Klimawandel in Schwabach

Anhang A

Auftraggeberin:
Stadt Schwabach

Erstellt von:
GEO-NET Umweltconsulting

in Kooperation mit:
MUST Städtebau
Dr. Pecher AG

1.1 Datengrundlagen und Methodik

Beobachteter Klimawandel

Die Beschreibung der klimatischen Entwicklung in Schwabach basiert auf interpolierten Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD; Kaspar et al. 2013). Die Daten weisen eine räumliche Auflösung von 1 x 1 km und eine zeitliche Auflösung von jährlichen Mittelwerten aus. Teilweise reichen die Beobachtungsdaten bis in das Jahr 1881 zurück (Jahresmitteltemperatur und Niederschlagssumme). Minimum- und Maximumtemperaturen sind seit 1901 verfügbar und Daten zu thermischen Kennwerten sowie Starkniederschlägen seit 1951.

Anhand der Stadtgrenze Schwabachs wurden die entsprechenden Punkte aus dem regelmäßigen 1 x 1 km- Gitter extrahiert, räumlich aggregiert und zu repräsentativen Zeitreihen zusammengestellt. Diese jährlichen Zeitreihen wurden direkt ausgewertet. Zudem wurden daraus die Mittelwerte über 30-jährige Perioden gebildet, um Aussagen zur langfristigen klimatischen Entwicklung treffen zu können.

Die aus Stationsdaten erzeugten Gitterdaten weisen gewisse Unsicherheiten auf, die aus einer über die Zeit veränderten Stationsdichte und der Lage, der für die Interpolation verwendeten Stationen, resultieren können. Ferner hat sich die Messtechnik im betrachteten Zeitraum weiterentwickelt, sodass bei älteren Zeitreihen höhere Messungenauigkeiten zu erwarten sind als bei Zeitreihen jüngeren Datums. Für die vorliegenden Auswertungen ist die Genauigkeit der Daten als vollkommen ausreichend anzusehen.

Erwarteter Klimawandel

Die Analyse zukünftiger klimatischer Änderungen stützt sich auf Daten numerischer, regionaler Klimamodelle der EURO-CORDEX-Initiative. EURO-CORDEX ist der europäische Zweig der CORDEX-Initiative, die regionale Projektionen des Klimawandels für alle terrestrischen Gebiete der Erde im Rahmen des Zeitplanes des fünften IPCC Assessment Reports (ARS) und darüber hinausstellt (Giorgi et al. 2009). EURO-CORDEX-Daten sind für die wissenschaftliche und kommerzielle Nutzung frei verfügbar und werden im Internet über mehrere Knoten der Earth System Grid Federation (ESGF) bereitgestellt[1].

Mit numerischen Klimamodellen kann das zukünftige Klima unter Annahme verschiedener Emissionsszenarien simuliert und analysiert werden. Wie alle Modelle sind Klimamodelle Abbilder der Wirklichkeit und somit nicht „perfekt". Die Ergebnisse von Klimamodellen beinhalten daher einen gewissen Anteil an Modellunsicherheit, der aus der Struktur des Modells, den verwendeten Techniken zur Modellierung der Atmosphärenphysik und der Parametrisierung bestimmter Prozesse resultiert. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, nicht nur die Simulationsergebnisse eines Modells, sondern mehrere Modelle zu verwenden, ein sogenanntes Modellensemble.

Diesem Ansatz folgend, wurde für die Analyse der zukünftigen klimatischen Entwicklung von Schwabach ein Modellensemble bestehend aus 39 Mitgliedern verwendet, d.h. Kombinationen aus globalen und regionalen Klimamodellen, die mit jeweils unterschiedlichen Klimaszenarien angetrieben werden (Tab. A 1, im Anhang). Da EURO-CORDEX ein fortlaufendes Projekt ist und die Datenbanken mit den Modellergebnissen permanent aktualisiert werden, können bis zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichtes weitere Modelläufe für Europa hinzugekommen sein, die in der Auswertung nicht enthalten sind. Die Mitglieder des Ensembles werden als gleichberechtigt angesehen und die Unterschiede in den Ergebnissen als Modellvariabilität betrachtet. Alle nachfolgenden Auswertungen wurden in enger Anlehnung an die Leitlinien zur Interpretation von Modelldaten des Bund-Länder-Fachgesprächs „Interpretation regionaler Klimamodelldaten" durchgeführt (Linke et al. 2016).

Räumliche und zeitliche Auflösung

Für die Auswertung wurden bis zum Jahr 2100 projizierte Daten mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag und einer räumlichen Auflösung von ca. 12,5 km (0,11°) verwendet. Die Auswahl der entsprechenden Daten aus dem Gitter der Modellsimulationen, das Europa flächendeckend überspannt, erfolgte durch die Identifikation und Auswahl des dem Mittelpunkt von Schwabach am nächsten gelegenen Gitterpunkts sowie der acht umliegenden Gitterpunkte. Die an diesen Gitterpunkten vorliegenden Zeitreihen

[1] Homepage: www.euro-cordex.net

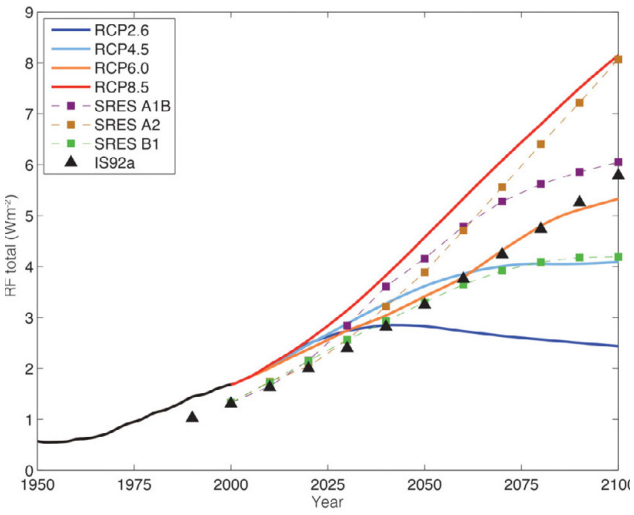
der betrachteten meteorologischen Variablen wurden für jeden Zeitschritt (ein Tag) räumlich aggregiert, um auf diese Weise einheitliche, repräsentative Zeitreihen zu erhalten (vgl. DWD 2020a).

RCP-Szenarien

Hauptverantwortlich für den Anstieg der globalen Mitteltemperaturen sind anthropogen bedingte CO2-Emissionen. Da heute noch nicht absehbar ist, wie sich die CO_2-Emissionen zukünftig entwickeln, werden diese in Klimamodellen in Form von Szenarien mit unterschiedlicher CO_2-Entwicklung über die Zeit berücksichtigt, die bis zum Ende des Jahrhunderts einen bestimmten Strahlungsantrieb hervorrufen. Für Europa stehen aktuell drei verschiedene Klimaszenarien zur Verfügung: RCP 2.6, 4.5 und 8.5 (RCP = *Representative Concentration Pathways*), die seit dem fünften IPCC-Bericht die SRES-Szenarien abgelöst haben (*Special Report on Emissions Scenarios*). Die Zahl in der Bezeichnung der Szenarien benennt den mittleren Strahlungsantrieb in W/m², der in ihrem projizierten Verlauf zum Ende des 21. Jahrhunderts erreicht wird (Moss et al. 2010; Abb. 6):

- Das RCP-Szenario 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf ca. 3 W/m². Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf 2,6 W/m² ab. Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario das 2 °C-Ziel nicht überschreiten, sodass RCP 2.6 als „Klimaschutzszenario" bezeichnet wird.
- RCP 4.5 zeigt einen steilen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts, der danach bis ca. 2075 nur noch geringfügig steigt und in der Folge stagniert.
- Das RCP-Szenario 8.5 weist den stärksten Anstieg des Strahlungsantriebes auf, der sich bis zum Ende des Jahrhunderts nicht abschwächt und eine Zunahme der globalen Mitteltemperatur um ca. 4,8 °C gegenüber dem Zeitraum 1985 – 2005 bewirken würde. Das RCP 8.5 wird auch als „Weiter-wie-bisher-Szenario" bezeichnet.

Abb. 1 Anthropogener Strahlungsantrieb der verschiedenen IPCC-Klimaszenarien (die schwarze Linie repräsentiert Messwerte; Cubasch et al. 2013)



Die weltweiten CO_2-Emissionen verzeichnen seit den 1950er-Jahren einen permanenten Anstieg. Aktuell befinden wir uns, nach den Ergebnissen des Global Carbon Projektes, mit den globalen CO_2-Emissionen auf dem „Pfad" des RCP-Szenarios 8.5 (Boden 2017, Peters et al. 2013). Selbst ein abrupter weltweiter Rückgang des CO_2-Ausstoßes würde, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, in Kürze keine signifikante Änderung herbeiführen. Im vorliegenden Bericht sind aus diesem Grund vornehmlich Grafiken zu Klimaänderungen des RCP-Szenarios 8.5 platziert, die Auswertungen der RCP-Szenarien 2.6 und 4.5 finden sich jeweils im Anhang.

Meteorologische Kenntage

Eine etablierte Methode zur Beschreibung von klimatischen Änderungen ist die Verwendung von Kenntagen. Dies sind z.B. die Anzahl von Sommertagen oder Tropennächten innerhalb eines zu benennenden Zeitraumes (oftmals jährlich). Die Bestimmung dieser Kenntage kann entweder anhand von Schwellenwerten wie bspw. $T_{max} \geq 25$ °C für Sommertage (schwellenwertbasiert) oder anhand von statistischen Maßen wie bspw. dem 95. Perzentil der statistischen Verteilung erfolgen (perzentilbasiert; siehe ReKliEs-De 2017). Für die Betrachtung des zukünftigen Klimawandels in Schwabach wurden schwellenwertbasierte Kenntage verwendet.

Einige Modellläufe der regionalen Klimamodelle zeigen bei bestimmten meteorologischen Variablen teilweise systematische Abweichungen (Bias) von den realen Gegebenheiten. Es wird davon ausgegangen, dass der Wertebereich der Abweichungen für den Referenzzeitraum in etwa genauso groß ist wie für die Zukunftszeiträume. Bei einer ausschließlichen Betrachtung der Unterschiede zwischen Zukunft und Referenz haben die Abweichungen, also deren Differenz, daher keinen Einfluss auf die Aussage.

Bei der schwellenwertbasierten Berechnung von Kenntagen können die benannten systematischen Abweichungen jedoch zu einer Unter- bzw. Überschätzung der Schwellenwerte im Vergleich zu den beobachteten Werten führen. „Ist ein Modell z.B. im Mittel etwas zu warm, so werden in diesem Modell möglicherweise auch besonders viele warme und/oder besonders wenige kalte Kenntage identifiziert" (ReKliEs-De 2017). Aus diesem Grund wurden für jede Modellsimulation die Schwellenwerte mit der Methode des Quantile-Mappings adjustiert (Piani et al. 2010, Themeßl et al. 2011). Für jeden Kenntag wurde dementsprechend aus den Beobachtungsdaten das jeweilige Perzentil der statistischen Verteilung berechnet und anhand dieses Perzentilwertes aus dem Referenzlauf jeder Modellsimulation der adjustierte Schwellenwert bestimmt (vgl. Abb. A 1 im Anhang). Die Auswertung der Regionalmodellsimulationen wurde dann mit den adjustierten Kenntagen durchgeführt, um systematische Verzerrungen der Ergebnisse weitgehend zu vermeiden.

