



# Klimatische und hydrologische Szenarien für den Kanton Freiburg

Schlussbericht

—

Oktober 2024



ETAT DE FRIBOURG  
STAAT FREIBURG

Service de l'environnement SEn  
Amt für Umwelt AfU



ecosfera gmbh







# Klimatische und hydrologische Szenarien für den Kanton Freiburg

- Schlussbericht -

Jan Schwanbeck und Rolf Weingartner

im Auftrag von

Staat Freiburg  
Amt für Umwelt

## **Zusammenfassung**

Die vorliegende Studie beschreibt räumlich und zeitlich hoch aufgelöst, welche Auswirkungen der Klimawandel im Kanton Freiburg und in dessen Regionen und ausgewählten Einzugsgebieten hat. Dabei werden sowohl klimatische als auch hydrologische Veränderungen vor dem Hintergrund der beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 mit beschränktem Klimaschutz und RCP 8.5 ohne Klimaschutz betrachtet. Verglichen werden die Kennwerte der Referenzperiode 1981–2010 mit jenen der mittleren Zukunft (2040–2069) und der fernen Zukunft (2070–2099), und zwar auf jährlicher und saisonaler Basis.

## **Klimatische Veränderungen**

Die Veränderungen des Klimas werden mit 34 Kenngrössen analysiert, die ihrerseits in die zwei Gruppen «Kenngrössen des Niederschlags» mit elf Kenngrössen und «Kenngrössen der Lufttemperatur» unterteilt werden. Die Veränderungen der einzelnen Kenngrössen sind jeweils mit einem Faktenblatt erfasst, im Sinne von Fakten und Abbildungen («facts and figures»). Das Schlusskapitel schliesslich vermittelt eine Gesamtübersicht, indem es die Veränderungen aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet. Es mündet in die folgenden fünf Feststellungen zu den zentralen Aspekten des Wandels:

1. Das mittlere jährliche Wasserdargebot (Niederschlag) ändert sich kaum. Hingegen steigen die mittleren Jahrestemperaturen mindestens nochmals im gleichen Ausmass wie in den letzten 150 Jahren.
2. Die Sommerniederschläge nehmen ab. Es gibt weniger Regentage. Die mittleren Sommertemperaturen steigen, damit erhöht sich auch die potentielle Verdunstung.
3. Bei gleichzeitig wärmeren Temperaturen regnet es im Winter mehr, und es schneit weniger. Mit der Temperaturerhöhung steigt die Nullgradgrenze in der mittleren Zukunft zwischen 300 und 450 m und in der fernen Zukunft zwischen 400 und 850 m .
4. Die Anzahl heisser Tage verdoppelt sich mindestens, während kalte Tage mehr und mehr verschwinden.
5. Die Vegetationsperiode beginnt bis zu 40 Tage früher. Gleichzeitig erhöht sich die Gefahr von Spätfrost.

Diese Feststellungen beziehen sich auf den Kanton Freiburg als Ganzes. In diesem Schlussbericht werden sie dann räumlich differenziert und mit weiteren Aspekten vertieft.

## Hydrologische Veränderungen

Für jede Region des Kantons Freiburg wurde ein repräsentatives Einzugsgebiet bestimmt und mit dem hydrologischen Modell GR4J/CemanNeige modelliert. Das Modell wird mit den CH2018-Daten angetrieben, und zwar mit den für die beiden Emissionsszenarien ausgewählten Modellketten. Bei der Validierung des Modells wurde nicht nur die Modellgüte bei den ausgewählten Abflusskenngrössen geprüft, sondern auch die Abbildung des Wasserhaushaltes als Ganzes und hier besonders auch der auftretenden unterirdischen Zu- und/oder Abflüsse.

Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Emissionsszenarien. Die grössten Veränderungen ergeben sich für die ferne Zukunft unter RCP 8.5. Sie unterscheiden sich mehrheitlich signifikant von den anderen Kombinationen zwischen Zukunftsperiode und Emissionsszenarien. Zentrale Aspekte des hydrologischen Wandels sind:

1. Die mittleren Jahresniederschläge verändern sich kaum. Hingegen nehmen die mittleren Jahresabflüsse generell ab, meistens zwischen 0 und -10%. Die Zunahme der mittleren aktuellen Verdunstung ist hauptsächlich für diese Abnahme verantwortlich.
2. Auf saisonaler Basis bestehen grosse Veränderungen primär im Winter und Sommer. Vor allem die Abnahme der mittleren Abflüsse im Sommer – und teilweise auch im Herbst – sind zum Teil sehr gross. Wasserhaushaltsanalysen zeigen, dass die Sommertrockenheit zunehmend zu einem Problem wird. Die Abnahme der mittleren Abflüsse im Sommer wird entscheidend durch die Abnahme der mittleren Sommerniederschläge geprägt und durch die Zunahme der aktuellen Verdunstung weiter verschärft.
3. Die kleinsten Tagesabflüsse nehmen in allen Einzugsgebieten sehr stark ab. Bei den grössten Tagesabflüssen sind die Veränderungen mehrheitlich klein und die Abnahmen dominieren.
4. Die Höhenlage eines Einzugsgebiets ist massgebend für die Art und das Ausmass des Wandels.

Es gilt allerdings zu beachten, dass diese Schlussfolgerung nicht für alle Einzugsgebiete und Zeitperioden gelten.

## Rolle der Treibhausgasemissionen

Insgesamt zeigen die Ergebnisse die grosse Betroffenheit des Kantons, dessen Regionen und Einzugsgebiete durch den Klimawandel. Sie verdeutlichen, dass das Ausmass der Veränderungen entscheidend davon abhängt, ob es global gelingt, die Klimaerwärmung einzuschränken und wenn immer möglich zu stoppen.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>8</b>
1.1	Ausgangslage . . . . .	8
1.2	Zielsetzung und Arbeitsschritte . . . . .	8
1.3	Datensatz CH2018 . . . . .	10
1.3.1	Hintergrund . . . . .	10
1.3.2	Herleitung des CH2018-Datensatzes . . . . .	10
1.3.3	Für CCHydro <sup>FR</sup> verfügbare Zeitreihen . . . . .	11
1.4	Klima und Wetter . . . . .	14
1.5	Aufbau des Berichts . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Veränderung des Klimas im Kanton und in dessen Regionen</b>	<b>17</b>
2.1	Einleitung . . . . .	17
2.1.1	Zielsetzung . . . . .	17
2.2	Betrachtete Regionen . . . . .	17
2.3	Methodisches Vorgehen . . . . .	20
2.3.1	Von den Modellketten zu den charakteristischen Kenngrössen . . . . .	20
2.3.2	Bestimmung der zukünftigen Veränderungen gegenüber der Referenzperiode . . . . .	21
2.3.3	Darstellung, Klassierung und Visualisierung der zukünftigen Veränderungen gegenüber der Referenzperiode . . . . .	21
2.3.4	Validierung der modellierten Referenzwerte . . . . .	23
2.3.5	Synthese und Gesamtschau . . . . .	24
2.4	Resultate . . . . .	26
2.4.1	Mittlere Niederschlagsmenge . . . . .	26
2.4.2	Mittlere Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags . . . . .	33
2.4.3	Seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags . . . . .	40
2.4.4	Sehr seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags . . . . .	47
2.4.5	Extrem seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags . . . . .	54
2.4.6	Mittlere Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags . . . . .	61
2.4.7	Seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags . . . . .	68
2.4.8	Sehr seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags . . . . .	75
2.4.9	Extrem seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags . . . . .	82
2.4.10	Mittlere Jahrestiefstwerte der 3-Wochenniederschlagssumme . . . . .	91
2.4.11	Mittlere Anzahl an Tagen pro Jahr ohne Niederschlag . . . . .	93
2.4.12	Mittlere Lufttemperatur . . . . .	100
2.4.13	Mittlere Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur . . . . .	107
2.4.14	Seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur . . . . .	115
2.4.15	Sehr seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur . . . . .	123
2.4.16	Extrem seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur . . . . .	130

