwach* 2060 (Mitte) und das *Klimaszenario stark* 2060 (rechts). Karten von MeteoSchweiz (2014d).

2. Ableitung von Gefahren und Effekten aus Klimaszenarien 2060

Die im Kapitel 2 erläuterten Abschätzungen der Veränderungen einzelner Naturgefahren sind jeweils für die Fallstudienregion Basel-Stadt als auch für Genf gültig. Die Abschätzungen wurden spezifisch für die beiden Agglomerationsgebiete vorgenommen und entsprechend deren Veränderung angegeben. Die bis 2060 zu erwartenden Veränderungen mögen zwar von der Grössenordnung ähnlich sein. Entscheidend ist jedoch deren Auswirkung auf das betreffenden Fallstudiengebiet (siehe dazu Hauptbericht Fallstudien Kanton Basel-Stadt und Genf).

2.1. Intensivniederschläge generell

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die einzelnen Auswirkungsbereiche herleiten zu können, sind Abschätzungen zu einzelnen Gefahren und Effekten bis hin zu Extremereignissen, wie zum Beispiel Intensivniederschläge und deren Extreme unumgänglich. Denn zusammen mit den Änderungen der mittleren Temperatur und Niederschlagsverhältnisse ist auch eine Änderung der Wetterextreme zu erwarten (MeteoSchweiz 2013a).

Extreme Starkniederschläge (im Folgenden Intensivniederschläge genannt) können zu Hochwassern, Uferübertretungen, Murgängen und Hangrutschungen führen. Im 20. Jahrhundert haben intensive 1-Tagesniederschläge in weiten Teilen des Mittellandes und des nördlichen Alpenrandes zugenommen (OcCC 2003). In den letzten Jahrzehnten wurde insbesondere eine steigende Frequenz von starken Winterniederschlägen beobachtet (CH2011 2011; Moberg et al. 2006; Schmidli und Frei 2005; Zolina et al. 2009).

Laut CH2011 (2011) sind Vorhersagen zur Frequenz und Intensität einzelner Niederschlagsereignisse unsicher, wobei wesentliche Veränderungen nicht ausgeschlossen werden können. Studien weisen diesbezüglich jedoch darauf hin, dass die Frequenz und die Gesamtniederschlagssummen der Intensivniederschläge zunehmen. Konkret wird für Zentraleuropa erwartet dass die Anzahl Wintertage, an denen Niederschlag fällt, zunehmen (Frei et al. 2006; Christensen and Christensen 2007). Obwohl die Sommerniederschläge in den Gesamtmengen der Klimaszenarien CH2011 abnehmen, suggerieren die Studien auch hier, dass die Anzahl Tage mit Extremniederschlägen dennoch zunehmen (e.g. Frei et al. 2006; Christensen and Christensen 2007).

2.1.1. Definition Intensivniederschläge

Der Begriff Intensivniederschläge fasst kurzfristige Starkniederschlagsereignisse (typischerweise im Bereich von ein paar Stunden) und über mehrere Tage anhaltenden Dauerregen mit insgesamt grossen Niederschlagsmengen pro Ereignis zusammen. Während Starkniederschläge primär aus konvektiver Bewölkung und Gewittern entstehen (DWD 2013), sind Ereignisse mit Dauerregen oft die Folge von stationären Wettersystemen wie beispielsweise Fronten. Extreme Starkniederschläge und Dauerregen können lokal zu Überschwemmungen, Murgängen und weiteren Schäden führen.

Die einzelnen Gefahren und Effekte welche aus der Kategorie Intensivniederschläge resultieren, werden weiter unten behandelt (siehe Abschnitte 2.1.2 - 2.9).

2.1.2. Abschätzung der Intensivniederschläge 2060

Datengrundlage

Die Abschätzungen zur Veränderung der Intensivniederschläge unter Berücksichtigung der beiden *Klimaszenarien* schwach und stark wurden für die vorliegende Studie basierend auf den Resultaten von Rajczak et al. (2013) vorgenommen.

Die Studie von Rajczak et al. (2013) wendet die Methodik von Frei et al. (2006) auf eine neue Generation von Klimamodellen an, um Aussagen über Extremniederschläge zu machen. Diese Modelle ermöglichen eine Abschätzung der Modellfehler und dienen auch als Ausgangslage für die Klimaszenarien CH2011 (2011). Rajczak et al. (2013) teilt den Alpenbogen in drei Regionen auf, um die Niederschläge über diese gesamthaft zu betrachten. Die räumliche Auflösung des verwendeten Modell-Ensembles (insgesamt 10 Simulationen) betrug 25km.

Für die beiden Klimarisikoanalysen Fallstudie Kanton Basel-Stadt und Genf wird wie schon in der Fallstudie des Kantons Uri (INFRAS/Egli Engineering 2015b) lediglich die Region Nordwestalpen betrachtet, welche den westlichen Alpennordhang, Mittelland, Jura, den südlichen Schwarzwald und die Bodenseeregion abdeckt. Die Studie macht Aussagen über grossräumige Niederschlagsereignisse, welche über diese ganze Region zusammengefasst, extreme Werte erreichen. Extreme Niederschläge auf kleiner räumlicher Skala, welche aus dieser Studie nicht abgeleitet werden können, wie z.B. infolge von Gewittern, können auch anderen Mustern folgen und durchaus auch abnehmen. Wie die Autoren selber betonen, bietet die Studie eine qualitative Schätzung der zukünftigen Entwicklung auf der erwähnten räumlichen Skala.

Es muss an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass die Anzahl publizierter Studien zur Abschätzung von Intensivniederschlägen in der Schweiz und in Europa ausgesprochen dünn ist. Der Umstand, dass die Herleitung der für diese Studie notwendigen Faktoren basierend auf nur einer Studie vorgenommen werden muss, verdeutlicht diese Tatsache.

Die Resultate lassen sich daher nur als „best estimate“ verwenden und sind in keiner Weise spezifisch für die beiden Fallstudiengebiete Kanton Basel-Stadt oder Kanton Genf. Aus diesem Grund sind die Zahlen zu den Intensivniederschlägen mit grossen Unsicherheiten behaftet und werden im Rahmen der beiden Fallstudien entsprechend berücksichtigt (gemäss Methodik in EBP/SLF/WSL 2013).