Statistische Auswertung

Die Analyse des zukünftigen Klimawandels wurde mit zwei methodisch unterschiedlichen Herangehensweisen durchgeführt. Im ersten Ansatz wurden die Daten des Modellensembles zu zusammenhängenden Zeitreihen von 1971 – 2100 verknüpft und für jede betrachtete Variable untersucht, ob ein zeitlicher linearer Trend vorliegt und die Trendentwicklung statistisch signifikant ist. Die statistische Signifikanz wurde anhand des Trend-/Rauschverhältnisses ermittelt (vgl. Tab. A 2 im Anhang).

Für die Beschreibung des zukünftigen Klimawandels werden klimatische Beobachtungen einer sogenannten Referenzperiode benötigt. Diese sollte einen Zeitraum umfassen, in dem die klimatischen Auswirkungen der globalen Erwärmung noch nicht so stark in Erscheinung getreten sind. Die World Meteorological Organisation (WMO) empfiehlt die Verwendung der sogenannten 30-jährigen Klimanormalperiode von 1961 – 1990. Da jedoch bei einigen der verwendeten regionalen Klimamodelle der Zeitraum des Referenzlaufs erst 1971 beginnt, wurde hier der Zeitraum von 1971 – 2000 als Referenzperiode festgelegt. Dieser ist im Verhältnis zu den betrachteten Zukunftszeiträumen noch ausreichend wenig vom Klimawandel beeinflusst, sodass eine vergleichende Betrachtung die wesentlichen klimatischen Veränderungen aufzeigt.

Das Klima eines Raumes wird repräsentiert durch den mittleren Zustand der Atmosphäre über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren, deshalb wurden im zweiten Ansatz für jede Variable zeitliche Mittelwerte über folgende Zeiträume berechnet:

- Referenzperiode: 1971 – 2000
- 1. Zukunftsperiode (nahe Zukunft):
- 2021 – 2050
- 2. Zukunftsperiode (mittelfristige Zukunft): 2041 – 2070
- 3. Zukunftsperiode (ferne Zukunft): 2071 – 2100

Von den einzelnen Variablen-Mittelwerten der jeweiligen Zukunftsperiode wurden die zugehörigen Mittelwerte der Referenzperiode subtrahiert und somit die langjährigen mittleren Änderungen für jede Variable berechnet. Die statistische Signifikanz der Änderungen wurde nach einem vom Bund-Länder-Fachgespräch zur „Interpretation von Modelldaten" vorgeschlagenen statistischen Testschema ermittelt (vgl. Linke et al. 2016). Das Signifikanzniveau wurde einheitlich auf 95 % festgelegt. Dabei ist unbedingt zu beachten, dass die Referenzläufe mit den Beobachtungsdaten des gleichen Zeitraumes nur in ihren klimatisch relevanten, statistischen Eigenschaften übereinstimmen. Sie sind auf kleineren Skalen (Jahre, Monate, Tage) nicht exakt miteinander vergleichbar.

Die nachfolgenden Ausführungen enthalten eine Vielzahl von Grafiken in Form sogenannter Box-Whisker Plots. Diese haben den Vorteil, dass die Kennwerte statistischer Verteilungen schnell erfassbar und vergleichbar sind (Abb. 2).

1.2 Bisheriger Klimawandel in Schwabach

Schwabach ist im Mittelfränkischen Becken zu verorten. Dieses liegt klimatisch im Übergangsbereich des maritimen Klimas, geprägt durch milde Winter, kühle Sommer und eine höhere Luftfeuchtigkeit und des kontinentalen Klimas, welches sich wiederum auszeichnet durch kalte Winter, warme Sommer und eine geringe Luftfeuchtigkeit (Nagl 1997). Aufgrund der Übergangslage ist das Klima stark von den Großwetterlagen beeinflusst. Dies bedeutet, dass sich bei Auftreten von West- und Nordwestwetter der maritime Einfluss niederschlägt, welcher sich durch gemäßigte Temperaturen, hohe Luftfeuchte und Niederschlagsreichtum auszeichnet. Ostwetterlagen hingegen haben trockenes, wolkenarmes Wetter mit höheren Temperaturen im Sommer und niedrigeren im Winter zur Folge (Nagl 1997). Die sommerliche Durchschnittstemperatur in Schwabach liegt bei 18 °C, während sie in den Wintermonaten bei -0,5 °C liegt (Durchschnitt für die Donauregion jeweils aus der Referenzperiode 1971 bis 2000) (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2021).

Die **Jahresmitteltemperatur** in der Referenzperiode 1971 – 2000 beträgt 8,6 °C. Mit Blick in die Vergangenheit wird deutlich, dass in Schwabach – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. So ist die Temperatur seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen um 1,5 °C gestiegen (Mittelwert 1991 – 2020 im Vergleich zu 1881 – 1910). Die fünf wärmsten Jahre sind seit 1881 allesamt in den letzten drei Dekaden aufgetreten – darunter die Top 3 Jahreswerte allein in den letzten sechs Jahren (Abb. 3).

Die beobachtete Erwärmung geht mit einer deutlichen Veränderung der Anzahl meteorologischer Kenntage einher. So ist die Anzahl an Sommertagen in Schwabach um 14 Tage auf durchschnittlich 52 Tage pro Jahr im Vergleich der Perioden 1961 – 1990 zu 1991 – 2020 gestiegen. Ebenso hat sich die Auftrittshäufigkeit der, als besonders belastend geltenden, Heißen Tage fast verdoppelt (Tab. 1). Eine entgegengesetzte Entwicklung zeigen Frost- bzw. Eistage, deren Anzahl im selben Zeitraum um 13 bzw. 6 Tage pro Jahr zurückgegangen ist. Tropennächte treten gegenwärtig relativ selten auf, sodass die beobachteten Änderungen statistisch nicht ausreichend belastbar sind.

In Bezug auf den **Niederschlag** sind in der Vergangenheit geringfügige Auswirkungen durch den Klimawandel festzustellen. Zwar zeigt sich ein Trend steigender Jahresniederschläge seit Beginn der systematischen Messungen Ende des 19. Jahrhunderts (Abb. A 2 im Anhang). Über die letzten ca. 60 Jahre sind jedoch keine relevanten Veränderungen auszumachen und die mittlere jährliche Niederschlagsmenge schwankte um 670 mm (Tab. 1).

Mit der zunehmenden Erwärmung steigt das Potenzial für Starkniederschläge, die statistisch schwer zu erfassen sind, da sie eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität besitzen und oftmals nur lokal auftreten. Eine flächendeckende Erfassung solcher Ereignisse mittels Radars ist erst seit Beginn des 21. Jahrhunderts möglich (Radar-Online-Aneichung; vgl. DWD 2021). Diese Zeitreihen sind jedoch noch zu kurz, um gesicherte klimatische Aussagen treffen zu können. Längere Zeitreihen liegen für Tageswerte des Niederschlags vor. Dabei können nur Häufigkeiten von Niederschlägen über einem bestimmten Schwellenwert ausgewertet werden (bspw. Tage > 10 mm Niederschlag), eine Kombination mit der Dauer des zugehörigen Ereignisses ist nicht möglich.

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts sind in Schwabach keine signifikanten Änderungen an Tagesniederschlägen von mehr als 10, 20 bzw. 30 mm zu erkennen (Tab. 1). Für die Anzahl an Tagen mit Niederschlägen > 30 mm deutet sich eine leicht zunehmende Häufigkeit an (Abb. 4), die aufgrund ihrer Seltenheit jedoch statistisch nicht abschließend belegt werden kann.

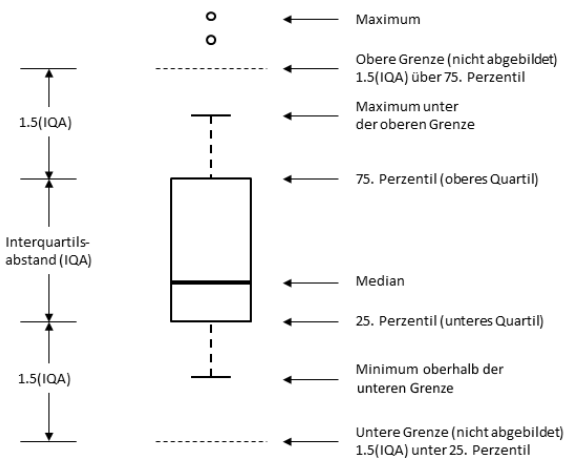


Abb. 2 Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker-Plots

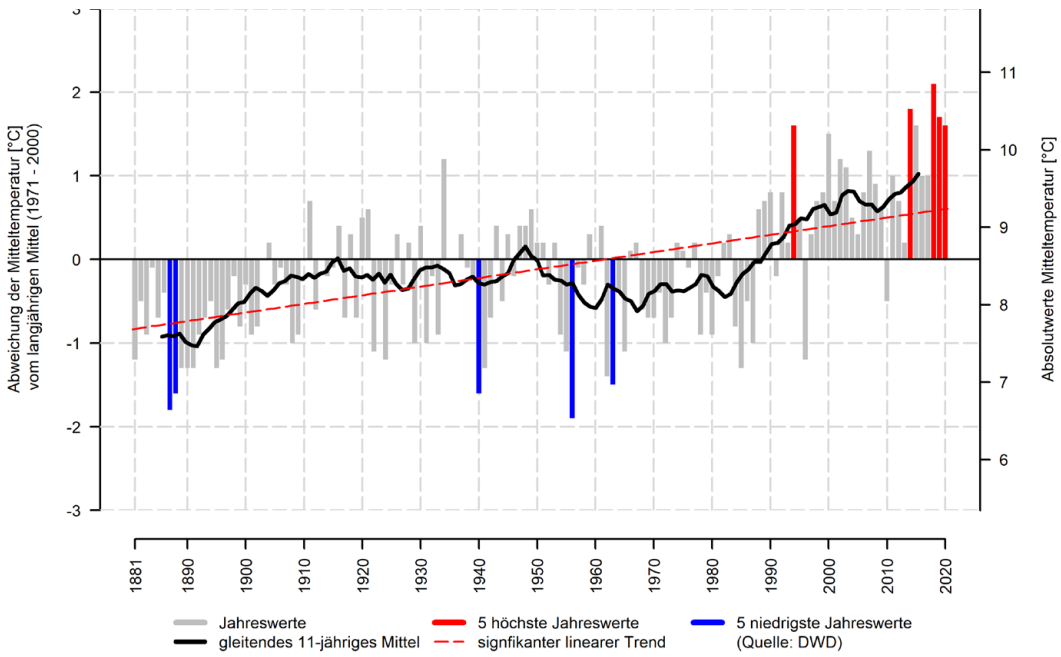


Abb. 3 Entwicklung der Mitteltemperatur in Schwabach im Zeitraum von 1881 bis 2019 (eigene Berechnung nach DWD 2020b)