2.4.17	Mittlere Anzahl heisser Tage pro Jahr . . . . .	139
2.4.18	Mittlere Anzahl sehr heisser Tage pro Jahr . . . . .	144
2.4.19	Mittlere Anzahl kalter Tage pro Jahr . . . . .	148
2.4.20	Mittlere Anzahl sehr kalter Tage pro Jahr . . . . .	152
2.4.21	Mittlere Anzahl Tage bis zum Erreichen der Grünlandtemperatursumme von 200 °C . . . . .	157
2.4.22	Mittlere Anzahl Tage mit Spätfrost . . . . .	162
2.4.23	Potenzielle Verdunstung . . . . .	167
2.5	Zusammenfassender Überblick über die Veränderungen . . . . .	174
2.5.1	Abweichungen gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 . . . . .	174
2.5.2	Veränderungen gegenüber der Referenzperiode . . . . .	178
2.5.3	Zentrale Aspekte des Wandels . . . . .	180
<b>3</b>	<b>Hydrologische Veränderungen in den Regionen und Einzugsgebieten des Kantons Freiburg</b>	<b>187</b>
3.1	Ausgangslage und Zielsetzung . . . . .	187
3.2	Einzugsgebiete und Regionen . . . . .	187
3.3	Methodik . . . . .	189
3.3.1	Das hydrologische Modell GR4J/CemaNeige . . . . .	189
3.3.2	Darstellung der Ergebnisse . . . . .	203
3.4	Resultate . . . . .	205
3.4.1	Region Seeland-Grosses Moos, Région des 3 Lacs Grand Marais . . . . .	205
3.4.2	Region Untere Broye, région Basse Broye . . . . .	225
3.4.3	Region Nördliches Mittelland, région Plateau Nord . . . . .	244
3.4.4	Region Südliches Mittelland, région Plateau Sud (PlaSud) . . . . .	265
3.4.5	Region Voralpen, région Préalpes (PreAlp) . . . . .	286
3.5	Veränderungen des Abflussregimes . . . . .	306
3.6	Schlussfolgerungen . . . . .	309

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Die neuesten Ergebnisse des Projektes *CH2018-Hydro*<sup>1</sup> belegen eindeutig, dass sich die klimatischen und hydrologischen Verhältnisse vor dem Hintergrund der Klimaerwärmung signifikant verändern werden. Das Ausmass dieser Veränderungen hängt wesentlich davon ab, ob und in welchem Ausmass es gelingt, die Emissionen von Treibhausgasen zu vermindern und mittelfristig ganz zu unterbinden. Angesichts dieser zu erwartenden Veränderungen hat der Kanton Freiburg einen kantonalen Klimaplan erstellt, der konkrete Massnahmen zur Anpassung der natürlichen Systeme an den Klimawandel und zur Reduktion von Treibhausgasemissionen enthält. Dieser Plan wurde im Juni 2021 vom Staatsrat des Kantons Freiburg verabschiedet.

Im Rahmen des Klimaplans hat die Sektion Gewässer des Amtes für Umwelt des Kantons Freiburg – im Folgenden als AfU bezeichnet – mehrere als dringend erachtete Projekte lanciert. Dazu gehört auch das Projekt *Berücksichtigung von Klimaszenarien bei Projekten zu Ausbau und Unterhalt von Wasserläufen (Prise en compte des scénarios climatiques dans les projets d'aménagement et d'entretien des cours d'eau)*. Das AfU beauftragte in der Folge *ecosfera gmbh*, die Klimaszenarien des Projektes *Hydro-CH2018* Massgeschneidert auf den Kanton Freiburg, dessen Regionen sowie auf ausgewählte Einzugsgebiete anzuwenden. Die Ergebnisse der Berechnungen und Modellierungen sind im vorliegenden Bericht dokumentiert.

## 1.2 Zielsetzung und Arbeitsschritte

Ziel der vorliegenden Studie ist es, für den Kanton Freiburg, dessen Regionen und Einzugsgebiete quantitativ aufzuzeigen, wie sich die klimatischen und hydrologischen Verhältnisse unter drei unterschiedlichen Emissionsszenarien – RCP 2.6 (mit Klimaschutz), RCP 4.5 (begrenzter Klimaschutz) und RCP 8.5 (ohne Klimaschutz) verändern werden. Dabei stehen die Veränderungen zwischen der Referenzperiode 1981–2010 einerseits und der Periode 2040–2069 (mittlere Zukunft, «um 2055») bzw. 2070–2099 (ferne Zukunft, «um 2085») andererseits im Mittelpunkt.

In diesem Bericht richten wir unser Augenmerk vorrangig auf die beiden Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Hingegen wurde das Szenario RCP 2.6 nicht in den Bericht einbezogen, obwohl entsprechende Daten und Informationen verfügbar sind. Dies bedarf einer Erklärung. Das Emissionsszenario RCP 2.6 geht von einem sehr

---

<sup>1</sup><https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-hydroszenarien.html>

starken Rückgang der Treibhausgasemissionen aus. Bei ihm liegt die Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur im Vergleich zum vorindustriellen Niveau am Ende des 21. Jahrhunderts voraussichtlich unter 2 °C. Dazu ist es notwendig, dass die Staaten im Rahmen des Pariser Abkommens angegebenen Reduktionsbeiträge (NDCs – Nationally Determined Contributions) nicht nur einhalten, sondern sogar übertreffen. Das RCP 2.6 hat somit eine hohe politische Relevanz. Allerdings befinden wir uns aktuell auf einem Emissionspfad, der eine grössere Erwärmung erwarten lässt, als es das RCP 2.6 vorsieht. Deshalb wurden die beiden Szenarien RCP 4.5 (begrenzter Klimaschutz) und RCP 8.5 (kein Klimaschutz) in den Fokus des vorliegenden Berichts gerückt. Dessen Ziel ist es, den Planungsorganen zur Entwicklung von Anpassungsstrategien jenes Zukunftsbild zu vermitteln, das sich mehr oder weniger signifikant von der heutigen Situation unterscheidet. Das ist unter dem Szenario RCP 2.6 nicht der Fall. Gerade im Bereich Naturgefahren kann es ratsam sein, sich am RCP 8.5 zu orientieren und mit einer ungünstigen Entwicklung zu rechnen. Diesen Ansatz wählt auch das Bundesamt für Umwelt, dass sich beim Naturgefahrenmanagement sogar ausschliesslich auf das RCP 8.5 stützt.

Basierend auf diesem Bericht wird für die Öffentlichkeit eine Broschüre erstellt, in der die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse dargestellt werden. Dabei geht es darum, das ganze Spektrum möglicher Entwicklungen aufzuzeigen. Deshalb wird dort auch das Emissionsszenario RCP 2.6 betrachtet.

Die folgenden Ausführungen, welche sich an Abb. 2.44 orientieren, beschreiben den Weg, der im vorliegenden Projekt zur Zielerreichung gewählt wurde.

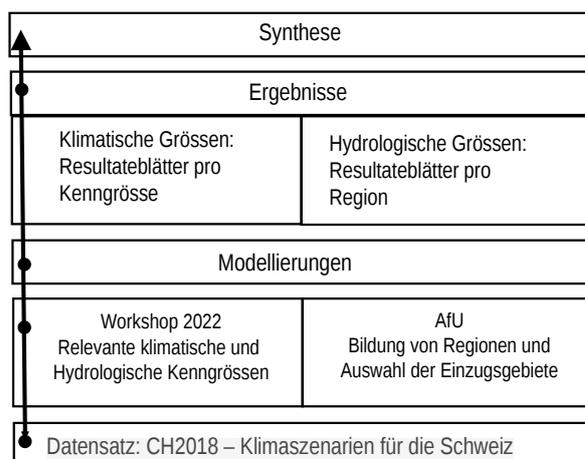


Abb. 1.1: Übersicht über das Projekt CCHydro<sup>FR</sup>

Ausgangspunkt der Studie bildet der räumlich und zeitlich hochaufgelöste Datensatz CH2018 mit Tageswerten 1981–2099 von Niederschlag und Temperatur. Er wird im Kapitel 1.3 beschrieben.

In Zusammenarbeit mit dem AfU und unterstützt durch einen Workshop, an dem interessierte Vertreterinnen und Vertreter von anderen Amtsstellen im Dezember 2021 teilnahmen, wurden die klimatischen und hydrologischen Kenngrössen definiert, welche einerseits aus dem Datensatz CH2018 ableitbar sind und andererseits

eine hohe Relevanz besitzen. Basierend auf umfangreichen Modellierungen, welche später beschrieben werden, konnten dann die Resultateblätter erstellt werden (vgl. Abb. 2.44). Letztere stehen im Mittelpunkt des vorliegenden Berichts, dessen primäres Ziel die Dokumentation der Ergebnisse ist, konkret der Veränderungen der Kenngrößen in der mittleren und fernen Zukunft im Vergleich zur Referenzperiode. Dabei werden die Ergebnisse unter RCP 4.5 und RCP 8.5 einander gegenüber gestellt. Mit einem eigens für die Studie entwickelten «Ampelsystem» werden die Veränderungen zudem zusammenfassend dargestellt, einerseits für jede klimatische Kenngrösse, andererseits im Rahmen einer Gesamtsynthese.