Abschätzung der 1-Tages-Intensivniederschläge

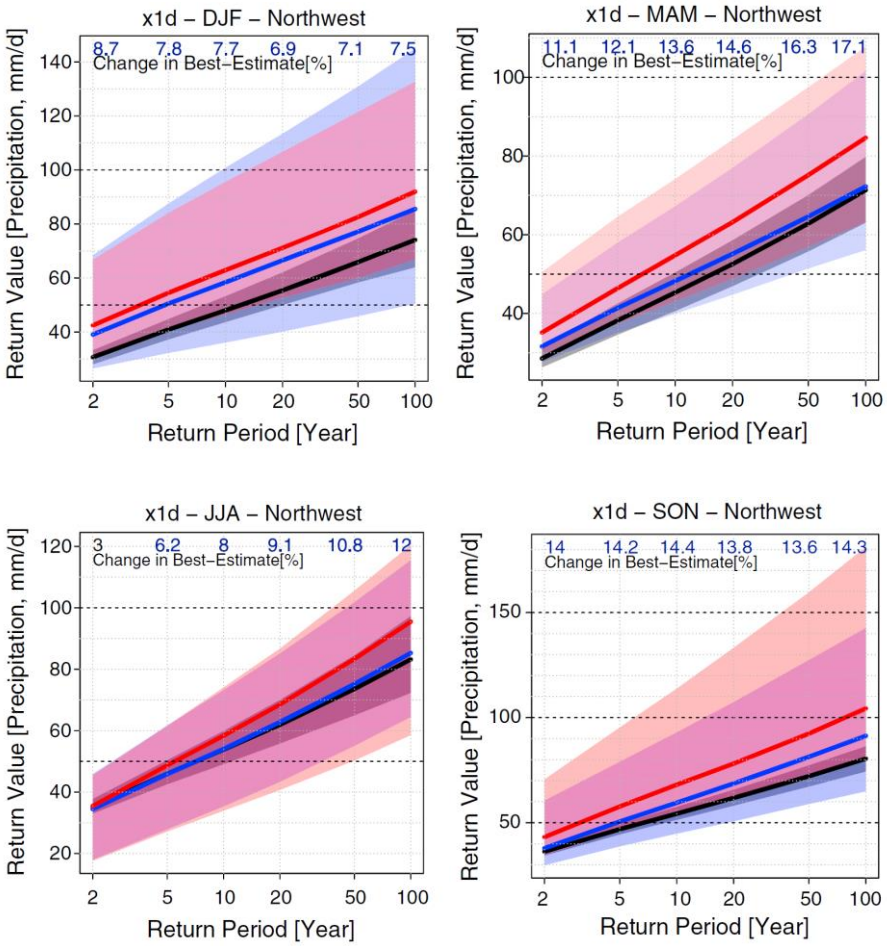
In den folgenden Abschnitten werden die auf der Basis von Rajczak et al. (2013) quantifizierten Veränderungen der Intensivniederschläge für das Jahr 2060 abgeleitet (wo nötig geschätzt). Diese quantifizierten Veränderungen dienen als Grundlage für alle Gefahren und Effekte die Bezug zu den Intensivniederschlägen aufweisen.

Bis auf den Sommer zeigen die Modelle für die untersuchte Region eine konsistente Zunahme der Intensivniederschläge. Im Sommer hingegen kann eine Abnahme der Intensivniederschläge, wie sie bei den mittleren Niederschlagssummen erwartet wird, zum jetzigen Zeitpunkt nicht ausgeschlossen werden.

Abbildung 40 zeigt die für die Zeitperiode 2070-2099 (Mittel 2085) zu erwartenden Änderungen verschiedener Intensivniederschlagsereignisse (akkumulierter 1-Tagesniederschlag), als Funktion von Wiederkehrperiode und Intensität (in mm/Tag) unter Voraussetzung eines mittleren Emissionsszenarios A1B. Grundsätzlich lässt sich folgern, dass die Intensivniederschläge (akkumulierter 1-Tagesniederschlag) in allen Jahreszeiten in Bezug auf die Wiederkehrperiode zunehmen. Als Vereinfachung, wie sie im Rahmen dieser Studie notwendig ist, kann aus den Grafiken von Rajczak et al. (2013) abgeleitet werden, dass die Intensivniederschläge (akkumulierter 1-Tagesniederschlag) im Alpenraum-NW während des Winters im Mittel um rund 7%, im Frühling im Mittel um 15 % und im Herbst im Mittel um 14% in Bezug auf die Intensität (Niederschlagsmengen/Tag) zunehmen. Schwieriger gestaltet sich die allgemeine Interpretation für die Sommermonate (JJA). Ereignisse mit einer Wiederkehrperiode von maximal 10 Jahren nehmen, als starke Vereinfachung, im Mittel (bezüglich Sommer-Extremwerten) um rund 5% in Bezug auf die Intensität zu, während Intensivniederschlagsereignisse mit höheren Wiederkehrperioden um 10% zunehmen (akkumulierter 1-Tagesniederschlag).

Laut den Autoren der Studie (Rajczak et al. 2013) sind signifikante Änderungen im Niederschlagsregime erst auf Ende des 21. Jahrhunderts zu erwarten. Bis ins Jahr 2060 werden die Veränderungen der Intensivniederschläge durch die natürliche Variabilität des Klimasystems dominiert (jährliche und dekadische Variabilität). Erst gegen Ende des Jahrhunderts beginnt der durch anthropogene Treibhausgasemissionen erzeugte Klimawandel das Änderungssignal im Niederschlag zu dominieren, wobei sich in der Folge des Klimawandels auch die natürliche Variabilität des Klimasystems ändern könnte (Experteneinschätzung des OcCC).

Abbildung 40: Modellierte Veränderung der 1-Tages-Intensivniederschläge bis 2085



Die Grafiken zeigen die Wiederkehrwerte (Intensität) [mm/Tag] als Funktion der Wiederkehrperiode [Jahre] für die vier Jahreszeiten Winter (oben links), Frühling (oben rechts), Sommer (unten links) und Herbst (unten rechts). Auf der oberen horizontalen Achse werden die zu erwartenden Veränderungen (rote Linie, siehe unten) in % zu den mittleren modellierten Werten für die Referenzperiode 1970-1999 (blaue Linie) angegeben. Die schwarze Linie zeigt die mittleren Messwerte für die Referenzperiode 1971-1998 und die rote Linie die mittleren projizierten Wiederkehrwerte (Intensitäten) als Funktion der Wiederkehrperiode für die Periode 2070-2099 auf Basis des Emissionsszenarios A1B (mittlere Schätzung). Schattierte Flächen zeigen entsprechend die Unsicherheiten (rote Schattierung: Unsicherheiten der mittleren projizierten Wiederkehrwerte, blaue Schattierung: Unsicherheiten der mittleren Modellwerte für die Referenzperiode, graue Schattierung: Unsicherheiten der Messwerte der Referenzperiode). Quelle: Rajczak et al. (2013).

Generelle Annahmen zur Abschätzung der Intensivniederschläge

Es gilt nochmals zu betonen, dass die in der Studie veröffentlichten Resultate lediglich für den Zeithorizont 2085 unter Annahme eines Emissionsszenarios A1B mittlerer Erwartungswert gerechnet wurden. Es ist nicht möglich diese linear auf ein Klimaszenario stark oder schwach gemäss vorliegender Studie umzuleiten. Daher müssen die Veränderungen für 2060 für die *Klimaszenarien schwach und stark* abgeschätzt werden.

Änderungen der Intensität (Niederschlagsmengen) werden direkt aus den Graphen der Abbildung 40 herausgelesen.

Die Änderungen von Intensivniederschlägen können auch als Änderung der Wiederkehrperiode (also der Frequenz) angegeben werden, um die Relevanz der Änderung besser abschätzen zu können. So wird zum Beispiel im Sommer ein bisher als 10-jährliches eingestuftes Ereignis (Wiederkehrperiode von 10 Jahren) unter Einwirkung des sich ändernden Klimas möglicherweise in Zukunft als 7-jährliches Ereignis gewertet (Wiederkehrperiode von 7 Jahren). Die Abschätzung dieser Frequenzänderung basiert in den aktuellen Klimarisikoanalysen Basel-Stadt und Genf auf groben Vereinfachungen und werden analog der Abschätzungen der Intensitäten direkt aus den Graphen in Abbildung 40 als „best estimate“ abgelesen.