1.3 Zukünftiger Klimawandel in Schwabach

Temperaturzunahme & Hitze

Alle drei RCP-Szenarien projizieren ein deutliches Ansteigen der **Jahresmitteltemperatur** in Schwabach bis zum Jahr 2100. Dies gilt nicht nur für den in Abb. 5 gezeigten Median des Modellensembles, vielmehr weisen sämtliche Modellkombinationen des Ensembles einen Anstieg der jährlichen Mitteltemperaturen auf, sodass der Trend als äußerst robust einzuschätzen ist. Noch stärker als die Mitteltemperaturen steigen die Maximum- und insbesondere

	1961-1990	1971-2000	1990-2020
tägliches Maximum der Lufttemperatur [°C]	13	13,3	14,2
Mittelwert der Lufttemperatur [°C]	8,2	8,6	9,4
tägliches Minimum der Lufttemperatur [°C]	3,7	4,1	4,6
Sommertage ($T_{max} \geq 25°C$) [n/Jahr]	38	41	52
Heiße Tage ($T_{max} \geq 30°C$) [n/Jahr]	7	8	13
Tropennächte ($T_{min} \geq 20°C$) [n/Jahr]	keine Angabe	0,1	0,2
Frosttage ($T_{min} < 0°C$) [n/Jahr]	107	102	94
Eistage ($T_{max} < 0°C$) [n/Jahr]	25	22	19
Jahresniederschlag [mm/Jahr]	672	671	662
Tage mit Niederschlag > 10 mm [n/Jahr]	17	17	17
Tage mit Niederschlag > 20 mm [n/Jahr]	4	4	4
Tage mit Niederschlag > 30 mm [n/Jahr]	1	1	1

Tab. 1 Langjährige mittlere Entwicklung der Temperaturen, des Niederschlags sowie von meteorolog. Kenntagen in Schwabach in der Vergangenheit (nach DWD 2020c bzw. für die Tropennächte DWD-Daten Bayern (DWD 2021a))

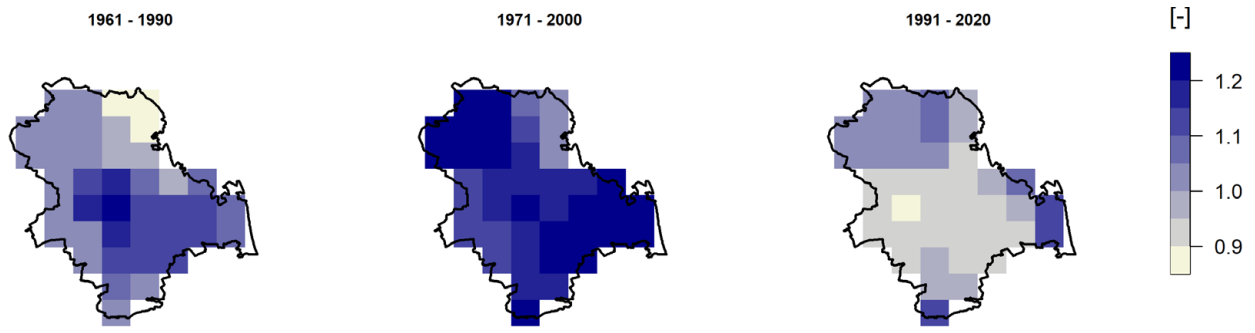


Abb. 4 Langjährige Entwicklung der jährlichen Anzahl an Tagen mit einem Niederschlag > 30 mm in Schwabach (nach DWD 2020c)

Minimumtemperaturen[2] (Tab. 2).

Der Temperaturanstieg fällt im RCP-Szenario 8.5 am stärksten aus. Dabei tritt in allen drei Zukunftsperioden eine deutliche Zunahme auf, wobei die stärksten Zunahmen am Ende des Jahrhunderts zu verzeichnen sind. Im RCP-Szenario 2.6 wird ein moderater Temperaturanstieg und ungefähr ab Mitte des Jahrhunderts eine Stagnation erwartet, da sich dann die positiven Auswirkungen der im RCP 2.6 angenommenen globalen Klimaschutzmaßnahmen bemerkbar machen.

Zum Ende des Jahrhunderts nimmt die Unsicherheit und damit auch Variabilität der erwarteten Temperaturänderung zu, was durch den Möglichkeitsbereich abgebildet wird (kleinster bis größter Wert in den Modellergebnissen). Der Erwartungsbereich zeigt die Bandbreite zwischen dem 15. und 85. Perzentil des Modellensembles. Ferner sei darauf hingewiesen, dass der in Abb. 5 abgebildete, bereits vergangene Zeitraum ab 1971 durch Modelldaten und nicht durch Beobachtungsdaten repräsentiert wird (dies gilt für alle Diagramme mit Zeitreihen von Modelldaten in diesem Kapitel).

Im Jahresgang ist ein Temperaturanstieg in allen Monaten erkennbar, jedoch treten im Sommer und Winter größere Temperaturänderungen auf als im Frühjahr und Herbst (Abb. 6). Dieses Muster zeigen alle drei RCP-Szenarien (vgl. Abb. A 3 im Anhang), wobei die Zunahmen im RCP 8.5 am höchsten ausfallen und sich generell zum Ende des Jahrhunderts verstärken (rote Boxen in Abb. 6).

Der projizierte Temperaturanstieg steht in direktem Zusammenhang mit der Entwicklung thermischer Kenntage, die eine anschaulichere Sicht auf klimatische Änderungen zulassen. So nimmt die durchschnittliche jährliche Anzahl an **Sommertagen** und **Heißen Tagen** zukünftig deutlich zu (Tab. 3). Bspw. ist im RCP 8.5 zum Ende des Jahrhunderts hin im Mittel mit 38 Heißen Tagen pro Jahr zu rechnen, während

[2] Minimum- bzw. Maximumtemperaturen beschreiben entweder den jährlichen oder 30-jährigen Mittelwert der täglichen Tiefst- bzw. Höchsttemperatur.

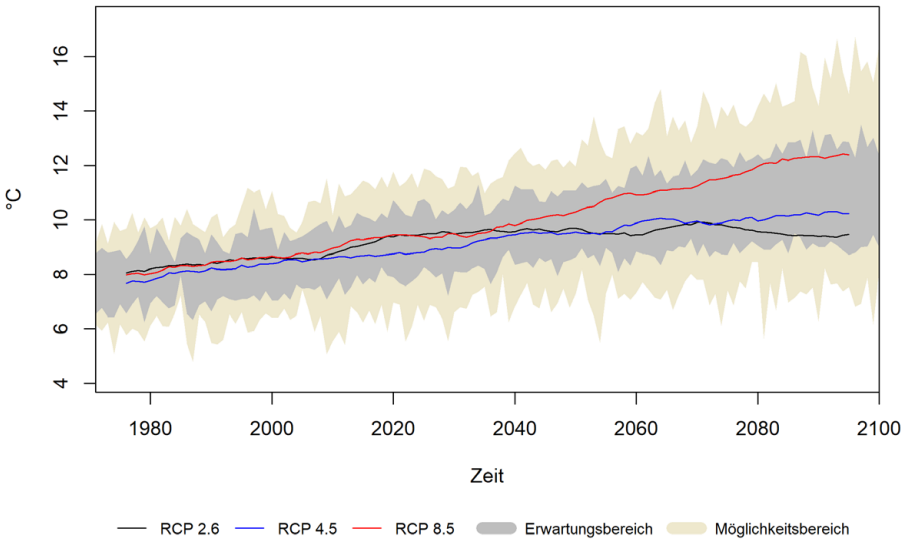


Abb. 5 Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Schwabach (alle RCP-Szenarien)

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2021 – 2050			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	**P 50**	P 85	P 15	**P 50**	P 85	P 15	**P 50**	P 85
Jahresmittel-temperatur [°C]	RCP 2.6	0,8	**1,0**	1,7	0,9	**1,2**	1,6	0,9	**1,1**	1,7
	RCP 4.5	0,9	**1,2**	1,7	1,1	**1,8**	2,4	1,6	**2,1**	2,8
	RCP 8.5	1	**1,6**	2	1,9	**2,5**	3,1	3,2	**4**	5
Mittleres Tagesmi-nimum der Tempe-ratur [°C]	RCP 2.6	1,3	**2,1**	3	1,9	**2,6**	3,2	1,8	**2,6**	4,2
	RCP 4.5	1,7	**2,8**	4,7	2,4	**3,9**	5,9	4	**4,9**	5,8
	RCP 8.5	2	**3,4**	4,7	4,1	**4,9**	8	6,3	**8,9**	10,7
Mittleres Tagesma-ximum der Tempe-ratur [°C]	RCP 2.6	0,7	**1,3**	2,4	0,8	**1,6**	2,2	0,8	**1,4**	2,6
	RCP 4.5	0,8	**1,6**	2,6	1,4	**2,2**	3,4	1,6	**2,2**	4
	RCP 8.5	1,1	2	2,7	2,2	**3,3**	4,6	4	5,1	7,4

Tab. 2 Langjährige Änderung der Temperatur in Schwabach (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median)

diese in der Referenzperiode nur 8-mal jährlich auftraten (1971 – 2000).

Tropennächte treten in Schwabach derzeit nur unregelmäßig auf. In der nahen Zukunft (2021 – 2050) werden zusätzlich 1 bis 3 Tropennächte pro Jahr (Tab. 3), also bis zu 3 Tropennächte pro Jahr, erwartet, wobei die statistische Signifikanz aufgrund des seltenen Auftretens eingeschränkt ist. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts wird die Entwicklung stark vom zugrunde gelegten Szenario beeinflusst. Während die Häufigkeit von Tropennächten im RCP 2.6 stagniert bzw. nur leicht steigt, prognostiziert das RCP 8.5 eine deutliche Zunahme. Demnach wären in der 3. Zukunftsperiode 8 bis 24 Tropennächte pro Jahr in Schwabach möglich. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Klimamodelle den Wärmeinseleffekt nicht erfassen, d.h. in innerstädtischen Bereichen eine höhere Anzahl an Tropennächten anzunehmen ist.