### **1.3 Datensatz CH2018**

#### **1.3.1 Hintergrund**

Damit sich die Schweiz auf den Klimawandel einstellen kann, sind detaillierte Kenntnisse der klimatischen Veränderungen notwendig. Das *National Centre for Climate Services* (NCCS) erhielt deshalb den Auftrag, neue Klimaszenarien für die Schweiz zu entwickeln. Das NCCS beschreibt diesen Auftrag und dessen Umsetzung auf seiner Webseite<sup>2</sup> wie folgt:

«Das Klima der Schweiz ändert sich. Um den Entscheidungsträgern optimale Planungsgrundlagen zu liefern, sind aufdatierte und verlässliche Klimaszenarien für die Schweiz unerlässlich. Basierend auf den neuesten Klimamodellen und den Erkenntnissen aus Nutzerumfragen erarbeitet der Themenschwerpunkt CH2018 in enger Zusammenarbeit mit der Wissenschaft neue Szenarien zur Klimaänderung. [...] Die Klimaszenarien CH2018 verbinden Simulationen modernster Klimamodelle mit Beobachtungen bisheriger Trends und erlauben den bisher genauesten Blick in die Klimazukunft unseres Landes. Damit lassen sich robuste Aussagen zu unterschiedlichen Aspekten des Klimawandels treffen. Die CH2018-Szenarien lösen die Schweizer Klimaszenarien aus dem Jahr 2011 («CH2011») ab.»

#### **1.3.2 Herleitung des CH2018-Datensatzes**

Am Anfang der Klimasimulationen CH2018 standen Emissionsszenarien, die über sogenannte Repräsentativen Konzentrationspfade RCP (Representative Concentration Pathways) beschrieben werden. Mit den folgenden RCPs wird üblicherweise das Spektrum möglicher Entwicklungen abdeckt<sup>3</sup>.

- RCP 2.6 – Konsequenter Klimaschutz: «Klimaschutzmassnahmen werden ergriffen. Mit einer umgehend eingeleiteten Senkung der Emissionen wird der Anstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre bis in etwa 20 Jahren gestoppt. Damit lassen sich die Ziele des Pariser Klimaabkommens 2016 erreichen.»

---

<sup>2</sup><https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/das-nccs/themenschwerpunkte/neue-schweizer-klimaszenarien-ch2018.html>

<sup>3</sup>aus: <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/grundlagen-zum-klima/was-sind-emissionsszenarien-.html>

- RCP 4.5 – Begrenzter Klimaschutz: «Der Ausstoss von Treibhausgasemissionen wird zwar eingedämmt, aber der Gehalt in der Atmosphäre steigt noch weitere 50 Jahre. Das Zwei-Grad-Ziel wird verfehlt.»
- RCP 8.5 – Kein Klimaschutz: «Es werden keine Klimaschutzmassnahmen ergriffen. Die Treibhausgasemissionen nehmen stetig zu.»

Jedes Emissionsszenario umfasst mehrere Modellketten (Simulationen), bei denen ein globales und ein regionales Klimamodell gekoppelt und dann der Output des regionalen Modells mittels statistischer Verfahren auf die Schweiz herunterskaliert werden (vgl. Abb. 1.2). Daraus resultieren 68 korrigierte transiente Zeitreihen von 1981–2099 in hoher zeitlicher (Tageswerte) und räumlicher Auflösung (2 km · 2 km). 31 Simulationen beziehen sich auf das RCP 8.5-Szenario, 25 auf das RCP 4.5-Szenario und 12 Simulationen auf das RCP 2.6-Szenario.

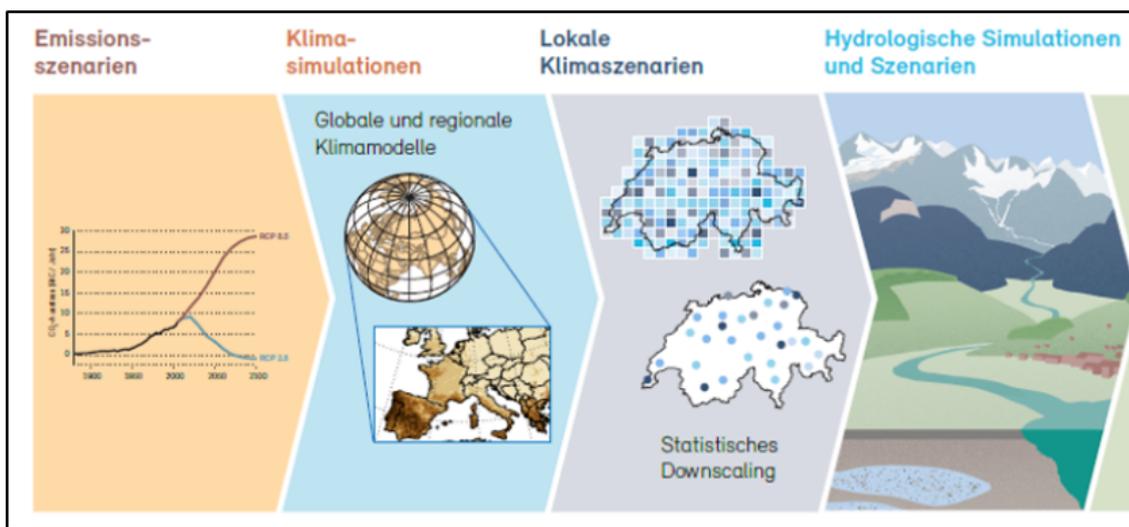


Abb. 1.2: Schematische Darstellung der gesamten Modellkette zur Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Hydrologie (aus: Hydrologischer Atlas der Schweiz 2021)

### 1.3.3 Für CCHydro<sup>FR</sup> verfügbare Zeitreihen

Für einen systematischen Vergleich der Ergebnisse der Simulationen wird ein konsistentes Set von Modellketten über alle drei Emissionsszenarien hinweg benötigt. Die für das vorliegende Projekt zusammengestellten Sets M8, M16 und M31 können Tabelle 1.3.1 entnommen werden. Sie sind wie folgt definiert:

1. M8: Insgesamt 8 Modellketten liegen für alle drei Emissionsszenarien vor und garantieren die optimale Vergleichbarkeit zwischen RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5.

2. M16: 16 Modellketten liegen für RCP 4.5 und RCP 8.5 vor. Somit eignet sich M16 zum Vergleich zwischen diesen beiden «emissionsbelasteten» Emissionsszenarien.
3. M31: mit insgesamt 31 Modellketten ergibt sich ein umfassendes, aber unausgewogenes Bild.

Die in Tabelle 1.3.1 grau hinterlegten Modellketten wurden aus den Sets M8 und M16 entfernt und zwar aus den folgenden Gründen:

- Wenn für eine Modellkette Daten in zwei räumlichen Auflösungen vorliegen, wurde die Variante mit der höheren Auflösung gewählt. Die Variante mit der niedrigeren Auflösung wurde entfernt, damit das Modell nicht zwei Mal, sprich mit doppeltem Gewicht in die Auswertungen eingeht.
- Liegt eine Modellkette nur für RCP 8.5 vor, dann wird sie verworfen.
- Wenn sich Modellketten nur in den Initialbedingungen unterscheiden, dann wird jene gewählt, welche MeteoSchweiz empfiehlt. Die anderen werden ausgeschlossen, um zu vermeiden, dass eine Modellkonfiguration mit zu hohem Gewicht in die Auswertungen einfließt.

In den folgenden Auswertungen wurde das Set M16 – mit insgesamt 16 Modellketten – verwendet, welche für die Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 verfügbar sind.

Tab. 1.3.1: Auswahl der Modellketten für die Analysen

Modellkette	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CLMCOM-CCLM4_ECEARTH_EUR11		■	■
CLMCOM-CCLM4_HADGEM_EUR11		■	■
CLMCOM-CCLM4_HADGEM_EUR44			■
CLMCOM-CCLM4_MPIESM_EUR11		■	■
CLMCOM-CCLM4_MPIESM_EUR44		■	■
CLMCOM-CCLM5_ECEARTH_EUR44			■
CLMCOM-CCLM5_HADGEM_EUR44			■
CLMCOM-CCLM5_MIROC_EUR44			■
CLMCOM-CCLM5_MPIESM_EUR44			■
DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11	■	■	■
DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR44	■	■	■
ICTP-REGCM_HADGEM_EUR44			■
KNMI-RACMO_ECEARTH_EUR44		■	■
KNMI-RACMO_HADGEM_EUR44	■	■	■
MPICSC-REMO1_MPIESM_EUR11	■	■	■
MPICSC-REMO1_MPIESM_EUR44	■	■	■
MPICSC-REMO2_MPIESM_EUR11	■	■	■
MPICSC-REMO2_MPIESM_EUR44	■	■	■
SMHI-RCA_CCCMA_EUR44		■	■
SMHI-RCA_CSIRO_EUR44		■	■
SMHI-RCA_ECEARTH_EUR11	■	■	■
SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44	■	■	■
SMHI-RCA_GFDL_EUR44		■	■
SMHI-RCA_HADGEM_EUR11		■	■
SMHI-RCA_HADGEM_EUR44	■	■	■
SMHI-RCA_IPSL_EUR11		■	■
SMHI-RCA_IPSL_EUR44		■	■
SMHI-RCA_MIROC_EUR44	■	■	■
SMHI-RCA_MPIESM_EUR11		■	■
SMHI-RCA_MPIESM_EUR44	■	■	■
SMHI-RCA_NORESM_EUR44	■	■	■