Abschätzung für das *Klimaszenario schwach*

Obwohl die Autoren (Rajczak et al. 2013) in keiner Weise die Auswirkungen für ein Emissionsszenario RCP3PD analysieren (*Klimaszenario schwach*), soll in Anlehnung an die Studie, quasi als „best estimate“, eine Annahme zur Veränderung der Intensivniederschlagereignisse getroffen werden.

Die Veränderung der Intensivniederschläge (akkumulierte 1-Tagesniederschläge) für das *Klimaszenario schwach* soll für die vorliegende Studie als Schätzung für das jährliche Mittel mit +5% angenommen werden. Dieser Wert entspricht einer Abschätzung der kleinsten Veränderungen die in Rajczak et al. (2013) welche unter Berücksichtigung des Emissionsszenarios mittlere Schätzung A1B berechnet wurde (2085). Möglicherweise sind die Auswirkungen bis ins Jahr 2060 deutlich geringer. Dieser Umstand soll mit den Unschärfen abgedeckt werden (Abbildung 41)

Die Steigerung der Frequenz für das Klimaszenario schwach wird in Anlehnung an die oben gemachten Ausführungen geringer ausfallen als für das Klimaszenario stark. Es wird angenommen, dass sich die Frequenz um einen Faktor von 1.25 (+25%) steigert (Abschätzung durch das Autorenteam). Dies bedeutet, dass ein heute 50-jährliches Ereignis im Jahre 2060 statistisch als 40-jährlichs Ereignis gewertet würde.

Abschätzung für das *Klimaszenario stark*

Zur Abschätzung des *Klimaszenarios stark* wird vereinfacht angenommen, dass die in Rajczak et al. (2013) gefundenen Veränderungen (für den Zeitraum 2070-2099) im Jahr 2060 nicht überschritten werden und daher die maximale Veränderung eines Klimaszenarios stark hiermit abgedeckt sind.

Für das *Klimaszenario stark* wird somit eine mittlere Steigerung der Intensivniederschlagsmengen (akkumulierter 1-Tagesniederschlag) von 15% angenommen (Ableitung gemäss Schätzung des Autorenteams), wie sie von Rajczak et al. (2013) im Mittel für den Frühling projiziert wurde, da gerade für angewandte Abschätzung der Frühling zusammen mit der eintretenden Schneeschmelze und gesättigten Böden für Überlegungen wie Hochwasserrisiken und Rutschungen eine gewisse Wichtigkeit hat (Abbildung 41). Für Ausreiserereignisse gelten höhere Werte, die nicht abgeschätzt werden können (Experteneinschätzung).

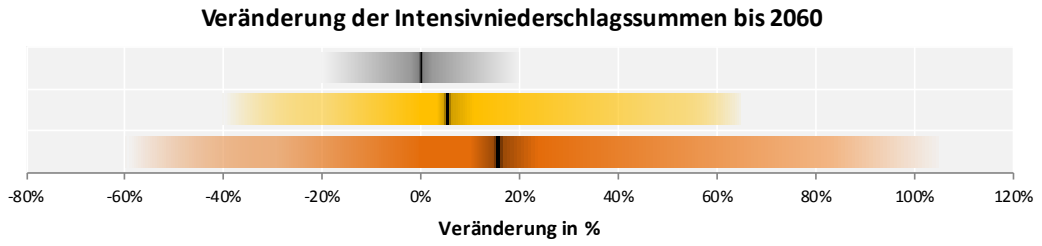
Überträgt man diese Überlegungen mit Hilfe der Graphen in Abbildung 40 auf die Veränderung der Frequenz, so findet man (abgelesen aus Abbildung 40) für die einzelnen Jahreszeiten eine Frequenzsteigerung des 50-jährlichen Ereignisses (als Mittel der Periode 1-100 Jahre) von einem Faktor 1.6-1.4, was bedeutet, dass das 50-jährige Ereignis im Jahr 2085 (Mittel aus 2070-2099) etwa alle 30-40 Jahre auftritt. Da angenommen werden muss, dass die Veränderungen bis ins Jahr 2060 für das *Klimaszenario stark* moderater oder etwa ähnlich ausfallen wie für die mittlere Schätzung 2085 (Szenario A1B mittlere Schätzung gemäss Rajczak et al. 2013), wird für die Vorliegende Studie der Faktor 1.6 (+60%) als Frequenzsteigerung von Intensivniederschlägen angenommen. Dies bedeutet, dass ein 50-jährliches Ereignis im Jahre 2060 statistisch als rund 30-jährliches Ereignis gewertet würde.

Unschärfen

Bei den Überlegungen zur Veränderung der Intensivniederschläge dürfen die Unsicherheiten nicht ausser Acht gelassen werden. Aus Abbildung 40 wird ersichtlich, dass die hier getroffenen Annahmen als „best estimates“ basierend aus den Klimasimulationen aus Rajczak et al. (2013) vorgenommen wurden. Der beste Schätzwert wird jedoch als sehr gut erachtet, da es sich in der Studie zeigte, dass dieser im heutigen Klima sehr gut mit den Beobachtungen übereinstimmt (siehe auch den Vergleich der schwarzen (observation) und blauen Kurven (Modelle Gegenwart und Vergangenheit in Abbildung 40). Die Unsicherheiten sind entsprechend gross. Aufgrund der angegebenen Unsicherheiten (schattierte Flächen in Abbildung 40) muss hier mit Unschärfen im Bereich von +/- Faktor 2 (+100% / -50%) in Bezug auf die heutigen Werte gerechnet werden. Es könnte also durchaus sein, dass die Niederschlagssummen nicht um 15% zunehmen, wie für das *Klimaszenario stark* abgeschätzt, sondern um +100% zunehmen oder um -50% abnehmen (siehe Abbildung 41).

Für die Änderung der Frequenz gelten analoge Überlegungen. Die Frequenz reagiert jedoch um einiges sensitiver auf Unsicherheiten. Ein 50 jährliches Ereignis könnte unter Berücksichtigung des oberen Randes der Unsicherheiten (rote Schattierungen in Abbildung 40) bis ins Jahr 2080 (gemäss Rajczak et al. 2013) durchaus rund alle 4 Jahre eintreffen. Es ergeben sich daher grosse Unsicherheiten bei der Abschätzung der Frequenz.

Abbildung 41: Abgeschätzte mittlere jährliche Veränderung der 1-Tages-Intensivniederschläge 2060



Abgeschätzte Werte für die mittlere jährliche Veränderung (dunkle Bereiche in der Mitte) der 1-Tages-Intensivniederschlagssummen im Alpenraum (akkumulierte 1-Tagesniederschläge), als abgeleitete Schätzungen („best estimate“) basierend auf Überlegungen zur Studie von Rajczak et al. (2013) für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange) im Jahr 2060 und deren abgeschätzte Unschärfen (auslaufende Balken) im Vergleich zum heutigen Zustand (grau). Die mittleren abgeschätzten Veränderung [%] entsprechen für beide Szenarien einer Zunahme.

Klimaszenario schwach: Intensivniederschlagssummen	*Veränderung bis 2060*
	+5%
Unschärfefaktor	*3 (gross)*

Klimaszenario stark: Intensivniederschlagssummen	*Veränderung bis 2060*
	+15%
Unschärfefaktor	*3 (gross)*

2.2. Hochwasser

Die beiden Agglomerationen Basel-Stadt und Genf werden beide von einem grossen Fluss durchflossen. Die Flüsse und Bäche der Regionen Basel-Stadt und Genf weisen pluviale Regime auf. Der Abfluss der Rhône wird zudem massgeblich durch die Retentionswirkung des Genfersees gedämpft und der Abfluss kann reguliert werden.