Die Zunahme der Heißen Tage lässt auf eine künftig steigende Häufigkeit von Hitzeperioden und Hitzewellen schließen. Für **Hitzeperioden** gibt es keine

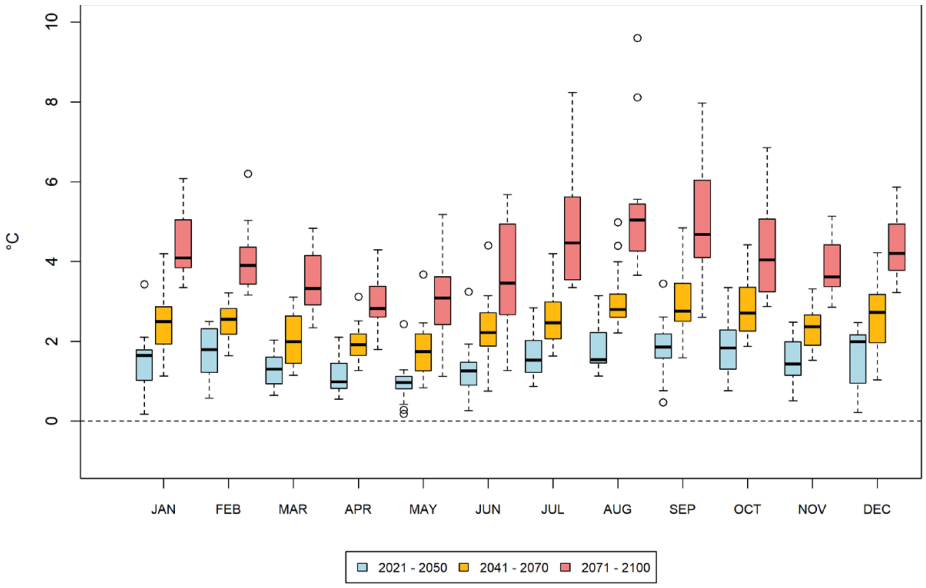


Abb. 6 Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Schwabach (RCP 8.5)

Kenntag	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2021 – 2050			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 85	**P 15**	P 50	P 85	**P 15**	P 50	P 85	**P 50**	P 85
Sommertage ($T_{max} \geq 25°C$) [n/Jahr]	RCP 2.6	20	**10**	13	20	**9**	13	18	**10**	15
	RCP 4.5	16	**12**	22	28	**18**	21	28	**16**	21
	RCP 8.5	20	**20**	27	39	**41**	47	64	**35**	58
Heiße Tage ($T_{max} \geq 30°C$) [n/Jahr]	RCP 2.6	11	**3**	5	11	**4**	6	12	**4**	6
	RCP 4.5	9	**7**	11	14	**9**	10	15	**4**	6
	RCP 8.5	13	**10**	15	21	**22**	30	40	**16**	24
Tropennächte ($T_{min} \geq 20°C$) [n/Jahr]	RCP 2.6	1	**1**	1	1	**1**	1	2	**3**	4
	RCP 4.5	2	**1**	2	4	**2**	3	5	**6**	9
	RCP 8.5	3	**2**	4	7	**8**	13	24	**19**	26
Frosttage ($T_{min} < 0°C$) [n/Jahr]	RCP 2.6	-14	**-27**	-20	-15	**-28**	-19	-16	**-13**	-10
	RCP 4.5	-16	**-40**	-31	-20	**-50**	-42	-31	**-26**	-18
	RCP 8.5	-20	**-46**	-42	-35	**-72**	-66	-63	**-37**	-35
Eistage ($T_{max} < 0°C$) [n/Jahr]	RCP 2.6	-5	**-10**	-8	-7	**-11**	-9	-7	**-6**	-4
	RCP 4.5	-5	**-17**	-12	-5	**-17**	-14	-10	**-7**	-6
	RCP 8.5	-6	**-17**	-15	-9	**-21**	-20	-18	**-13**	-10

Tab. 3 Langjährige Änderung thermischer Kenntage in Schwabach (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median)

eindeutige Definition. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um einen Zeitraum mit länger anhaltenden ungewöhnlich hohen Temperaturen. Wird eine Tageshöchsttemperatur von 30 °C verwendet und die Länge aufeinanderfolgender Tage betrachtet, die diesen Schwellenwert mindestens erreichen, zeigt sich, dass Hitzeperioden in Schwabach zukünftig länger andauern (Abb. A 4 im Anhang). Je nach Szenario erhöht sich die Länge von Hitzeperioden bis Ende des Jahrhunderts um 1 bis 11 Tage.

Neben den auf die hohen Temperaturen abzielenden Kenntagen führt die eingangs beschriebene deutliche Zunahme der Minimumtemperaturen zu einer Abnahme an **Frost- und Eistagen**. In Schwabach werden im langjährigen Mittel 106 Frosttage bzw. 20 Eistage pro Jahr beobachtet (Referenzperiode 1971 – 2000). Gemäß des RCP-Szenarios 8.5 würden zum Ende des Jahrhunderts im Mittel jährlich nur noch 40 Frosttage bzw. keine Eistage auftreten.

Dieser Trend lässt ein häufigeres Auftreten milderer Winter erwarten, die eine geringere Zahl an **Tagen mit Frost- und Tauwechseln** und eine verlängerte **Vegetationsperiode** nach sich ziehen.

Niederschlagsverschiebung

In Bezug auf die **Jahresniederschlagssumme** sind in Schwabach keine eindeutigen Auswirkungen durch den Klimawandel auszumachen. Wird der Median aller Modellrechnungen herangezogen, zeigen die RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 leicht steigende Jahresniederschläge über das 21. Jahrhundert, während infolge des RCP 2.6 langfristig keine relevanten Änderungen zu erwarten sind (Tab. 4, auch Abb. A 5 im Anhang). Mit Blick auf den Erwartungsbereich[3] zeigt

[3] In der Bandbreite vom 15. bis 85. Perzentil liegende Modellergebnisse

sich eine gewisse Variabilität zwischen den Modellen, die teilweise leichte Abnahmen voraussagen, in der Mehrzahl jedoch auf relativ geringe Auswirkungen schließen lassen – bis auf wenige Ausnahmen weicht der zukünftige mittlere Jahresniederschlag um weniger als 10 % von den derzeitigen Verhältnissen ab. Insgesamt kann für Schwabach eine Tendenz zukünftig leicht steigender Jahresniederschläge abgeleitet werden, die aufgrund der relativ geringen Änderungen jedoch keine statistische Signifikanz aufweist.

Neben den **Niederschlagssummen** ist der Zeitpunkt, wann es (wieviel) regnet entscheidend u.a. für die Vegetation und den Bodenwasserhaushalt. Der Blick auf den Jahresgang offenbart saisonale Unterschiede in der zukünftigen Entwicklung des Niederschlags. In allen RCP-Szenarien ist eine Tendenz geringerer Niederschläge im Sommer und leicht höherer Werte in den übrigen Monaten zu erkennen. Am stärksten treten diese Effekte bei langfristiger Betrachtung bis Ende des Jahrhunderts und im RCP-Szenario 8.5 auf, das gerade für den Juli und August deutlich geringere Niederschlagssummen projiziert (Abb. 7). Die RCP-Szenarien 2.6 und RCP 4.5 weisen, wenn auch in geringerer Ausprägung, dieselben Änderungsmuster auf (Abb. A 6 im Anhang). Die in den Abbildungen wahrnehmbare Niederschlagsverschiebung mit Abnahmen im Sommer und Zunahmen vornehmlich im Winter beinhaltet statistische Unsicherheiten, sollte jedoch als auffallende Tendenz mindestens Erwähnung finden.

Trockenheit

Begriffe wie Trockenheit oder Dürre sind nicht eindeutig definiert und die Bewertung dieser Ereignisse hängt oftmals von der jeweiligen fachlichen oder individuellen Sichtweise ab. Im allgemeinen Verständnis sind Trockenheit und Dürre durch einen Mangel an Wasser oder Feuchtigkeit gekennzeichnet, der aus einem Niederschlagsdefizit resultiert und über einen längeren Zeitraum zu Wasserknappheit führen kann. Ein Indikator für Trockenheit ist die klimatische Wasserbilanz als Differenz von Niederschlag (Wasserdargebot) zu potenzieller Verdunstung (Wasserverlust).

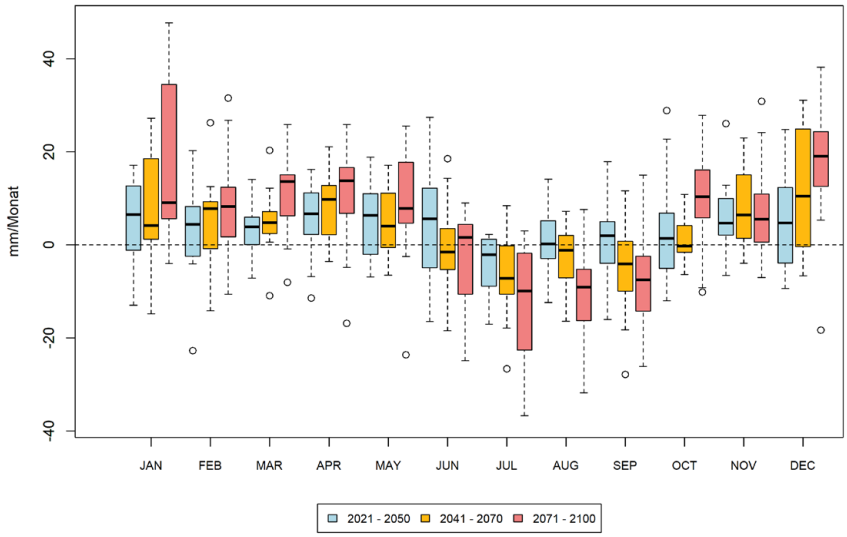
In der Jahressumme sind keine relevanten Änderungen der klimatischen Wasserbilanz in Schwabach feststellbar. Die erwarteten monatlichen Änderungen weisen allerdings entscheidende jahreszeitliche Differenzen auf. Während die Winter- und Frühjahrsmonate überwiegend (leicht) positive Änderungen der klimatischen Wasserbilanz zeigen, sind im RCP 8.5 in den Monaten Juni bis September Abnahmen erkennbar (Abb. 8). Diese **saisonale Verschiebung der klimatischen Wasserbilanz** gilt für alle drei Zukunftsperioden, wobei die Effekte am deutlichsten zum Ende des Jahrhunderts auftreten. In der 1. Zukunftsperiode fallen die Änderungen in den Sommermonaten noch relativ gering aus, doch kann diese Tendenz die zukünftige Situation gerade in heute bereits von Wasserknappheit betroffenen Gebieten verschärfen. Genau wie beim Niederschlag zeigt die Entwicklung in den RCP-Szenarien 2.6 und 4.5 vergleichbare Muster (Abb. A 7 im Anhang), doch muss berücksichtigt werden, dass die genannten Ergebnisse wiederum mit Unsicherheiten behaftet sind, da die Variabilität des Niederschlags mitentscheidend für die klimatische Wasserbilanz wirkt.

Die abnehmende klimatische Wasserbilanz im Sommer lässt häufigere bzw. längere anhaltende Trockenperioden vermuten, jedoch sind die in den Modellen projizierten Änderungen zu gering, um valide Aussagen treffen zu können (vgl. exemplarisch die Häufigkeit extremer Trockenperioden in Abb. A 8 im Anhang).

Tab. 4 Langjährige Änderung der mittl. Niederschlagssumme in Schwabach (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median)

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2021 – 2050			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	**P 50**	P 85	P 15	**P 50**	P 85	P 15	**P 50**	P 85
Jahresniederschlag [mm/Jahr]	RCP 2.6	-9	**19**	56	-15	**13**	44	-22	**5**	30
	RCP 4.5	3	**14**	67	-4	**38**	77	28	**50**	94
	RCP 8.5	10	**40**	74	1	**44**	76	5	**59**	114

Abb. 7 Änderung der langjährigen mittleren monatlichen Niederschlagssummen in Schwabach (RCP 8.5)



Starkniederschlag

Mehr noch als die mittleren Niederschlagssummen ist besonders für Städte und Gemeinden die Frage der Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen relevant. Verschiedene Ereignisse in jüngster Vergangenheit haben gezeigt, dass diese ein erhebliches Schadens- und Gefahrenpotenzial besitzen.