Legende:

- M8 : optimale Vergleichbarkeit der Szenarien
- ■ M16: robuste Abbildung der «emissionsbelasteten» Zukunft
- ■ ■ M31: umfassendste, aber unausgewogene Abbildung der Zukunft

## 1.4 Klima und Wetter

In dieser Studie steht der Klimawandel im Mittelpunkt. Die Veränderungen des Klimas leiten wir aus dem Vergleich der 30-jährigen Mittelwerte von Kennwerten der Referenzperiode 1981–2010 und der mittleren Zukunft 2040–2069 und fernen Zukunft (2070–2099) ab. Diese 30-jährigen Mittelwerte lassen sich aus dem Wetter berechnen, das mehr oder weniger stark um diesen Mittelwert schwankt, dessen Charakteristik also die Variabilität von Jahr zu Jahr ist (vgl. Abb. 1.3). Zu dieser Variabilität können wir in der vorliegenden Untersuchung keine Aussagen machen, so auch nicht zur Veränderung der maximalen und minimalen Werte oder zur Abfolge von nassen und trockenen Jahren.

Dieser Unterschied zwischen Klima und Wetter ist bei der Interpretation der Ergebnisse unbedingt mit zu berücksichtigen.

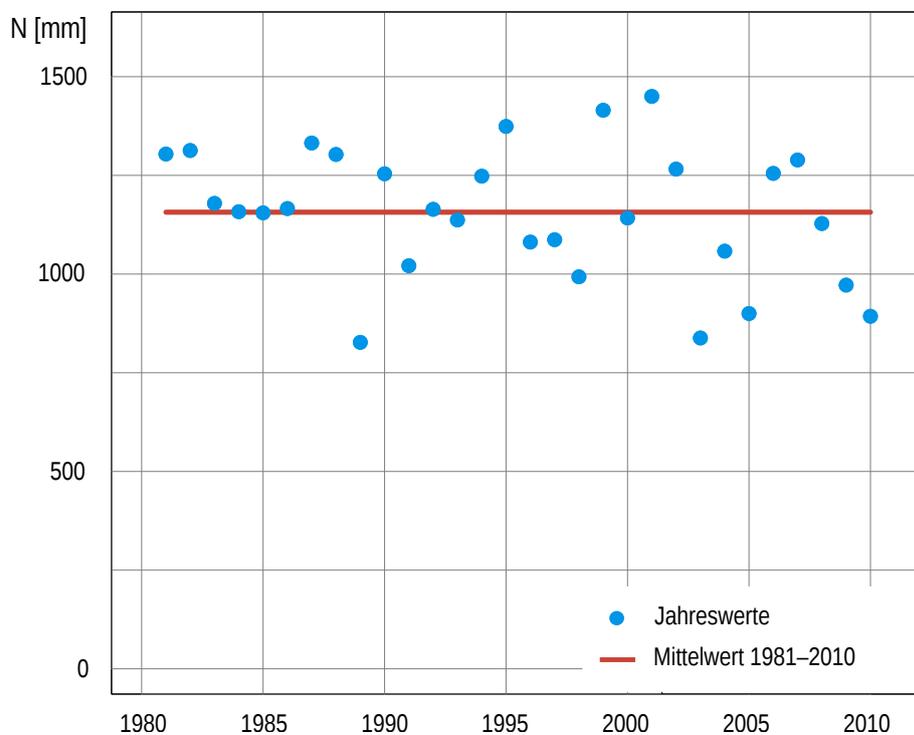


Abb. 1.3: Einzelwerte und Mittelwert des Jahresniederschlags im Einzugsgebiet der Broye (Daten: Hydrologischer Atlas der Schweiz)

## 1.5 Aufbau des Berichts

In der Studie CCHydro<sup>FR</sup> werden zwei Kenngrössengruppen – eine klimatische und eine hydrologische – betrachtet und modelliert. Jede Gruppe basiert auf einer unterschiedlichen Methodik und bedingt eine un-

terschiedliche inhaltliche Präsentation der Ergebnisse. Deshalb werden die Ergebnisse in zwei getrennten Hauptkapiteln dargestellt.

Der vorliegende Bericht ist auch ein Nachschlagewerk. Das klimatische Hauptkapitel ist nach Kenngrößen, das hydrologische nach Regionen gegliedert. Zusammenfassende Darstellungen runden beide Hauptkapitel ab.



## **2 Veränderung des Klimas im Kanton und in dessen Regionen**

### **2.1 Einleitung**

#### **2.1.1 Zielsetzung**

Die CH2018-Datensätze bilden die Grundlage, um das Ausmass der klimatischen Veränderungen im Kanton Freiburg und dessen Regionen auf der Basis von Kenngrössen zu quantifizieren, und dies für die mittlere Zukunft 2040–2069 und ferne Zukunft 2070–2099. Dazu sollen auf der Basis der Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 die absoluten und relativen Veränderungen der Kenngrössen in diesen Zukunftsperioden gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 modelliert werden. Die Ergebnisse sollen pro Kenngrösse auf einem Resultateblatt beschrieben, visualisiert und zu aussagekräftigen Kennziffern verdichtet werden, welche einen direkten Vergleich der verschiedenen Kenngrössen auf einfache Art und Weise ermöglichen (vgl. Abb. 2.44).

### **2.2 Betrachtete Regionen**

Zur räumlichen Differenzierung der klimatischen Veränderungen wurde der Kanton Freiburg in Absprache mit dem AfU nach geographischen Gesichtspunkten in die folgenden fünf Regionen unterteilt:

1. BasBro: Region Untere Broye, région Basse Broye
2. GraMar: Region Seeland-Grosses Moos, Région des 3 Lacs – Grand Marais
3. PlaNor: Region Nördliches Mittelland, région Plateau Nord
4. PlaSud: Region Südliches Mittelland, région Plateau Sud
5. PreAlp: Region Voralpen, région Préalpes

Die Regionen sind in Abbildung 2.1 dargestellt und werden in Tabelle 2.2.1 mit geographischen Kennwerten charakterisiert. Dabei ist die mittlere Höhe einer Region für die Einordnung der Ergebnisse besonders bedeutsam. Es handelt sich um jene Höhe, bei der die eine Hälfte der Fläche oberhalb und die andere Hälfte unterhalb liegt.

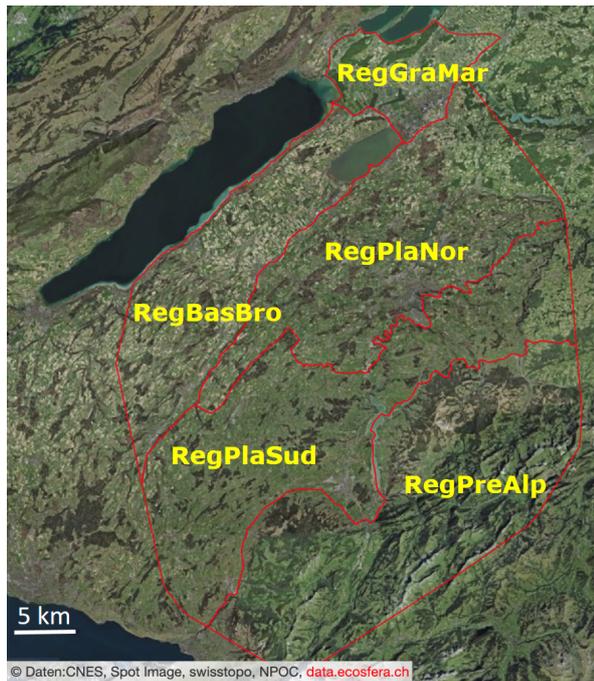


Abb. 2.1: Untergliederung des Kantons Freiburg in Regionen

Die Darstellung der Höhenverhältnisse in der Abbildung 2.2 lässt eine Dreigliederung erkennen:

1. die tief gelegenen Regionen BasBro, GraMar und PlaNor,
2. die Region PlaSud sowie
3. die hoch gelegene Region PreAlp.