Hänggi und Weingartner (2009) haben die 200-jährige Abflusszeitreihe des Rheins ausgewertet und folgende Erkenntnisse gewonnen: Die durchschnittlichen Abflussmengen im Winter sind angestiegen, dafür sind die durchschnittlichen Abflussmengen im Sommer zurückgegangen. Der Jahresabfluss hat sich jedoch nicht signifikant verändert. Für die Zunahme im Winter gibt es zwei Erklärungen. Zum einen fiel durch den Temperaturanstieg weniger Niederschlag in Form von Schnee und wurde deshalb nicht zwischengespeichert. Zum anderen wird das Regime durch die Speicherseen beeinflusst, welche im Winter mehr Wasser ablassen. Für den Rhein in Basel wird durch die Entleerung der Speicherseen zur Stromproduktion in den Wintermonaten eine mittlere Abflusszunahme von 60-70 m^3/s geschätzt. Die Reduktion im Sommer wird auf die höheren Lufttemperaturen und die damit verbundene erhöhte Verdunstungsrate zurückgeführt.

Die grossen Talflüsse führen Hochwasser primär nach langanhaltenden Intensivniederschlägen in grossen Teilen des Einzugsgebietes. Schmocker-Fackel und Naef (2010) schreiben, dass die Häufigkeit von Hochwasser mit bestimmten Wetterlagen korrelieren (Jacobeit et al. 2003 und 2004; Mudelsee et al. 2004; Wanner et al. 2004). Die Klimaprojektionen für zukünftige Wetterlagen sind jedoch sehr unsicher. Auf Grund der Erwärmung kann die Atmosphäre jedoch mehr Wasser aufnehmen. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass langanhaltende grossflächige Niederschläge eher zunehmen dürften.

In den Agglomerationen gibt es auch kleinere Bäche, welche zu hohen Schäden führen können. Die kleineren Bäche weisen ein pluviales Regime auf, die Hochwasser werden jedoch durch kürzere, intensivere Niederschlagsereignisse ausgelöst. Deshalb gehen wir davon aus, dass sich diese ähnlich den Intensivniederschläge verhalten.

Gemäss Köpplin et al. (2013) wird erwartet, dass sich die Hochwassersaison bei pluvialen Regimen von Ende Januar (heute) auf den Jahreswechsel (2060) verschieben und die Abflüsse zunehmen. In der pluvialen Region haben sie die Urtene untersucht und prognostizieren für diese eine Zunahme der jährlichen Hochwasser um rund 25%.

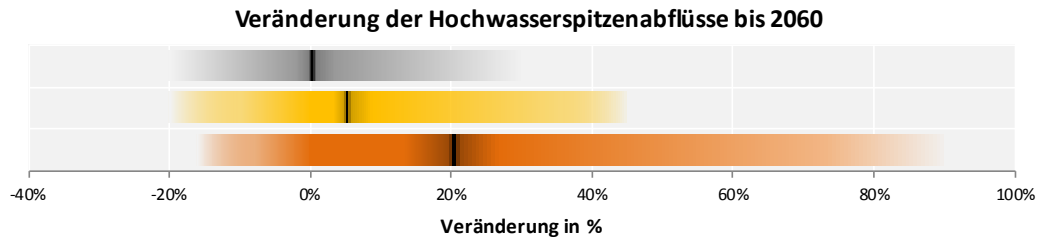
Somit kann zusammenfassend gesagt werden, dass lediglich eine Studie vorliegt, welche die Veränderung der 24 h Extremniederschläge prognostiziert. Es fehlen darauf aufbauende Studien, welche die hochwasserfördernden und die hochwasserdämpfenden Effekte für die Region Basel modellieren. Hochwasserfördernd ist die Zunahme der Intensität von Starkniederschlägen und, dass der Niederschlag, insbesondere im Frühjahr und Herbst, zunehmend in

Form von Regen anstelle von Schnee fällt. Hochwasserhemmend sind die längeren Trockenperioden im Sommer, welche ein verzögertes Anspringen der Böden bei Starkniederschlägen zur Folge haben können. Das Autorenteam schätzt den Effekt der intensiveren Starkniederschläge als bestimmend ein für die Schätzung der Veränderung der Hochwasserspitzenabflüsse. Die Unsicherheit ist sehr gross, da weitere hochwasserfördernde oder hochwasserhemmende Effekte das Endergebnis resp. die Höhe des Hochwasserspitzenabflusses beeinflussen. Insbesondere beim Rhein mit einem Einzugsgebiet von 35‘897 km^2 wirken sich durch den Klimawandel verschiedene Veränderungen im Voralpen und Alpengebiet ab, welche einer eingehenden Analyse bedürften.

Da keine belastbaren Wissenschaftlichen Aussagen existieren wird vereinfacht angenommen, dass sich die Hochwasserspitzenabflüsse beim Szenario schwach ähnlich wie die Intensivniederschläge verhalten. Für das Szenario stark wird vom Autorenteam ein Wert zwischen der Zunahme der Intensivniederschläge und den Modellergebnissen aus Köpplin et al. (2013) gewählt. Der Wert Hochwasserspitzenabflüsse bezeichnet die Höhe der Hochwasserspitze bei identischer Jährlichkeit.

Die Unschärfe der heutigen Hochwasserspitzenabflüsse wird mit dem Unschärfefaktor 2 eingestuft.

Abbildung 42: Veränderung der Hochwasserspitzenabflüsse 2060



Abschätzung der Veränderung der Hochwasserspitzenabflüsse bis 2060 für die *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange) inklusive deren Unschärfen (auslaufende Balken) im Vergleich zum heutigen Zustand (grau).

Klimaszenario schwach:	Zunahme der Hochwasserspitzenabflüsse um 5% Unschärfefaktor: 2

Klimaszenario stark:	Zunahme der Hochwasserspitzenabflüsse um 20% Unschärfefaktor: 2

2.3. Gewitter (inklusive Erosion und Hagel)

Über die zukünftige Entwicklung von Gewittern und Hagel können zurzeit keine wissenschaftlich gesicherten Aussagen gemacht werden. Für Modellberechnungen ist die räumliche Ausdehnung zu klein, bei gleichzeitig sehr tiefem „level of scientific understanding“ (CH2011 2011). Aufgrund der grossen Unsicherheiten wird bei den Auswirkungsbereichen
jeweils eine Sensitivitätsanalyse der Gewitter- / Hagelprozesse mit einer Erhöhung und einer Verminderung um den Faktor 1.5 durchgeführt. Damit soll der Einfluss möglicher Änderungen auf das Gesamtbild der Risiken und Chancen geprüft werden. Das Resultat dieser Sensitivitätsanalyse fliesst jedoch nicht in das auf Ebene Auswirkungsbereich aggregierte Gesamtrisiko ein.