Als Starkniederschläge (synonym: Starkregen) werden Niederschläge bezeichnet, die eine hohe Intensität, d.h. eine im Verhältnis zu ihrer Dauer große Niederschlagssumme aufweisen. Starkregenereignisse können dabei sowohl Niederschläge kurzer Dauer als auch mehrerer Stunden oder über Tage anhaltende Niederschläge sein (Rauthe et al. 2014). Neben der Dauer eines solchen Ereignisses ist die Größe der betroffenen Fläche wesentlich.

Der DWD warnt vor Starkregen in zwei Stufen, wenn folgende Schwellenwerte voraussichtlich überschritten werden: Regenmenge ≥ 10 mm/1 h bzw. ≥ 20 mm/6 h (Markante Wetterwarnung) oder Regenmenge ≥ 25 mm/1 h bzw. ≥ 35 mm/6 h (Unwetterwarnung; DWD 2020d). In der Klimaforschung wird meist die Tagesniederschlagssumme betrachtet. Dabei werden Schwellenwerte festgelegt (z.B. N ≥ 20 mm/d), deren Überschreitung als Starkniederschlag verstanden werden kann. Diese sind jedoch nicht einheitlich definiert, sodass verschiedene Ansätze zu deren Bestimmung existieren. In diesem Bericht werden folgende Schwellenwerte der täglichen Niederschlagssumme zur Identifizierung von Starkregenereignissen festgelegt:

- Starker Niederschlag: N ≥ 10 mm/d
- Stärkerer Niederschlag: N ≥ 20 mm/d
- Starkniederschlag: N ≥ 30 mm/d

Starkregenereignisse treten relativ selten auf, sodass auch die mittleren jährlichen Änderungen der Häufigkeit solcher Ereignisse äußerst gering ausfallen und statistische Auswertungen nur bedingt möglich

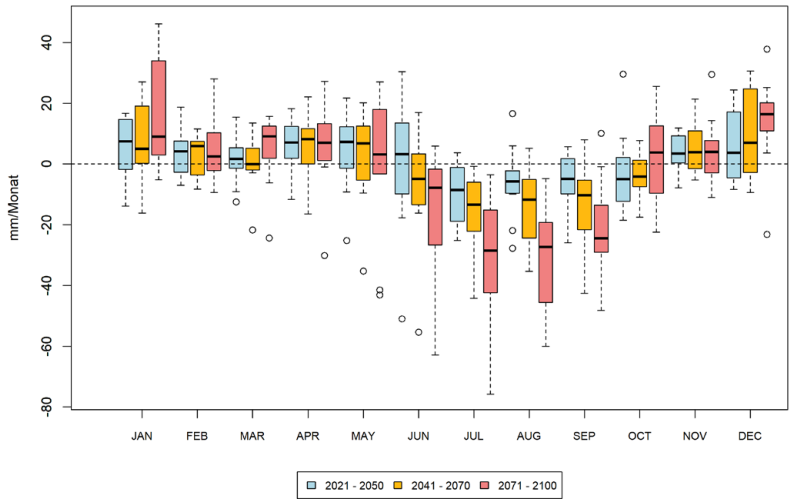


Abb. 8 Änderung der langjährigen mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz in Schwabach (RCP 8.5)

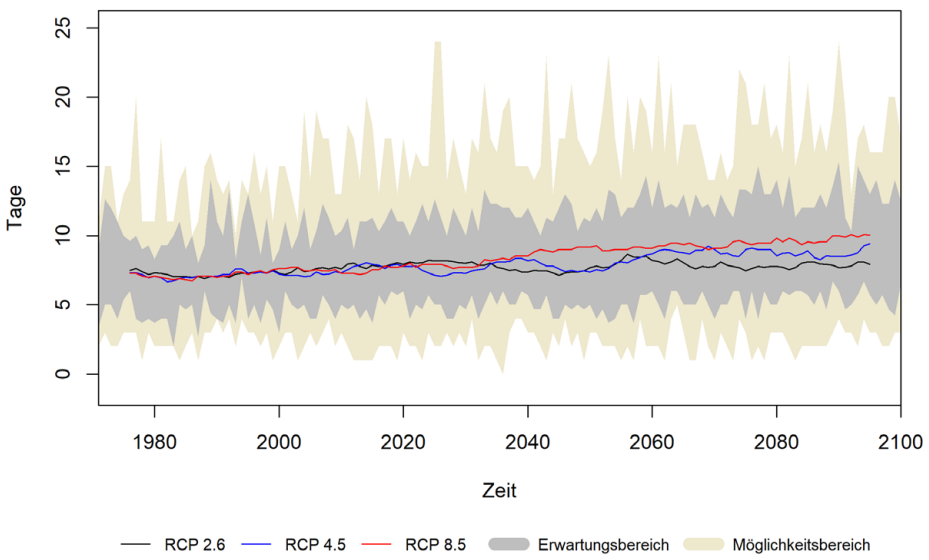


Abb. 9 Zeitlicher Trend der Anzahl an Tagen pro Jahr mit stärkerem Niederschlag (N ≥ 20 mm/d) in Schwabach (alle Szenarien)

sind. Dies wird bspw. bei der langjährigen Entwicklung der Auftrittshäufigkeit stärkerer Niederschläge (N ≥ 20 mm/d) deutlich, die keinen eindeutigen Trend zulässt (Abb. 9).

Aufgrund des enormen Schadenspotenzials sollten jedoch (in absolute Zahlen) geringe Änderungen nicht außer Acht gelassen werden. So projizieren die regionalen Klimamodelle für die Ereignisse N ≥ 10 mm/d und N ≥ 20 mm/d überwiegend steigende Häufigkeiten, wobei die Zunahmen zum Ende des Jahrhunderts hin am größten sind (Tab. 5). Bei diesen Zahlen sind die genannten Unsicherheiten zu beachten, doch zumindest im RCP-Szenario 8.5 liefert knapp die Hälfte der Modelle signifikante Zunahmen. Starkniederschläge ≥ 30 mm/d treten momentan sehr selten auf und haben eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität, sodass valide Prognosen derzeit kaum möglich sind. Gerade langfristig und unter Annahme des RCP-Szenarios 8.5 wird jedoch im Mittel mit einem zusätzlichen Starkniederschlagsereignis pro Jahr gerechnet (Tab. 5).

Die Zunahme von Tagen mit mindestens starkem Niederschlag ist verbunden mit einer Abnahme von Tagen mit Niederschlägen < 10 mm/d. Angesichts kaum veränderter oder gar zunehmender Jahresniederschlagssummen bedeutet dies, dass die Häufigkeit von Tagen mit Niederschlag im Mittel abnimmt, die Niederschlagsintensität jedoch zunimmt. Mit einfachen Worten: Es regnet weniger, aber wenn, dann stärker als im Referenzzeitraum.

Die genannten Unsicherheiten bezüglich der von den Regionalmodellen abgebildeten (insb. extremen) Niederschläge ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Auf der anderen Seite muss erwähnt werden, dass Starkregenereignisse oftmals kleinräumig auftreten und somit von den, obgleich relativ hoch aufgelösten, Regionalklimamodellen nicht erfasst und potenziell unterschätzt werden (DWD 2020a). Eine wärmere Atmosphäre kann zudem mehr Wasserdampf aufnehmen, was dazu führt, dass auch mehr Wasser für Niederschlagsereignisse zur Verfügung steht (vgl. ZAMG 2020). Somit erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Zunahme starker Niederschlagsereignisse angesichts steigender Temperaturen. In Ansätzen deutet sich dieser Effekt in den bisherigen Ergebnissen an, die insb. langfristig und im RCP-Szenario 8.5 einen Anstieg der mittleren maximalen täglichen Niederschlagsmenge verzeichnen.

Wind & Sturm

Ein Sturm wird als „Wind von großer Heftigkeit, nach der Beaufort-Skala der Stärke 9 bis 11 [...], der erhebliche Schäden und Zerstörungen anrichten kann" definiert (DWD 2020d). Folgende Sturmklassen werden dabei gemäß DWD anhand ihrer Windstärke eingeteilt:

- Sturm: Beaufort 9 (75 bis 88 km/h)
- Schwerer Sturm: Beaufort 10 (89 bis 102 km/h)
- Orkanartiger Sturm: Beaufort 11 (103 bis 117 km/h)
- Orkan: Beaufort 12 (> 117 km/h)

Kenntag	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2021 – 2050			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	**P 50**	P 85	P 15	**P 50**	P 85	P 15	**P 50**	P 85
Starker Niederschlag (N ≥ 10mm/d) [n/Jahr]	RCP 2.6	1	**1**	3	0	**2**	3	-1	**1**	2
	RCP 4.5	0	**1**	4	1	**2**	4	2	**4**	5
	RCP 8.5	0	**3**	4	2	**3**	6	2	**5**	8
Stärkerer Niederschlag(N ≥ 20mm/d) [n/Jahr]	RCP 2.6	0	**1**	2	0	**1**	1	0	**0**	1
	RCP 4.5	0	**1**	2	1	**1**	2	1	**2**	2
	RCP 8.5	1	**1**	2	1	**1**	3	2	**3**	4
Starkniederschlag (N ≥ 30mm/d) [n/Jahr]	RCP 2.6	0	**0**	1	0	**0**	1	0	**0**	1
	RCP 4.5	0	**0**	1	0	**0**	1	0	**1**	1
	RCP 8.5	0	**0**	1	0	**1**	1	1	**1**	2
Maximaler Tagesniederschlag [mm/d]	RCP 2.6	-2	**1**	5	-2	**1**	5	-3	**-1**	5
	RCP 4.5	-5	**2**	4	-2	**1**	6	0	**2**	6
	RCP 8.5	-2	**2**	6	-1	**3**	7	0	**8**	14

Tab. 5 Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen (Anzahl Tage pro Jahr) sowie des maximalen Tagesniederschlags in Schwabach (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median)

Genau wie Starkniederschläge gehören Stürme zu den seltenen Ereignissen, sodass sie nur bedingt statistisch auswertbar sind. Hinzu kommt, dass die regionalen Klimamodelle teilweise nicht in der Lage sind, Böen korrekt zu reproduzieren und daher Sturmereignisse oftmals nur unzureichend abbilden.

Es ist jedoch anzunehmen, dass sich in einer wärmeren Atmosphäre aufgrund von mehr verfügbarer latenter Wärme, die beim Phasenübergang von Wasserdampf zu Flüssigwasser frei wird, potenziell stärkere Stürme ausbilden können (Pinto et al. 2009, Fink et al. 2012, Pinto und Ryers 2017).
Dies hätte eine Zunahme der Sturmaktivität über Westeuropa zur Folge, wobei noch nicht eindeutig geklärt werden konnte, ob die Häufigkeit der Sturmereignisse zunimmt oder ob bei gleichbleibender Häufigkeit die Intensität steigt, also die Stärke der auftretenden Windgeschwindigkeiten (Pinto et al. 2009, Donat et al. 2010, McDonald 2011, Pinto und Ryers 2017).

Die Analyse zur Häufigkeit von **Sturmereignissen** ergab für Schwabach in allen drei Klimaszenarien keinen eindeutigen Trend bis zum Jahr 2100 (weder Zu- noch Abnahmen; ohne Abbildung). Dementsprechend weist kaum ein Modell des Ensembles signifikante Trends auf, sodass sich keine validen Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der Auftrittshäufigkeit von Stürmen ableiten lassen.