Tab. 2.2.1: Geographische Kennwerte der Regionen

Kennwert	Einheit	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Fläche	km <sup>2</sup>	2253.3	362.9	125.1	509.2	603.0	653.2
mittlere Höhe	m	828.0	539.0	451.0	597.0	789.0	1276.0
minimale Höhe	m	428.0	428.0	429.0	429.0	487.0	484.0
maximale Höhe	m	2383.0	850.0	602.0	811.0	1295.0	2383.0
<b>Ausgewählte Landnutzungsklassen</b>							
Ackerbau	%	46.6	65.5	73.8	59.1	63.9	5.1
Grünland	%	16.3	0.1	0.0	6.9	9.4	42.0
Nadelwald	%	9.8	0.9	0.0	0.3	7.4	26.4
Mischwald	%	12.8	11.3	13.1	17.0	10.5	12.4
Siedlung	%	7.1	9.7	7.2	11.9	7.2	1.7
Wasserflächen	%	1.7	6.4	0.3	0.8	0.9	0.7

KtFR: Die Region KtFR wurde zusammengesetzt aus den fünf Teilregionen BasBro, ....

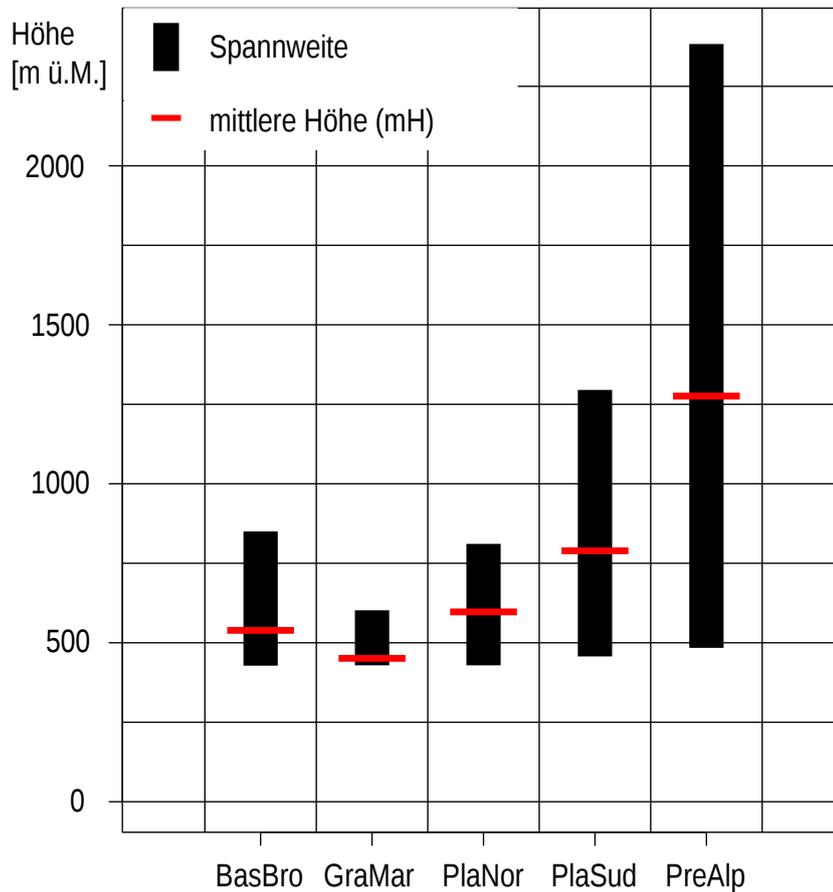


Abb. 2.2: Die Höhenverhältnisse in den Regionen

## 2.3 Methodisches Vorgehen

### 2.3.1 Von den Modellketten zu den charakteristischen Kenngrößen

Zur Berechnung der Kenngrößen bzw. deren Veränderungen werden die in Abbildung 2.1 ausgewiesenen Regionen mit den gegitterten CH2018-Datensätzen verschnitten. Als Ergebnis dieses Teilschritts liegen pro Region für den Zeitraum 1981–2099 Zeitreihen von Niederschlag und Lufttemperatur als Gebietsmittel in täglicher Auflösung vor und dies für alle 68 Modellketten. Das ergibt pro Region rund 5.9 Mio. und insgesamt rund 34.4 Mio. Einzelwerte.

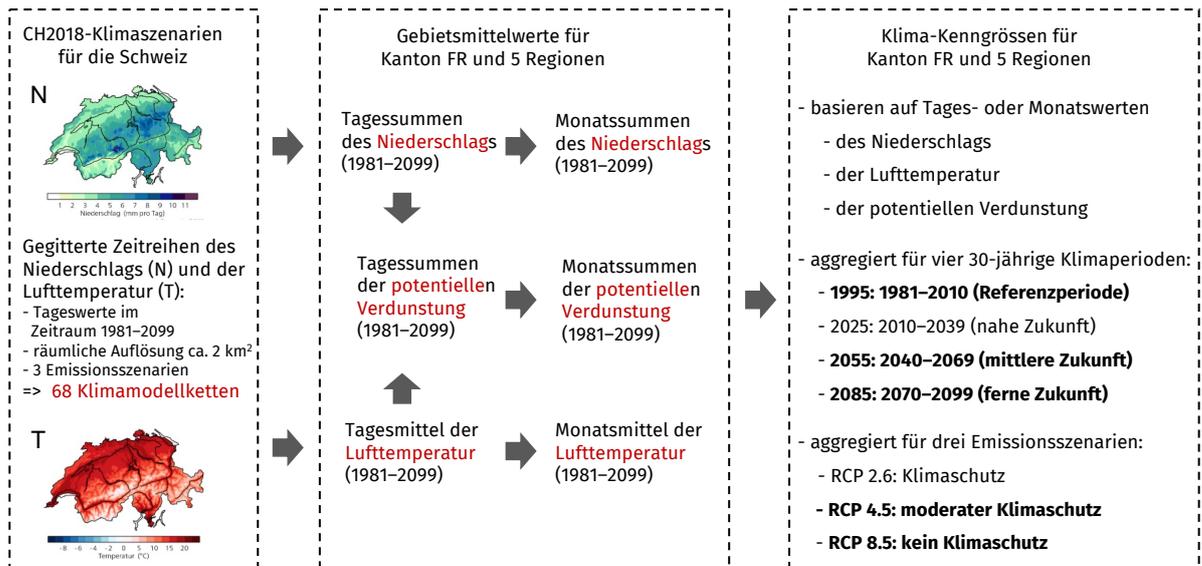


Abb. 2.3: Methodisches Vorgehen dargestellt am Beispiel der Kenngröße potentielle Verdunstung

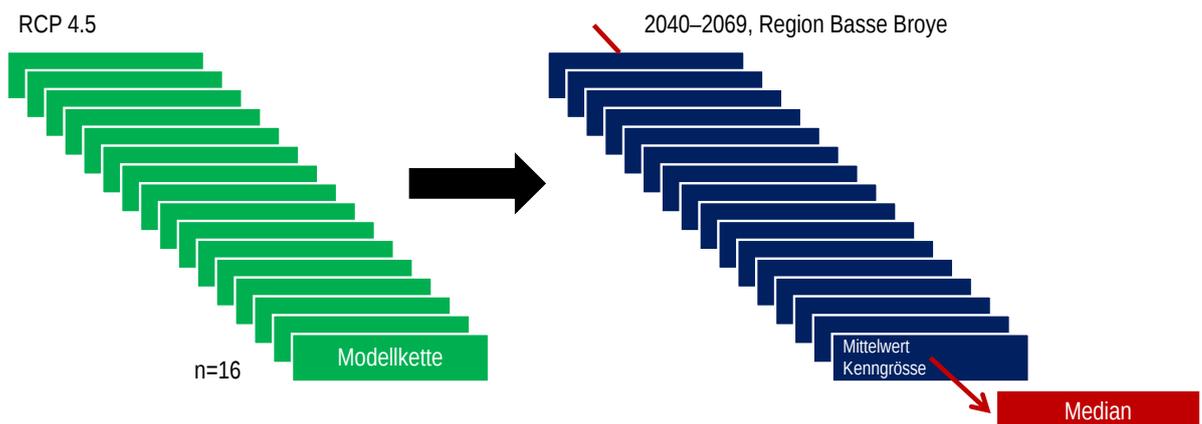


Abb. 2.4: Zur Herleitung des finalen Kennwerts in jeder 30-jährigen Zeitperiode am Beispiel des Szenarios RCP 4.5

Aufgrund der in Kap. 1.3.3 aufgeführten Kriterien werden für die beiden Emissionsszenarien RCP4.5 und RCP 8.5 je 16 Modellketten verwendet. Jede Modellkette wird wie folgt prozessiert (vgl. dazu auch Abb. 2.3).