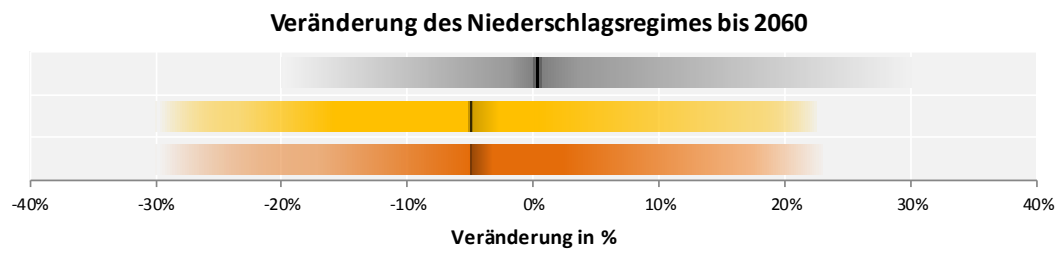
2.4. Änderung im Niederschlagsregime

Die von MeteoSchweiz berechneten Niederschlagsprojektionen sind detailliert im Kapitel 1.2.2 unter dem Untertitel „Veränderung der Niederschlagssummen“ aufgeführt. Auf Grund der Unsicherheiten wird die Veränderung der beiden Agglomerationen auf 5% gerundet.

Gemäss den Modellrechnungen kann beim Szenario schwach davon ausgegangen werden, dass das Niederschlagsregime bis auf die Sommerniederschläge ähnlich bleibt wie heute. Im Sommer werden die Niederschläge deutlich abnehmen.
Beim Szenario stark verlagert sich rund ein Viertel der Sommerniederschläge auf die restlichen Jahreszeiten. Dies hat zur Folge, dass sich die Sommermonate von den niederschlagsreichsten zu den niederschlagsarmen entwickeln. Gemäss Steger et al. (2012) nimmt der Schneefall um über die Hälfte ab.

Die Unsicherheit der Daten zum heutigen Niederschlagsregime wird mit dem Unschärfefaktor 0 eingestuft.

Abbildung 43: Veränderung des Niederschlagsregimes 2060



Abschätzung der Veränderung des Niederschlagsregimes bis 2060 für die *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange) inklusive deren Unsicherheiten (auslaufende Balken) im Vergleich zum heutigen Zustand (grau).

Klimaszenario schwach:	Die Niederschläge verändern sich wie folgt:	
	Jahresniederschlag:	-5%
	Saisonale Niederschläge	
	Winter:	+5%
	Frühling:	0
	Sommer:	-10%
	Herbst:	0
	Unschärfefaktor:	2

Klimaszenario stark:	Die Niederschläge verändern sich wie folgt:	
	Jahresniederschlag:	-5%
	Saisonale Niederschläge	
	Winter:	+20%
	Frühling:	+15%
	Sommer:	-25%
	Herbst:	-15%
	Unschärfefaktor:	2

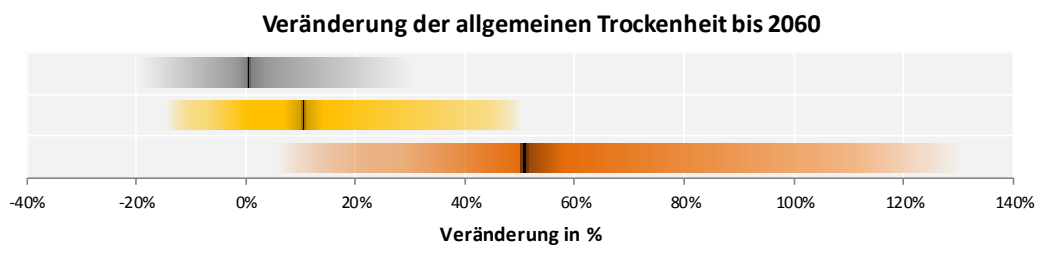
2.5. Allgemeine Trockenheit

Gemäss Schär et al. (2004) dürfte in Zukunft neben dem allgemeinen Temperaturanstieg die Temperaturvariabilität zunehmen. Sommertemperaturen wie im Jahr 2003 dürften zudem deutlich häufiger auftreten. Gleichzeitig erwarten sie eine Abnahme der Sommer-Niederschläge. Da die Studie von Schär et al. (2004) auf dem Klimaszenario A2, unter Betrachtung der Periode 2071-2090 beruht, werden diese Aussagen durch das Autorenteam als qualitative Hinweise verwendet.

Als Mass für die Trockenheit wird in dieser Studie der Term „Trockenperioden“ verwendet und dabei wie folgt definiert: „Dauer von aufeinanderfolgenden Trockentagen (Tage mit weniger als 1mm Niederschlag), in der Masseinheit Tagen.“ In welchem Mass Trockenperioden in Zukunft auftreten werden, kann heute nicht zuverlässig modelliert werden. Die Modelle streuen in den Ergebnissen sehr stark (ca. -10 bis +60%). Aufgrund der erhöhten Temperaturen wird eine höhere Verdunstungsrate erwartet, welche die Trockenheit zusätzlich verschärfen könnte. Im Bereich von Basel und Genf zeigen die Modelle jedoch signifikante Veränderungen für das Klimaszenario stark an. Die Veränderungen betragen 40- 50% (Emissionsszenario A1B). Für das Szenario schwach werden keine Angaben gemacht. (CH2011 2011)

Die Unsicherheit der Daten zu der Trockenheit heute wird mit dem Unschärfefaktor 1 eingestuft.

Abbildung 44: Veränderung der allgemeinen Trockenheit 2060



Abschätzung der Veränderung der allgemeinen Trockenheit bis 2060 für die *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange) inklusive deren Unsicherheiten (auslaufende Balken) im Vergleich zum heutigen Zustand (grau).

Klimaszenario schwach:	Verlängerung der Trockenperioden um 10%. Unschärfefaktor: 2

Klimaszenario stark:	Verlängerung der Trockenperioden um 50%. Unschärfefaktor: 2

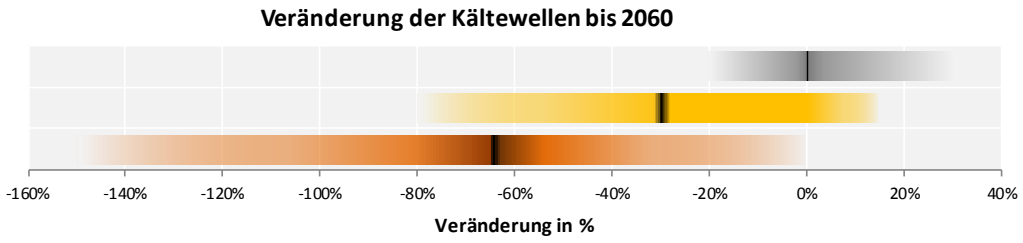
2.6. Kältewelle

Die Frequenz sowie Dauer von Kältewellen im Winter dürfte bis 2060 abnehmen, wobei immer noch intensive Kältewellen auftreten können (CH2011 2011). Gemäss Mitteilung von Simon Scherrer von MeteoSchweiz können zu den Kältewellen keine gesicherten Aussagen gemacht werden.

Für diese Studie macht das Autorenteam die vereinfachte Annahme, dass sich die Kältewellen analog zu den Frosttagen verhalten. Die Frosttage sind unter Kapitel 1.2.3 unter dem Titel „Veränderung der Anzahl Frosttage heute – 2060“ aufgelistet.

Die Unsicherheit der Daten zu Kältewellen heute wird mit dem Unschärfefaktor 1 eingestuft.