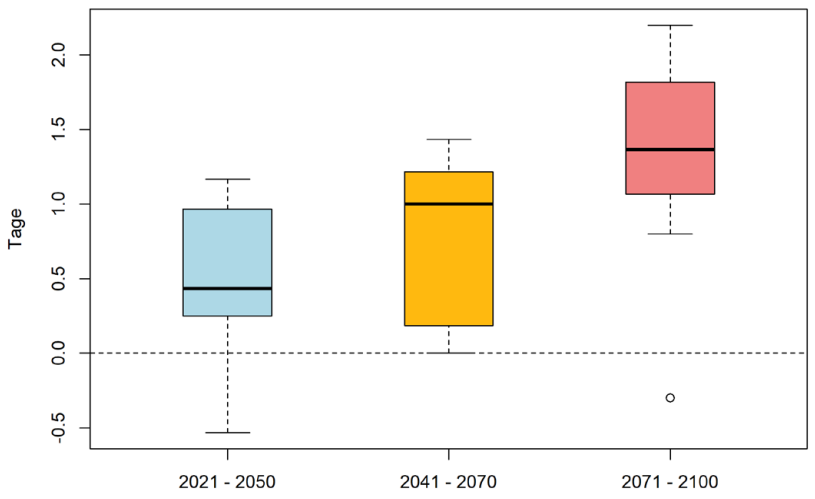


Abb. 10 Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen mit N ≥ 30 mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Schwabach (der Wert 30 entspricht also im Mittel einem zusätzlichen Ereignis im Jahr; RCP 8.5)

1.4 Zusammenfassung

Die Aussagen zum erwarteten Klimawandel in Schwabach gelten für die nahe (2021 – 2050), mittlere (2041 – 2070) sowie ferne Zukunft (2071 – 2100) und stützen sich auf ein Modellensemble der EURO-CORDEX-Initiative, das verschiedene Entwicklungspfade der Treibhausgas-Emissionen berücksichtigt.

Die Projektionen verdeutlichen, dass sich der bereits heute beobachtete Trend einer Erwärmung in Schwabach zukünftig fortsetzt. So werden weiterhin steigende Jahresmitteltemperaturen bis zum Ende des Jahrhunderts erwartet. Die mit dem Temperaturanstieg einhergehende Erwärmung bedingt eine Zunahme an Sommertagen, Heißen Tagen und Tropennächten, zudem gibt es Hinweise, dass die Länge von Hitzeperioden zunimmt. Frost- und Eistage treten dagegen zukünftig seltener auf und sorgen für mildere Winter, die eine geringere Zahl an Tagen mit Frost- und Tauwechseln und eine verlängerte Vegetationsperiode nach sich ziehen.

Für den Jahresniederschlag ist eine langfristig leicht steigende, wenn auch nicht signifikante, Tendenz in Schwabach zu erkennen. Entscheidender sind saisonale Verschiebungen des Niederschlags mit einem Trend zu geringeren Niederschlagsmengen im Sommer und höheren Werten im Winter und Frühjahr. Dieser Trend wirkt sich auch die klimatische Wasserbilanz aus, die über das Jahr gesehen annähernd konstant bleibt, in der saisonalen Betrachtung jedoch deutliche Veränderungen zeigt. So ist in den Winter- und Frühjahrsmonaten mit einem Anstieg der klimatischen Wasserbilanz zu rechnen. Aufgrund geringerer Niederschläge bei steigenden Verdunstungsraten ist dagegen im Sommer von einer Abnahme der klimatischen Wasserbilanz und einem Rückgang des natürlichen Wasserdargebots auszugehen. Die Projektionen der Klimamodelle legen folglich, obgleich statistisch schwer erfassbar, den Schluss nahe, dass in Zukunft mit einer vermehrten sommerlichen Trockenheit gerechnet werden muss. Besonders betroffen dürften dabei Gebiete sein, die heute bereits Trockenheitstendenzen aufweisen.

Starkniederschläge zählen zu den seltenen Ereignissen, sodass statistische Auswertungen nur bedingt möglich sind. Aufgrund ihres enormen Schadenspotenzials sollten jedoch selbst geringe Änderungen nicht außer Acht gelassen werden. Die regionalen Klimamodelle projizieren für Niederschlagsereignisse ≥ 10 sowie ≥ 20 mm/d überwiegend steigende Häufigkeiten, wobei die Zunahmen zum Ende des Jahrhunderts hin am größten sind. Für Starkniederschläge ≥ 30 mm/d sind valide Aussagen derzeit kaum möglich, doch deutet sich langfristig eine Tendenz leicht steigender Auftrittshäufigkeiten an. Die Zunahme von Tagen mit mindestens starkem Niederschlag ist verbunden mit einer rückläufigen Anzahl von Tagen mit Niederschlägen < 10 mm/d, woraus gefolgert werden kann, dass die Häufigkeit von Tagen mit Niederschlag im Mittel abnimmt, die Niederschlagsintensität jedoch zunimmt.

Genau wie Starkniederschläge gehören Stürme zu den seltenen Ereignissen, die nur bedingt statistisch auswertbar sind. Hinzu kommt, dass die regionalen Klimamodelle teilweise nicht in der Lage sind, Böen korrekt zu reproduzieren und daher Sturmereignisse oftmals nur unzureichend abbilden. Daher sind in Schwabach keine validen Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der Auftrittshäufigkeit von Stürmen ableitbar. Eine durch die zunehmende Erwärmung aufgeheizte Atmosphäre besitzt jedoch mehr latente Wärme, woraus sich ein Potenzial für heftigere Sturm- und Starkregenereignisse ergibt. Daher sollten Stürme, obwohl mit den derzeitigen Modellen keine zunehmende Häufigkeit nachweisbar ist, bei Klimaanpassungsmaßnahmen in Betracht gezogen werden – nicht zuletzt angesichts des Ausmaßes und der Häufung jüngster Ereignisse (u.a. Sturmtief „Egon“ im Januar 2017, Sturmtief „Sabine“ im Februar 2020, Sturmtief „Ignatz“ im Oktober 2021).

Anhang A.1

Anhang A.I: Klimawandel in Schwabach

Methodik

Tab. A 1 Für das verwendete Modellensemble verfügbare Ensemblemitglieder (Modellkombinationen) und Szenarien (Historical, RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5). GCM bzw. RCM = Globales bzw. Regionales Klimamodell (Global / Regional Climate Model).

	GCM	RCM	Historical	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
1	CanESM2	CCLM	✓	X	X	✓
2	EC-EARTH	CCLM	✓	✓	✓	✓
3	EC-EARTH	RACMO22E	✓	✓	✓	✓
4	EC-EARTH	RACMO22E	✓	X	✓	✓
5	EC-EARTH	RCA4	✓	✓	✓	✓
6	IPSL-CM5A	RCA4	✓	X	✓	✓
7	MIROC5	CCLM	✓	✓	X	X
8	MIROC5	REMO2015	✓	X	X	✓
9	HadGEM2-ES	WETTREG2013	✓	X	X	✓
10	HadGEM2-ES	CCLM	✓	X	✓	✓
11	HadGEM2-ES	RACMO22E	✓	✓	✓	✓
12	HadGEM2-ES	STARS3	✓	✓	X	X
13	HadGEM2-ES	RCA4	✓	✓	✓	✓
14	MPI-ESM	WETTREG2013	✓	✓	X	X
15	MPI-ESM	CCLM	✓	X	✓	✓
16	MPI-ESM	REMO2009	✓	✓	✓	✓
17	MPI-ESM	REMO2009	✓	✓	✓	✓
18	MPI-ESM	STARS3	✓	✓	X	X
19	MPI-ESM	RCA4	✓	✓	✓	✓

Tab. A 2 Bewertung der statistischen Signifikanz anhand des Trend-/Rauschverhältnisses

Trend- / Rauschverhältnis	Bewertung
≥ 2,0	sehr stark zunehmend
≥ 1,5 und < 2,0	stark zunehmend
≥ 1,0 und < 1,5	schwach zunehmend
< 1,0 und > -1,0	kein Trend
≤ -1,0 und > -1,5	schwach abnehmend
≤ -1,5 und > -2,0	stark abnehmend
≤ -2,0	sehr stark abnehmend

Abb. A 1 Methode der Adjustierung von Schwellenwerten für Kenntage. Die blaue Zahl auf der y-Achse zeigt das berechnete Perzentil des Schwellenwertes und die rote Zahl auf der x-Achse zeigt den adjustierten Schwellenwert

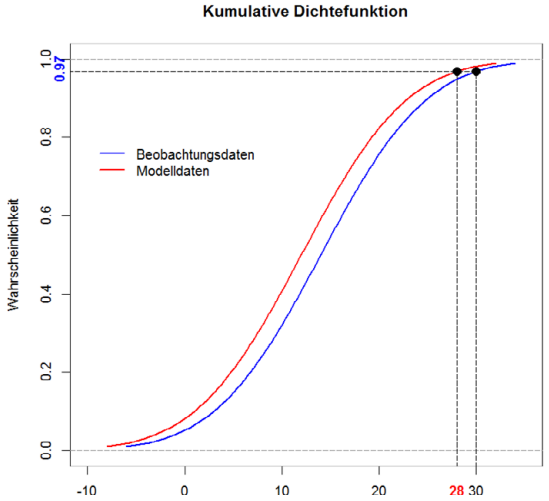
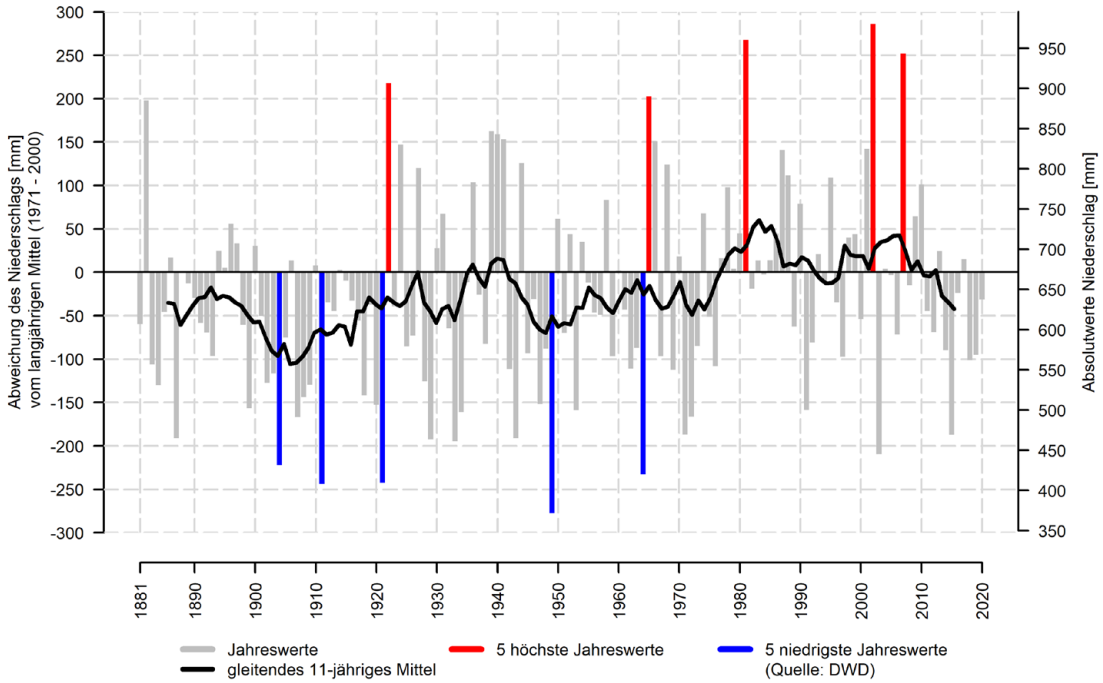