1. Aus den Tageswerten werden für die einzelnen Jahre der 30-jährigen Referenzperiode 1981–2010 und der Zukunftsperioden 2040–2069 und 2070–2099 die für die jeweilige klimatische Kenngrösse charakteristischen Kennwerte (Mittelwert, Quantile etc.) wo sinnvoll als Monatswerte, sonst als Saisonwerte berechnet. Die Monatswerte werden anschliessend zu Saison- und Jahreswerten aggregiert. Es resultieren für jedes Jahr einer 30-jähriger Periode Kennwerte in saisonaler und jährlicher Auflösung.
2. Durch die Mittelung dieser Werte ergeben sich die langjährigen Periodenmittelwerte.

Wie bereits erwähnt, verfügt jedes Emissionsszenario über 16 Modeketten. Aus den langjährigen Periodenmittelwerten der einzelnen Modellketten wird schliesslich der Median als charakteristischer Kennwert bestimmt (vgl. Abb. 2.4). Die Streuung der 16 langjährigen Mittelwerte der Modellketten gibt zusätzlich einen Hinweis auf die Unsicherheiten der Abschätzungen.

### **2.3.2 Bestimmung der zukünftigen Veränderungen gegenüber der Referenzperiode**

Bei der Berechnung der Veränderungen zwischen Zukunftsperiode und Referenzperiode wird wie folgt vorgegangen:

1. Berechnung der relativen und/oder absoluten Abweichungen zwischen den langjährigen Periodenmittelwerten der Referenzperiode auf der einen Seite und den langjährigen Periodenmittelwerten der mittleren bzw. fernen Zukunftsperioden auf der anderen Seite, dies für jede Modellkette.
2. Für jede Zukunftsperiode liegen somit 16 Abweichungen vor. Diese werden dann als Medianwert zusammengefasst.

Die ausgewiesenen Veränderungen werden also aus einer in sich geschlossenen Modellwelt abgeleitet. Unsere Untersuchungen zeigten, dass in der Referenzperiode 1981–2010 Differenzen zwischen den beobachteten und modellierten Daten auftreten können (sog. Modellbias, vgl. beispielsweise Tab. 2.4.1). In der praktischen Anwendung ist es allerdings vertretbar, die relativen (prozentualen) Veränderungen direkt auf die Beobachtungsdaten aufzuprägen. Dabei ist allerdings auch die Modellgüte im Auge zu behalten (vgl. Kap. 2.3.4).

### **2.3.3 Darstellung, Klassierung und Visualisierung der zukünftigen Veränderungen gegenüber der Referenzperiode**

Die Tab. 2.3.1 zeigt ein Beispiel, wie die Veränderungen einer klimatischen Kenngrösse im Bericht dargestellt wird.

Tab. 2.3.1: Prozentuale Veränderung der mittleren Niederschlagsmengen in der fernen Zukunft 2070–2099 gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	0	1	3	1	-1	-2
DJF	19	28	29	23	17	12
MAM	11	17	18	14	10	6
JJA	-25	-21	-21	-24	-26	-27
SON	-4	1	4	-1	-5	-10

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Für jede Region und Zeitperiode werden die Veränderungen gegenüber der Referenzperiode ausgewiesen. Das Vorzeichen gibt an, ob es sich um eine Zunahme oder eine Abnahme handelt. Bei den Kenngrössen zum Niederschlag und bei Kenngrössen, welche eine Veränderung der Anzahl von Tagen beschreiben (z.B. mittlere Anzahl heisser Tage), werden in den Tabellen die prozentualen Veränderungen ausgegeben, während bei den Kenngrössen zur Lufttemperatur die absoluten Veränderungen in Grad Celsius ausgewiesen werden.

Da die Variationsbreite der Veränderungen oft relativ gross ist – in Tab.2.3.1 -27 bis +28 % –, werden die Veränderungen zur besseren Interpretierbarkeit und Vergleichbarkeit klassiert:

#### Veränderungen in Prozentwerten

**sehr grosse Abnahme:** Veränderung gegenüber der Referenzperiode  $\leq -20\%$

**grosse Abnahme:** Veränderung gegenüber der Referenzperiode  $-20\%$  bis  $\leq -10\%$

**moderate Abnahme:** Veränderung gegenüber der Referenzperiode  $-10\%$  bis  $\leq -5\%$

**kleine Abnahme:** Veränderung gegenüber der Referenzperiode  $-5\%$  bis  $0\%$

**kleine Zunahme:** Veränderung gegenüber der Referenzperiode  $0\%$  bis  $5\%$

**moderate Zunahme:** Veränderung gegenüber der Referenzperiode  $\geq 5\%$  bis  $10\%$

**grosse Zunahme:** Veränderung gegenüber der Referenzperiode  $\geq 10\%$  bis  $20\%$

**sehr grosse Zunahme:** Veränderung gegenüber der Referenzperiode  $\geq 20\%$

#### Temperaturveränderungen in °C

Es treten nur positive Werte (Temperaturzunahmen) auf.

**kleine Zunahme:** Veränderung gegenüber der Referenzperiode  $0^\circ\text{C}$  bis  $1^\circ\text{C}$

**moderate Zunahme:** Veränderung gegenüber der Referenzperiode  $\geq 1^\circ\text{C}$  bis  $2^\circ\text{C}$

**grosse Zunahme:** Veränderung gegenüber der Referenzperiode  $\geq 2^\circ\text{C}$  bis  $3^\circ\text{C}$

**sehr grosse Zunahme:** Veränderung gegenüber der Referenzperiode  $\geq 3^\circ\text{C}$

Man beachte, dass die Schwellenwerte gutachterlich festgelegt wurden. In wenigen Einzelfällen musste von diesen beiden Klassifikationen abgewichen werden. Es sei in diesem Zusammenhang auf die jeweilige Kenngrösse verwiesen.

Zur besseren Lesbarkeit dieser Tabellen werden die klassierten Veränderungen mit Farben codiert. Die Skalen haben wir nach der psychologischen Wirkung von Farben ausgewählt. Deshalb wechseln die Farbskalen je nach Kenngrössengruppe. Die Veränderungen des Niederschlags reichen von Rot (Abnahmen, trockener) über Gelb (kleine Veränderungen) nach Blau (Zunahmen, feuchter). Bei den Kenngrössen der Lufttemperatur werden Zunahmen mit Rottönen dargestellt. Bei Kenngrössen, welche die Veränderung der Anzahl von Tagen beschreiben, reicht die Skala von Grün (Abnahme) über Gelb (geringe Veränderungen) zu Violett (Zunahme).

#### 2.3.4 Validierung der modellierten Referenzwerte

Bei den Werten aus den CH2018-Klimaszenarien handelt es sich ausschliesslich um modellierte Werte. Zur Validierung dieser Werte mit Beobachtungsdaten der realen Welt wurden die Daten mit dem RhiresD-Datensatz der MeteoSchweiz verglichen, welche den Datensatz wie folgt beschreibt<sup>1</sup>: «RhiresD is a spatial analysis of daily precipitation over hydrological Switzerland, encompassing all locations from where surface waters can drain to locations within the national border. Temporally, the analysis extends over a multi-decadal period (1961–present). It provides detailed spatial information and high accuracy by exploiting all available rain-gauge measurements (typically 430 within, and 220 outside Switzerland each day).»

Beim RhiresD-Datensatz handelt sich also um einen von CH2018 völlig unabhängigen, auf Beobachtungsdaten basierenden Datensatz, so dass die Güte der Modellierungen CH2018 wenigstens für die Referenzperiode 1981–2010 bewertbar ist.

**Modellgüte bei prozentualen Abweichungen** (Abweichungen gegenüber den Beobachtungen):

- $\leq |5|$  %: *sehr gut*
- $|5|$  bis  $|10|$  %: *gut*
- $|10.1|$  bis  $|20|$  %: *ausreichend*
- $> |20|$  %: *ungenügend*

---

<sup>1</sup>[https://www.meteoswiss.admin.ch/dam/jcr:4f51f0f1-0fe3-48b5-9de0-15666327e63c/ProdDoc\\_RhiresD.pdf](https://www.meteoswiss.admin.ch/dam/jcr:4f51f0f1-0fe3-48b5-9de0-15666327e63c/ProdDoc_RhiresD.pdf)

### Modellgüte bei absoluten Abweichungen der Lufttemperatur:

- $\leq |0.25|$  °C: *sehr gut*
- $|0.25|$  bis  $|0.5|$  °C: *gut*
- $|0.51|$  bis  $|1.0|$  °C: *ausreichend*
- $> |1.0|$  °C: *ungenügend*

Dabei handelt es sich wiederum um gutachterlich festgelegte Schwellenwerte<sup>2</sup>.