Abbildung 45: Veränderung der Kältewellen 2060



Abschätzung der Veränderung der Kältewellen bis 2060 für die *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange) inklusive deren Unsicherheiten (auslaufende Balken) im Vergleich zum heutigen Zustand (grau).

Klimaszenario schwach:	Abnahme der Kältewellen um 30%. Unschärfefaktor: 2

Klimaszenario stark:	Abnahme der Kältewellen um 65%. Unschärfefaktor: 2

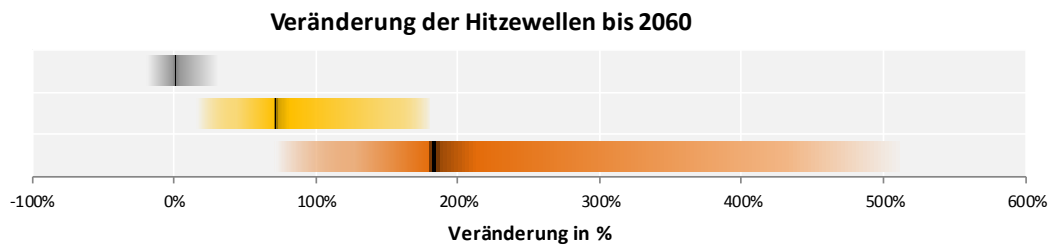
2.7. Hitzewelle

Aufgrund der allgemeinen Erwärmung kann davon ausgegangen werden, dass Hitzewellen 2060 deutlich häufiger auftreten sowie länger andauern dürften (CH2011 2011). Zur Quantifizierung dieser Prozessart wird im Bericht Swiss Climate Change Scenarios CH2011 das Mass „Warm Spell Duration Index[17]“ WSDI verwendet. Der WSDI wird bis 2085 für das Szenario stark in der Region des Kantons Basel-Stadt um 40 Tage und in der Region Genf um bis zu 50 Tage zunehmen. Dabei wird jedoch der heutige Referenzwert nicht angegeben.

Für das Szenario stark zeigen gemäss CH2011 (2011) alle Modelle, dass die Anzahl Hitzewellentage (warm spell days) um mindestens 70% zunehmen. Für das Szenario schwach werden keine Angaben gemacht, deshalb wird die Zunahme der Hitzewellentage für das Szenario schwach vom Autorenteam abgeschätzt. Da auch für das Szenario stark nur der Bereich definiert ist (CH2011, 2011), muss die Veränderung für die vorliegende Studie basierend auf den verfügbaren meteorologischen Daten abgeschätzt werden. Dazu werden die Hitzetage mit Berücksichtigung des Wärmeinseleffektes herangezogen. Es wird angenommen, dass sich die Kältewellen proportional zur Anzahl Hitzetage verändern.

Die Unsicherheit der Daten zu Hitzewelle heute wird mit dem Unschärfefaktor 1 eingestuft.

Abbildung 46: Veränderung der Hitzewellen 2060



Abschätzung der Veränderung der Hitzewellen bis 2060 für die *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange) inklusive deren Unsicherheiten (auslaufende Balken) im Vergleich zum heutigen Zustand (grau).

[17] Warm spell duration index (WSDI): count of warm spell days in May-September. A warm spell is defined as a period of at least six consecutive days with maximum temperatures exceeding the local 90th percentile of the reference period (1980–2009). To account for the seasonal cycle, the 90th percentile is calculated for each calendar day centered on a 5-day time window. Quelle: CH2011 (2011)

Klimaszenario schwach:	Zunahme der Dauer von Hitzewellen um 70%. Unschärfefaktor: 2

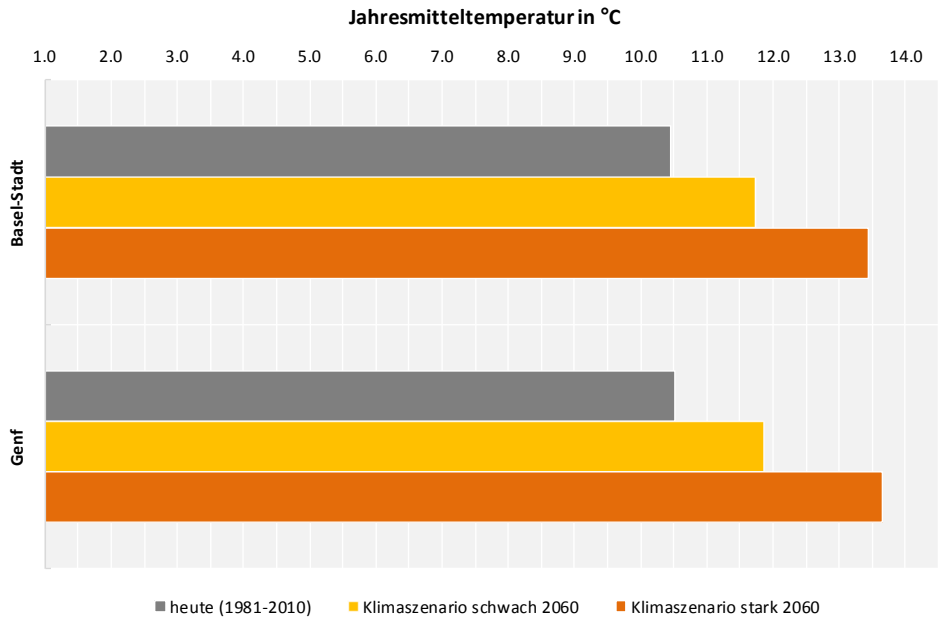
Klimaszenario stark:	Zunahme der Dauer von Hitzewellen um 160%. Unschärfefaktor: 2

2.8. Veränderung der Mitteltemperatur

Die Veränderung der Jahresmitteltemperatur ist im Kapitel 1.2.2 unter dem Untertitel „Veränderung der Jahresmitteltemperatur mit Berücksichtigung des Wärmeinsel-Effekts heute – 2060“ beschrieben.

Die Unsicherheit der Daten der Mitteltemperatur wird mit dem Unschärfefaktor 0 eingestuft, ist jedoch für die vorliegende Betrachtung irrelevant, da die Temperaturveränderung bis 2060 aufgrund der vorgegebenen Szenarienbetrachtung, wie im Kapitel 1.2.1 beschrieben, als Teil der Grundannahme fix vorgegeben ist. Lediglich die Folgen daraus (Naturgefahren und Auswirkungen auf die Kosten und Erträge) sind mit Unsicherheiten behaftet.

Abbildung 47: Jahresmitteltemperatur heute und 2060 Basel-Stadt und Genf



Jahresmitteltemperaturen heute (grau), und 2060 für die beiden *Klimaszenarien schwach* (gelb) und *stark* (orange) an den Stationen Basel/Binningen (BAS) und Genève-Cointrin (GVE). Datenquelle: MeteoSchweiz (2014d).