Abb. A 2 Entwicklung des Niederschlags in Schwabach (Quelle: nach DWD 2020b)



Temperaturzunahme und Hitze

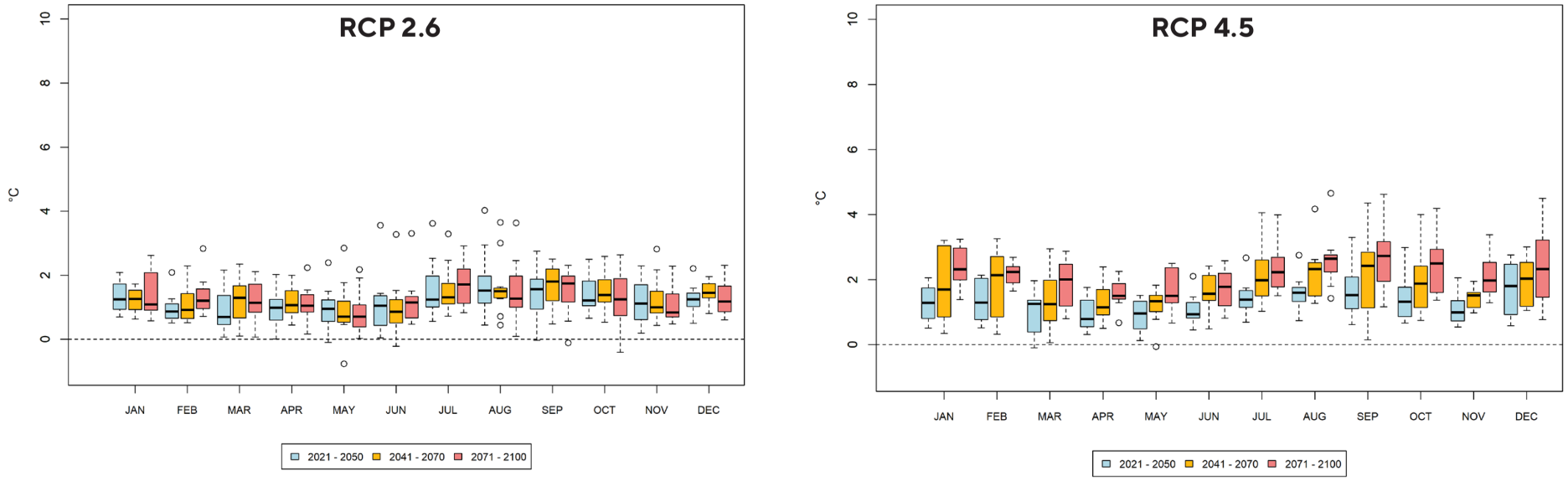


Abb. A 3: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Schwabach für das RCP 2.6 (links) sowie RCP 4.5 (rechts)

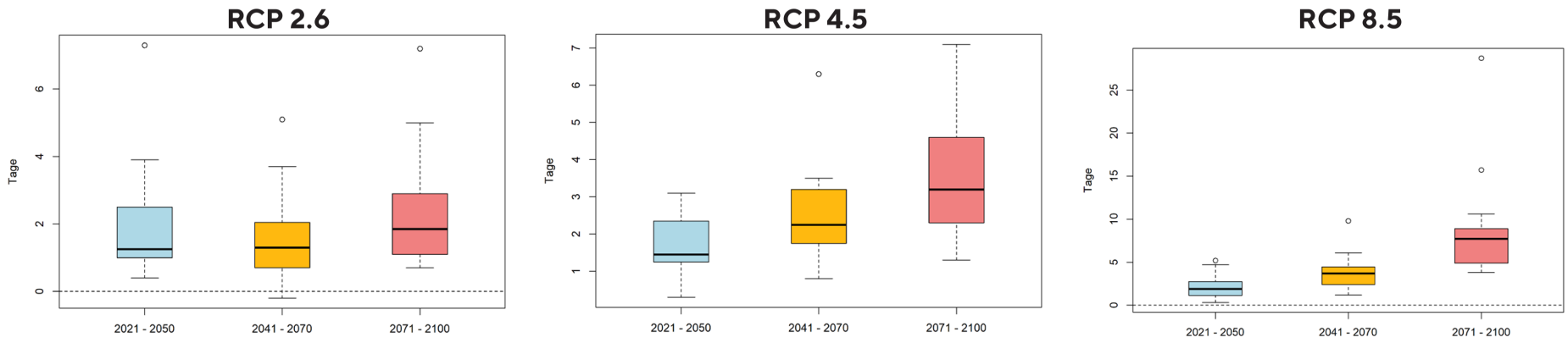


Abb. A 4 Änderung der Länge von Hitzeperioden (aufeinanderfolgende Tage mit Tmax ≥ 30 °C) in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte), 8.5 (rechts)

Niederschlagsverschiebung

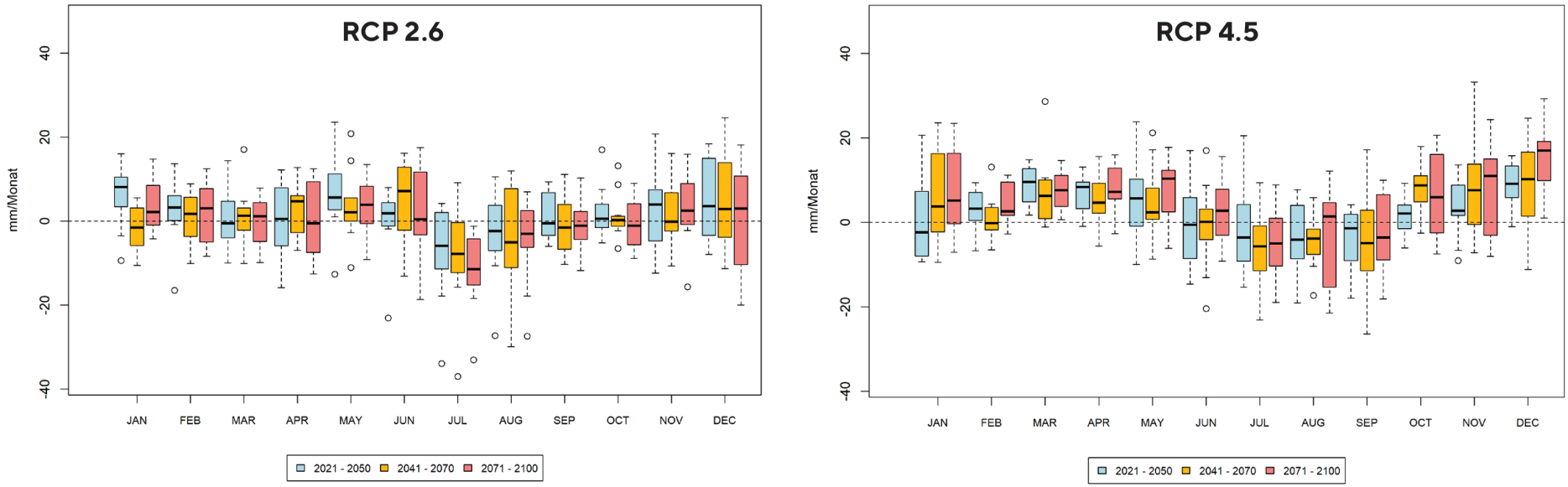


Abb. A 5 Änderung der langjährigen mittleren jährlichen Niederschlagssumme in Schwabach in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte) sowie 8.5 (rechts)

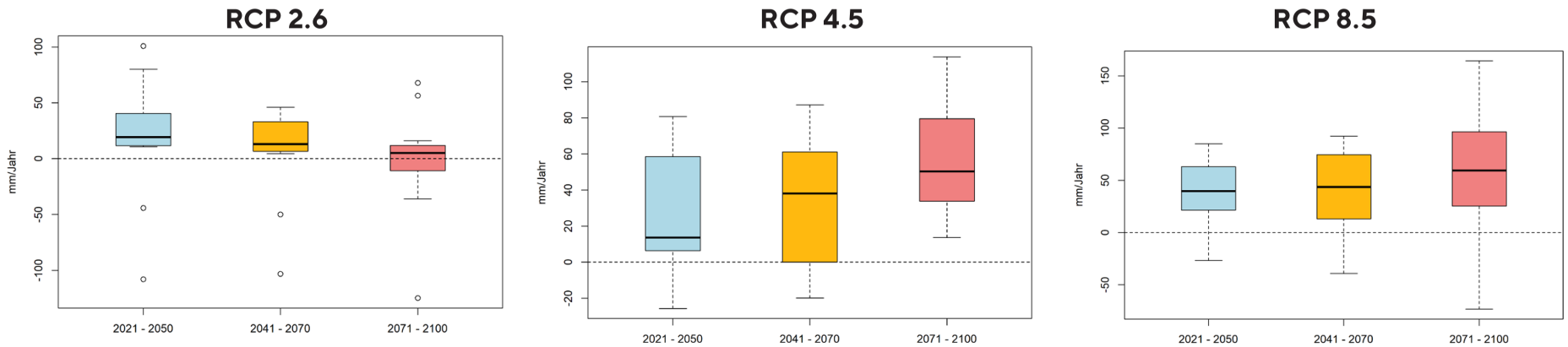


Abb. A 6 Änderung der langjährigen mittleren monatlichen Niederschlagssummen in Schwabach für das RCP 2.6 (links) sowie RCP 4.5 (rechts)