Klimaszenario schwach:	Veränderung der Mitteltemperatur mit Wärmeinsel-Effekt: +1.3°C

Klimaszenario stark:	Veränderung der Mitteltemperatur mit Wärmeinsel-Effekt: +3.0°C

2.9. Sturm/Orkan

Gemäss CH2011 (2011) treten extreme Windgeschwindigkeiten vor allem bei Winterstürmen auf. Für Schäden sind vor allem kurzzeitige, lokale Windböen verantwortlich (CH2011 2011; Schwierz et al. 2009). Andere Windereignisse wie Gewitterstürme, Föhn und Tornados können auch zu sehr hohen Windgeschwindigkeiten führen, sind jedoch kleinräumiger und führen deshalb zu weniger grossen Gesamtschäden. Lokal können sie jedoch verheerend sein (Egli 2007) und so gerade in urbanen Regionen zu grossen Schäden führen. Gemäss CH2011 (2011) muss in Zukunft mit stärkeren Stürmen in Nordeuropa gerechnet werden, in Südeuropa (Mittelmeerraum) wird jedoch eine Abnahme vermutet. Die Schweiz liegt genau zwischen diesen Beurteilungsgebieten, wodurch für diese keine verlässlichen Projektionen erstellt werden kann. Aufgrund der grossen Unsicherheiten wird bei den Auswirkungsbereichen jeweils eine Sensitivitätsanalyse der Risiken von Sturm / Orkan mit einer Erhöhung respektive einer Verminderung um den Faktor 1.5 durchgeführt. Damit soll der Einfluss möglicher Änderungen auf das Gesamtbild der Risiken und Chancen geprüft werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Jahrestemperatur in Basel/Binningen 1864-2013 _____ 10
Abbildung 2: Anzahl Hitzetage in Basel/Binningen 1961-2013 _____ 10
Abbildung 3: Entwicklung des Jahresniederschlags in Basel/Binningen 1864-2013 _____ 11
Abbildung 4: Maximaler 1-Tagesniederschlag in Basel/Binningen 1961-2013 _____ 11
Abbildung 5: Entwicklung der Jahrestemperatur in Genève-Cointrin 1864-2013 _____ 13
Abbildung 6: Anzahl Hitzetage in Genève-Cointrin 1961-2013 _____ 14
Abbildung 7: Entwicklung des Jahresniederschlags in Genève-Cointrin 1864-2013 _____ 14
Abbildung 8: Maximaler 1-Tagesniederschlag in Genève-Cointrin 1961-2013 _____ 15
Abbildung 9: Mittlere Wärmeinsel von Basel-Stadt als einfache Approximation für die Fallstudien _____ 17
Abbildung 10: Mittlere Temperatur in Basel-Stadt heute _____ 18
Abbildung 11: Mittlere Temperatur in Genf heute _____ 19
Abbildung 12: Globale Treibhausgasemissionsszenarien _____ 20
Abbildung 13: Sensitivität der Änderung der Frequenz von Temperatur und Niederschlag ____ 23
Abbildung 14: Jahresmitteltemperatur heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf _____ 25
Abbildung 15: Mittlere saisonale Niederschlagssummen in Basel-Stadt und Genf _____ 27
Abbildung 16: Jährliche Niederschlagssummen in Basel-Stadt und Genf _____ 28
Abbildung 17: Jahresmitteltemperatur mit und ohne Wärmeinsel-Effekt in Basel-Stadt und Genf _____ 29
Abbildung 18: Mittlere saisonale Tagestemperatur mit Wärmeinsel-Effekt in Basel-Stadt und Genf _____ 30
Abbildung 19: Hitzetage heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf _____ 32
Abbildung 20: Räumliche Verteilung der mittleren Anzahl Hitzetage in Basel-Stadt und Genf __ 32
Abbildung 21: Tropennächte heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf _____ 33
Abbildung 22: Räumliche Verteilung der Tropennächte in Basel-Stadt und Genf _____ 34
Abbildung 23: “Sehr heisse Tage” heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf _____ 35
Abbildung 24: Räumliche Verteilung der “sehr heissen Tage” in Basel-Stadt und Genf _____ 35
Abbildung 25: Mittlere Anzahl Kühlgradtage heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf _____ 36
Abbildung 26: Räumliche Verteilung der mittleren Anzahl Kühlgradtage in Basel-Stadt und Genf 37
Abbildung 27: Hitzetage mit und ohne Wärmeinsel-Effekt heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf _____ 39
Abbildung 28: Tropennächte mit und ohne Wärmeinsel-Effekt heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf _____ 40

Abbildung 29: “Sehr heisse Tage” mit und ohne Wärmeinsel-Effekt heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf 42
Abbildung 30: Kühlgradtage mit und ohne Wärmeinsel-Effekt heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf 43
Abbildung 31: Frosttage heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf 44
Abbildung 32: Räumliche Verteilung der Anzahl Frosttage in Basel-Stadt und Genf 45
Abbildung 33: Heizgradtage heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf 46
Abbildung 34: Räumliche Verteilung der Anzahl Heizgradtage in Basel-Stadt und Genf 46
Abbildung 35: Heizgradtage mit und ohne Wärmeinsel-Effekt heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf 48
Abbildung 36: Vegetationsperiode heute und 2060 in Basel-Stadt und Genf 49
Abbildung 37: Räumliche Verteilung der Vegetationsperiode in Basel-Stadt und Genf 50
Abbildung 38: Huglin-Index heute und 2060 in Genf 51
Abbildung 39: Räumliche Verteilung des Huglin-Indexes in Genf 52
Abbildung 40: Modellierte Veränderung der 1-Tages-Intensivniederschläge bis 2085 56
Abbildung 41: Abgeschätzte mittlere jährliche Veränderung der 1-Tages-Intensivniederschläge 2060 59
Abbildung 42: Veränderung der Hochwasserspitzenabflüsse 2060 61
Abbildung 43: Veränderung des Niederschlagsregimes 2060 62
Abbildung 44: Veränderung der allgemeinen Trockenheit 2060 64
Abbildung 45: Veränderung der Kältewellen 2060 65
Abbildung 46: Veränderung der Hitzewellen 2060 66
Abbildung 47: Jahresmitteltemperatur heute und 2060 Basel-Stadt und Genf 67

Literatur

Literatur Kapitel 1: Klima früher, heute und um 2060 in Basel-Stadt und Genf

BAFU 2012: Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz – Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder. Erster Teil der Strategie des Bundesrates vom 2. März 2012. Bundes am für Umwelt 2012.

Begert, M., Schlegel, T., Kirchhofer, W. 2005: Homogenous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. International Journal of Climatology, 25, 65-80.

CH2011 2011: Swiss Climate Change Szenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88p, 2011

Christensen, J.H., and Christensen O.B. 2007: A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. Climatic Change, 81.

DWD 2013: Deutscher Wetterdienst (DWD) – Wetterlexikon, Starkregen. http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=S&DAT=Starkregen [07.07.2014]

EBP/SLF/WSL 2013: Risiken und Chancen des Klimawandels in der Schweiz; Methodenbericht; Ernst Basler + Partner AG, WSL, SLF; Bundesamt für Umwelt, Bern.

Fischer, A., Keller, Liniger, M., Rajczak, J., Schär, C., Appenzeller, C. 2014: Projected changes in precipitation intensity and frequency in Switzerland: a multi-model perspective. International Journal of Climatology. doi: 10.1002/joc.4162

Frei, C., Schöll, R., Fukutome, S., Schmidli, J. and Vidale P.L. 2006: Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 111.

Holzkämper, A., Fuhrer, J., Frei, Ch. 2013: Temperaturtrends und Rebbau in der Schweiz. Schweizer Zeitschrift für Obst- und Weinbau, 149, (1): 6-9.

Huglin, P. 1978: Nouveau mode d'évaluation des possibilities héliothermiques d'un milieu viticole. Proceedings of the Symposium International sur l'ecologie de la vigne. Ministère de l'Agriculture et de l'Industrie Alimentaire, Contança 89-98.

INFRAS 2015: Städtischer Wärmeinsel-Effekt – Grundlagenarbeit für die Klimarisikoanalysen 2060. Klimabedingte Risiken und Chancen: Fallstudien Kanton Basel-Stadt und Genf. Infras im Auftrag des Bundesamt für Umwelt - BAFU, 2015.

INFRAS 2014: Zeitreihe des additiven Wärmeinsel-Zuschlags für die Fallstudie Basel-Stadt und Genf. INFRAS im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt – BAFU, 2014.

INFRAS/Egli Engineering 2015a: Analyse klimabedingter Risiken und Chancen in der Schweiz – Regionale Fallstudie Kanton Basel-Stadt. INFRAS und Egli Engineering AG im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt - BAFU, 2015.

INFRAS/Egli Engineering 2015b: Analyse klimabedingter Risiken und Chancen in der Schweiz – Regionale Fallstudie Kanton Uri. INFRAS und Egli Engineering AG im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt - BAFU, 2015.

IPCC 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. [http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf] [07.07.2014].

Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, K.V., Daniel, J.S., Kainuma, L.T., Lamarque, J.-F., Matsumoto, K., Montzka, S.A., Raper, S.C.B., Riahi, K., Thomson, A.M., Velders, G.J.M. and van Vuuren D. 2011: The RCP Greenhouse Gas Concentrations and their Extension from 1765 to 2300. Climate Change (Special issue) 2011. [http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10584-011-0156-z] [07.07.2014].

MeteoSchweiz 2014a: Lieferung von Zeitreihen zur Temperatur und des Niederschlags für die Stationen Basel/Binningen und Genève-Cointrin. E-Mail von Stefan Bader (MeteoSchweiz) an Mario Betschart (INFRAS), 09.05.2014.

MeteoSchweiz 2014b: Klimaindikatoren Browser. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie – MeteoSchweiz 2014. [http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klima_heute/klimaindikatoren/indikatoren_browser.html] [07.07.2014].

MeteoSchweiz 2014c: Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz - Klimadiagramme und Klimanormwerte an Stationen. MeteoSchweiz 2014. http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klima_schweiz/klimadiagramme.html

MeteoSchweiz 2014d: Lieferung spezifischer Daten zur Temperatur, Niederschlag und verschiedener Klimaindikatoren für Klimaszenarien 2060 – Kanton Basel-Stadt und Genf, unpubliziert. Diverse E-Mails von Elias Zubler (MeteoSchweiz) an Mario Betschart (INFRAS), 2014.

MeteoSchweiz 2013a: Klimaszenarien Schweiz – eine regionale Übersicht, Fachbericht MeteoSchweiz, 243, 36 pp. [http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/forschung/publikationen/alle_publikationen/Klimaszenarien_Schweiz_2013.Par.0001.DownloadFile.tmp/fb243klimaszenarien2013.pdf] [07.07.2014]

Moberg, A. and Coauthors 2006: Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analyzed for the period 1901-2000. Journal of Geophysical Research and Atmospheres, Vol. 111.

NOAA 1992: NOAA Global Monitoring Division – ESRL – GMD. CO_2 at NOAA's Mauna Loa Observatory reaches new milestone: Tops 400 ppm. [http://www.esrl.noaa.gov/gmd/news/7074.html] [07.07.2014].

OcCC 2003: OcCC (Hg.) - Extremereignisse und Klimaänderung. Bern.

Perroud M. und Bader S. 2013: Klimaänderung in der Schweiz. Indikatoren zur Ursachen, Auswirkungen, Massnahmen. Umwelt-Zustand Nr. 1308. Bundesamt für Umwelt, Bern und Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, Zürich, 86 S. [http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01709/index.html?lang=de] [07.07.2014].

Rajczak, J., Pall, P. and Schär C. 2013: Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine Region. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Vol. 118, 1-17.

Schär, C., Vidale, P.L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger M.A., Appenzeller, C., 2004: The role of increasing temperature variability for European summer heat waves. Nature, 332-336, doi:10.1038/nature02300, also published on January 11, 2004, as Advance Online Publication, S. 4.

Schmidli, J. and Frei C. 2005: Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. International Journal of Climatology, 25, 753-771.

Trnka, J. et al. 2011: Agroclimatic conditions in Europe under climate change. Global Change Biology, 17: 2298-2318.

Van Vuuren, D., den Elzen, M., Lucas, P., Eickhout, B., Strengers, B., von Ruijven, B., Wonink, S. and van Houdt R. 2007: Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. Climatic Change, 2007.

Vogt, R., Parlow, E. 2011: Regio Basiliensis – Die städtische Wärmeinsel von Basel – tages- und jahreszeitliche Charakterisierung. Regio Basiliensis 52/1: 7-15, 2011

Zolina, O., Simmer, C., Belyaev, K., Kapala, A. and Gulev S. 2009: Improving Estimates of Heavy and Extreme Precipitation Using Daily Records from European Rain Gauges. Journal of Hydrometeorology, 10, 701-716.

Zubler et al. 2014a: Localized climate change szenarios of mean temperature and precipitation over Switzerland, Climatic Change, 2014

Zubler et al. 2014b: Key climate indices in Switzerland – expected changes in future climate, Climatic Change, 2014

Literatur Kapitel 2: Ableitung von Gefahren und Effekten aus Klimaszenarien 2060

CH2011 2011: Swiss Climate Change Szenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 S.

Egli, T. 2007: Wegleitung Objektschutz gegen meteorologische Naturgefahren. Vereinigung Kantonaler Gebäudeversicherungen, Bern, 146 S.

Hänggi, P., Weingartner, R. 2009: Zur Veränderung der hydrologischen Rahmenbedingungen für die Wasserkraftnutzung im Rheineinzugsgebiet bis Basel 1808-2007. Wasserbaukolloquium 2009: Wasserkraft im Zeichen des Klimawandels, Dresdener Wasserbauliche Mitteilungen Heft 39, S. 53-62.

Köplin, N., Schädler, B., Viviroli, D., Weingartner, R. 2013: Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climate change. Hydrological Process, Wiley Online Library, DOI: 10.1002/hyp.9757, S. 12.

Schär, C., Vidale, P.L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger M.A., Appenzeller, C., 2004: The role of increasing temperature variability for European summer heat waves. Nature, 332-336, doi:10.1038/nature02300, also published on January 11, 2004, as Advance Online Publication, S. 4.

Schmocker-Fackel, P., and Naef, F. 2010: Changes in flood frequencies in Switzerland since 1500. Hydrology and Earth System Sciences, 1581-1594, doi:10.5194/hess-14-1581-2010, S. 14.

Schwierz, C., Köllner-Heck, P., Zenklusen Mutter, E., Bresch, D.N., Vidale, P.-L., Wild, M., Schär, Ch., 2009: Modelling European winter wind storm losses in current and future climate. Climatic Change, 101 (3-4), doi:10.1007/s10584-009-9712-1, 485-514 S.

Steger, C., Kotlarski, S., Jonas, T., Schär, C., 2012: Alpine snow cover in a changing climate: a regional climate model perspective. Clim Dyn, doi 10.1007/s00382-012-1545-3, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.