Trockenheit

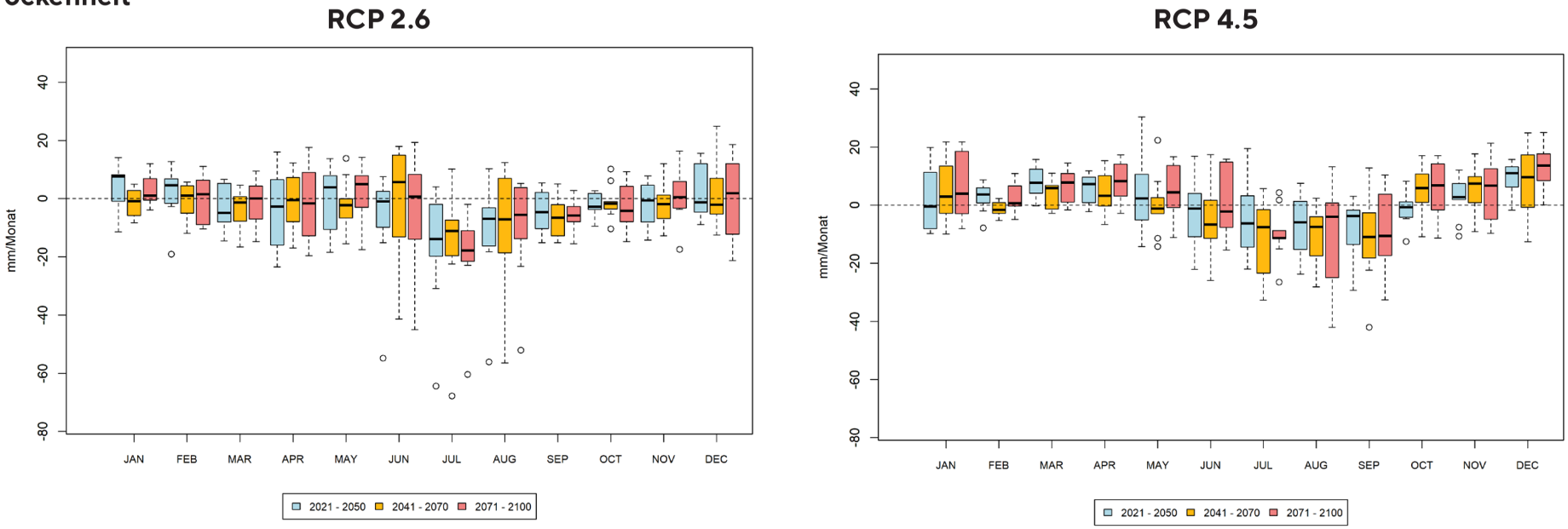


Abb. A 7 Änderung der langjährigen mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz in Schwabach für das RCP 2.6 (links) sowie RCP 4.5 (rechts)

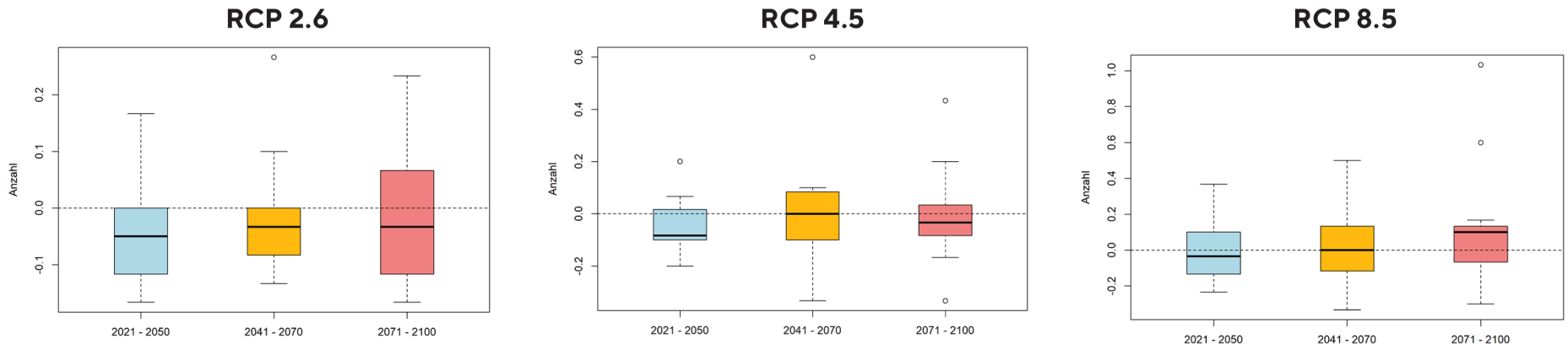


Abb. A 8 Änderung der langjährigen mittl. Anzahl extremer Trockenperioden (mehr als 28 aufeinanderfolgende Tage mit < 1 mm Niederschlag) innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode Schwabach (der Wert 30 entspricht also im Mittel einem zusätzlichen Ereignis im Jahr) in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte) sowie 8.5 (rechts)

Starkniederschläge: Starker Niederschlag (N ≥ 10 mm/d)

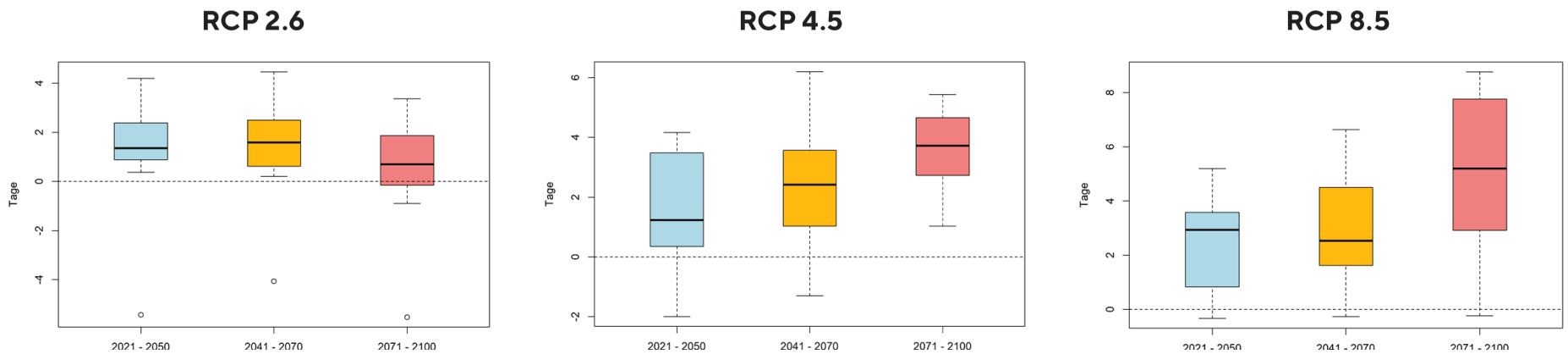


Abb. A 9 Änderung der Auftrittshäufigkeit von Niederschlagsereignissen mit N ≥ 10 mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Schwabach (ein Wert von 30 entspricht also im Mittel einem zusätzlichen Ereignis pro Jahr) in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte) sowie 8.5 (rechts)

Starkniederschläge: Starker Niederschlag (N ≥ 20 mm/d)

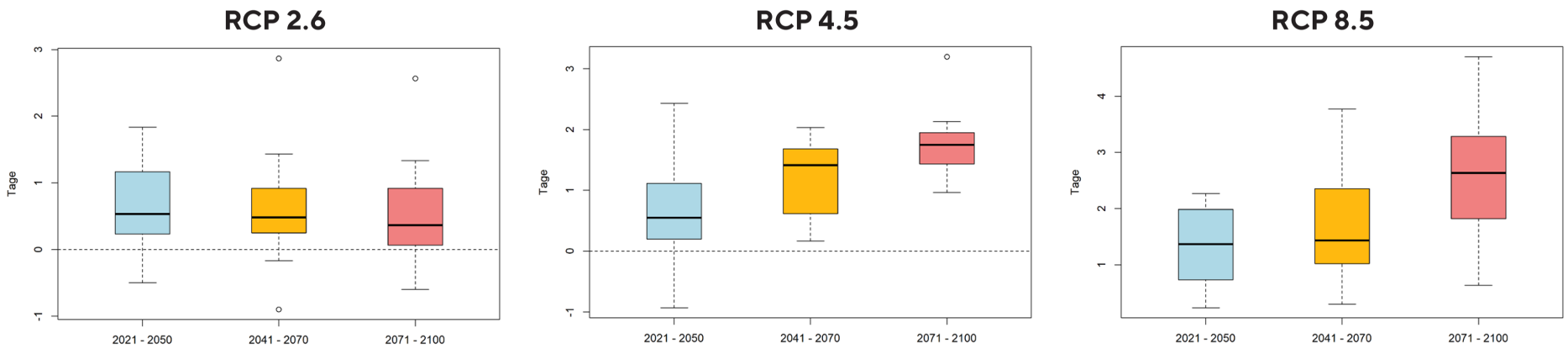


Abb. A 10 Änderung der Auftrittshäufigkeit von Niederschlagsereignissen mit N ≥ 20 mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Schwabach (ein Wert von 30 entspricht also im Mittel einem zusätzlichen Ereignis pro Jahr) in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte) sowie 8.5 (rechts)

Starkniederschläge: Starker Niederschlag (N ≥ 20 mm/d)

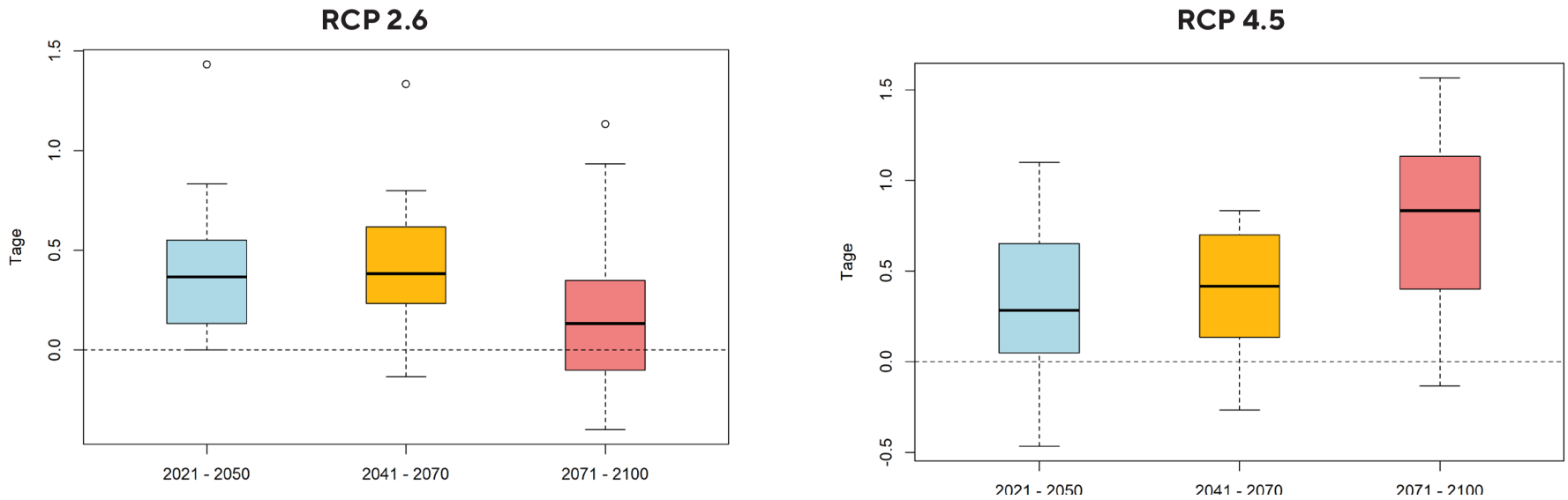


Abb. A 11 Änderung der Auftrittshäufigkeit von Niederschlagsereignissen mit N ≥ 30 mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Schwabach (ein Wert von 30 entspricht also im Mittel einem zusätzlichen Ereignis pro Jahr) in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links) sowie 4.5 (rechts)

Sturm

Die Auswertungen zum Thema Sturm erbrachten aufgrund der hohen Unsicherheit der Ergebnisse keine validen Aussagen. Aus diesem Grund sind die betreffenden Abbildungen und Tabellen an dieser Stelle nicht mit aufgeführt.