### 2.3.5 Synthese und Gesamtschau

Ein Ampelsystem soll einen zusammenfassenden, synthetischen Blick auf die Veränderungen einer klimatischen Kenngrösse ermöglichen. Es geht von der Tabelle 2.3.1 der Veränderungen aus und stellt das Ausmass der Abweichungen von der Referenzperiode in einfacher und komprimierter Art und Weise dar. Das Vorzeichen der Abweichung wird dabei nicht berücksichtigt. Das Ampelsystem verdeutlicht, in welchem Ausmass die Kennwerte zukünftiger Perioden von der Referenzperiode abweichen. Auch diese Abweichungen werden mit Farben codiert:

- **klein, 1:** Abweichungen von der Referenzperiode  $< |5|$  %
- **mittel, 2:** Abweichungen von der Referenzperiode  $\geq |5|$  bis  $|10|$  %
- **gross, 3:** Abweichungen von der Referenzperiode  $\geq |10|$  % bis  $|20|$  %
- **sehr gross, 4:** Abweichungen von der Referenzperiode  $\geq |20|$  %

Bei den Jahreswerten kann der Farbcode direkt aus dem Grad der Veränderungen abgeleitet werden. Die Veränderungen in den vier Saisons werden zu einem einzigen Wert zusammengeführt. Dazu werden die Klassenwerte der einzelnen Saison aufsummiert. Dieser Summenwert wird in der Tabelle aufgeführt und dann wie folgt codiert (vgl. Abb. 2.3.2):

- **klein:** 4 und 5 Punkte<sup>3</sup>
- **mittel:** 6 bis 9 Punkte
- **gross:** 10 bis 13 Punkte
- **sehr gross:** 14 bis 16 Punkte

---

<sup>2</sup>Über die Wahl der Schwellenwerte liesse sich trefflich diskutieren. Wir hatten bei der Festlegung der Schwellenwerte stets auch das Ziel vor Augen, zu einer einfachen und übersichtlichen Gesamtbeurteilung zu gelangen

<sup>3</sup>4 ist die minimal mögliche Punktezahl. Sie ergibt sich, wenn jede Saison mit der Punktzahl 1 bewertet wird. 16 ist die maximal mögliche Punktezahl.

Tab. 2.3.2: Synthese der Veränderungen der mittleren jährlichen und saisonalen Niederschlagsmengen basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	1	2	2	1	1	1
2055	Saisons	9	10	9	9	9	9
2085	Jahr	1	1	1	1	1	1
2085	Saisons	11	12	12	12	12	12

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Die Abb. 2.5 fasst das beschriebene Ampelsystem zusammen. Noch nicht diskutiert haben wir den Schritt von der «Synthesetabelle der Kenngrösse» zum «Eintrag in die Gesamtsynthese». Dazu werden die Werte der einzelnen Regionen gemittelt und codiert.

### Tabelle der Veränderungen

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	0	1	3	1	-1	-2
DJF	19	28	29	23	17	12
MAM	11	17	18	14	10	6
JJA	-25	-21	-21	-24	-26	-27
SON	-4	1	4	-1	-5	-10

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

### Klassierte Veränderungen

Y	1	1	1	1	1	1
DJF	3	4	4	4	3	3
MAM	3	3	3	3	3	2
JJA	4	4	4	4	4	4
SON	1	1	1	1	2	3
Summe	11	12	12	12	12	12
Saisons						

### Synthesetabelle der Kenngrösse

2085	Jahr	1	1	1	1	1
2085	Saisons	11	12	12	12	12

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

### Eintrag in die Gesamtsynthese

■	■
Jahr	Saisons

Abb. 2.5: Übersicht über das Ampelsystem

## 2.4 Resultate

### 2.4.1 Mittlere Niederschlagsmenge

#### Definition der Kenngrösse

Mittlere jährliche und saisonale Niederschlagsmengen [mm/dt] einer 30-jährigen Periode.

Vorgehen: (1) Bestimmung der jährlichen und saisonalen Niederschlagsmengen pro Einzeljahr. (2) Mittelung dieser einzeljährlichen Werte zum Periodenmittel.

#### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte RhiresD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden.

Tab. 2.4.1: Mittlere jährliche und saisonale Niederschlagsmengen [mm/dt]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 (RCP 4.5) und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	1263	1007	1000	1061	1291	1582
2	Y	RhiresD	1254	1009	1016	1068	1290	1549
4	Y	$\Delta\%$	1	0	-2	-1	0	2
5	DJF	CH2018	275	221	225	217	276	361
6	DJF	RhiresD	256	210	220	203	256	331
8	DJF	$\Delta\%$	7	5	2	7	8	9
9	MAM	CH2018	314	245	238	266	326	394
10	MAM	RhiresD	311	245	240	272	327	377
12	MAM	$\Delta\%$	1	0	-1	-2	0	4
13	JJA	CH2018	362	277	276	310	370	455
14	JJA	RhiresD	379	289	292	324	387	481
16	JJA	$\Delta\%$	-4	-4	-6	-4	-4	-5
17	SON	CH2018	310	264	264	267	317	375
18	SON	RhiresD	308	265	265	269	320	360
20	SON	$\Delta\%$	0	0	0	-1	-1	4

Unter RCP 4.5 bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte RhiresD sehr gut ab. Aus regionaler Sicht bestehen keine Unterschiede. Auch auf saisonaler Basis handelt es sich um eine sehr gute Modellgüte. Letztere ist im Frühling (MAM) und Herbst (SON) tendenziell etwas besser. In der Region PreAlp bestehen die grössten Abweichungen zwischen Modell und Referenz.

Tab. 2.4.2: Mittlere jährliche und saisonale Niederschlagsmengen [mm/dt]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 (RCP 8.5) und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	1263	1008	1000	1061	1292	1584
2	Y	RhiresD	1254	1009	1016	1068	1290	1549
4	Y	$\Delta\%$	1	0	-2	-1	0	2
5	DJF	CH2018	276	221	225	215	276	359
6	DJF	RhiresD	256	210	220	203	256	331
8	DJF	$\Delta\%$	8	5	2	6	8	9
9	MAM	CH2018	316	246	238	268	328	395
10	MAM	RhiresD	311	245	240	272	327	377
12	MAM	$\Delta\%$	2	1	-1	-1	0	5
13	JJA	CH2018	361	278	275	310	370	454
14	JJA	RhiresD	379	289	292	324	387	481
16	JJA	$\Delta\%$	-5	-4	-6	-4	-4	-6
17	SON	CH2018	312	267	266	267	318	377
18	SON	RhiresD	308	265	265	269	320	360
20	SON	$\Delta\%$	1	1	0	-1	-1	5

Unter RCP 8.5 bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte RhiresD sehr gut ab. Aus regionaler Sicht bestehen keine Unterschiede. Auch auf saisonaler Basis handelt es sich um eine sehr gute Modellgüte. Letztere ist im Frühling (MAM) und Herbst (SON) tendenziell etwas besser. In der Region PreAlp bestehen deutlich grössere Abweichungen zwischen Modell und Referenz.

## Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.3: Prozentuale Veränderung der mittleren Niederschlagsmengen in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	-3	-1	-1	-3	-3	-3
DJF	7	9	9	8	7	5
MAM	2	2	4	1	2	1
JJA	-13	-12	-11	-12	-13	-13
SON	-1	0	0	-1	-2	-3

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.4: Prozentuale Veränderung mittleren Niederschlagsmengen in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	2	5	6	3	1	-1
DJF	11	13	13	14	11	11
MAM	9	13	12	11	9	7
JJA	-10	-9	-7	-9	-11	-11
SON	1	6	4	2	0	-3

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Die mittleren Jahresniederschläge verändern sich kaum. Aus saisonaler Sicht erkennt man grosse Abnahmen im Sommer und moderate Zunahmen im Winter. In den übrigen Saisons sind kaum Veränderungen vorhanden. Es bestehen kaum regionale Unterschiede.

RCP 8.5: Die mittleren Jahresniederschläge verändern sich gegenüber der Referenzperiode etwas stärker als unter RCP 4.5. Während sie unter dem Szenario RCP 4.5 tendenziell abnehmen, nehmen sie hier unter RCP 8.5 tendenziell zu. Allerdings sind die Veränderungen durchwegs klein. Aus saisonaler Sicht sind die Zunahmen im Vergleich zu RCP 4.5 im Winter etwas grösser und die Abnahmen im Sommer etwas kleiner. Im Frühling (MAM) nehmen nun die mittleren Niederschlagsmengen im moderaten bis grossen Umfang zu. Tendenzuell nehmen die Niederschläge in den tief gelegenen Regionen BasBro und GraMar stärker zu als in den höher gelegenen Regionen.

## Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.5: Prozentuale Veränderung mittleren Niederschlagsmengen in der fernen Zukunft 2070–2099 gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	1	3	4	2	1	0
DJF	11	18	16	12	10	8
MAM	7	11	10	9	6	4
JJA	-12	-10	-8	-10	-13	-11
SON	3	4	4	4	2	0

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.6: Prozentuale Veränderung mittleren Niederschlagsmengen in der fernen Zukunft 2070–2099 gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	0	1	3	1	-1	-2
DJF	19	28	29	23	17	12
MAM	11	17	18	14	10	6
JJA	-25	-21	-21	-24	-26	-27
SON	-4	1	4	-1	-5	-10

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Die mittleren Jahresniederschläge verändern sich kaum. Aus saisonaler Sicht stehen den moderaten bis grossen Zunahmen im Winter (DJF) und Frühling (MAM) grosse Abnahmen im Sommer (JJA) gegenüber. Regionale Unterschiede sind kaum vorhanden.

RCP 8.5: Die mittleren Jahresniederschläge verändern sich wiederum kaum.

Aus saisonaler Sicht verstärken sich die bei RCP 4.5 festgestellten Veränderungen, besonders im Winter und Sommer mit sehr grossen Veränderungen. Aber auch im Frühling ist eine stärkere Zunahme zu beobachten. Die Winter werden zunehmend nasser und die Sommer zunehmend trockener.

## Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt behandelt. Die Ergebnisse werden pro Szenario in zwei Tabellen zusammengefasst, die für sich selbst sprechen sollen.

Die erste Tabelle zeigt den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Es wird zwischen den Abweichungen auf Jahresbasis und – verdichtet zu einem einzigen Wert – auf saisonaler Basis unterschieden. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violetttöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode. Bei den in der Tabelle ausgewiesenen Abweichungen sind die Vorzeichen, also ob es sich um Zu- oder Abnahmen gegenüber der Referenzperiode handelt, nicht berücksichtigt.

In der zweiten Tabelle werden diese Informationen zu einer finalen Beurteilung der Abweichungen verdichtet (Abw. Y, Abw. Saisons). Diese finale Beurteilung erlaubt es in der Gesamtsynthese in Kapitel 2.5, den Grad der Abweichungen aller klimatischen Kenngrössen direkt zu vergleichen. Zusätzlich werden auch die Vorzeichen der Veränderungen berücksichtigt. Es ergibt sich aus dem Zusammenschluss der saisonalen Veränderungen im Kanton und in den Regionen: + bedeutet eine Zunahme der Werte im Vergleich zur Referenz, - eine Abnahme. ± bedeutet, dass die Vorzeichen der Veränderungen pro Saisons in den fünf Regionen nicht übereinstimmen, also kein einheitliches Bild entsteht. Die Stärke der Veränderungen wird mit der Anzahl der Plus- bzw. Minuszeichen beschrieben:

+/-: kleine Zu-/Abnahme                      +/- -: mittlere Zu-/Abnahme  
 +++/ - - -: grosse Zu-/Abnahme            ++++/ - - - -: sehr grosse Zu-/Abnahme

#### RCP 4.5

Tab. 2.4.7: Synthese der Veränderungen der mittleren Niederschlagsmengen basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	1	1	1	1	1	1
2055	Saisons	7	7	7	7	7	7
2085	Jahr	1	1	1	1	1	1
2085	Saisons	9	10	9	9	9	7

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.8: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der mittleren Niederschlagsmengen unter RCP 4.5.  
Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>klein</b>	-	<b>mittel</b>	++	+	- - -	±
um 2085	<b>klein</b>	+	<b>mittel</b>	+++	++	- - -	+

## RCP 8.5

Tab. 2.4.9: Synthese der Veränderungen der mittleren jährlichen und saisonalen Niederschlagsmengen basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	1	2	2	1	1	1
2055	Saisons	9	10	9	9	9	9
2085	Jahr	1	1	1	1	1	1
2085	Saisons	11	12	12	12	12	12

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.10: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der mittleren Niederschlagsmengen unter RCP 4.5.  
Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>klein</b>	±	<b>mittel</b>	+++	++	- -	±
um 2085	<b>klein</b>	±	<b>gross</b>	++++	+++	- - - -	±

## Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigen sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

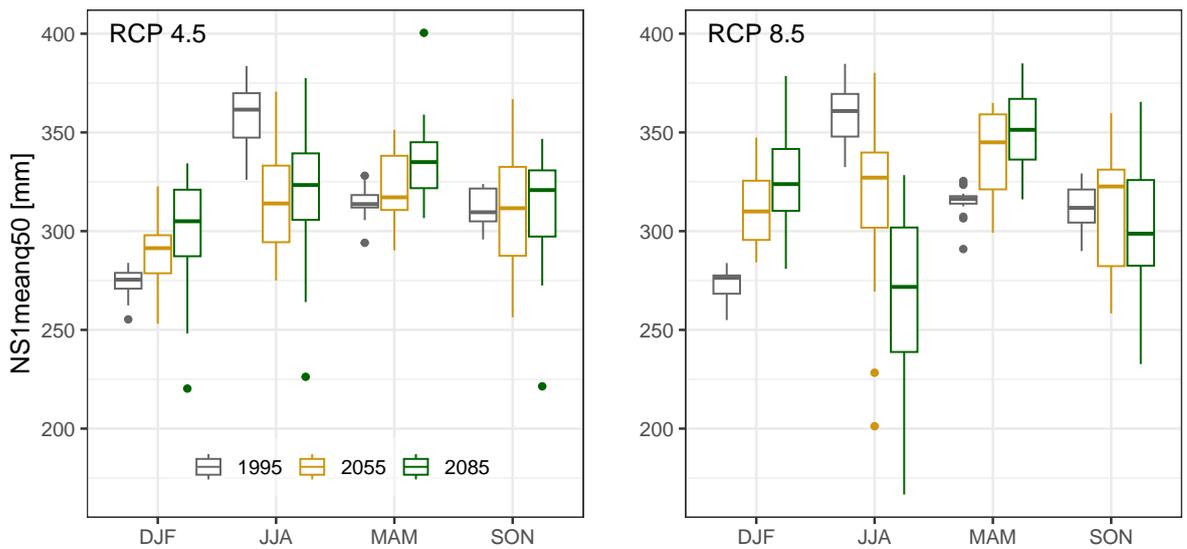


Abb. 2.6: Mittlere saisonale Niederschläge im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

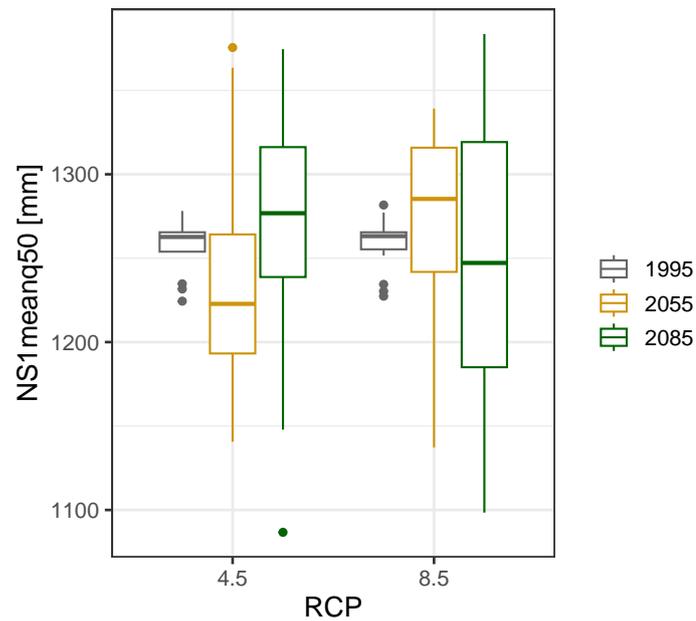


Abb. 2.7: Mittlere jährliche Niederschläge im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

## 2.4.2 Mittlere Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags

### Definition der Kenngrösse

Mittlere Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags [mm/d] einer 30-jährigen Periode in der Granularität Jahr und Saison.

Vorgehen: (1) Bestimmung der grössten jährlichen und saisonalen Tagesniederschläge pro Einzeljahr. (2) Bestimmung des Mittelwerts der Verteilung der dreissig grössten Tagesniederschläge.

### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte RhiresD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden.

Tab. 2.4.11: Mittlere Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags [mm/d]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 (RCP 4.5) und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	46	42	41	43	48	54
2	Y	RhiresD	46	46	42	43	48	50
4	Y	$\Delta\%$	0	-8	-2	-1	0	6
5	DJF	CH2018	28	26	26	25	29	36
6	DJF	RhiresD	27	24	26	22	26	32
8	DJF	$\Delta\%$	5	7	2	15	10	13
9	MAM	CH2018	31	28	27	29	33	36
10	MAM	RhiresD	29	28	28	26	30	34
12	MAM	$\Delta\%$	8	-1	-2	11	7	8
13	JJA	CH2018	34	32	31	34	38	42
14	JJA	RhiresD	36	32	30	36	40	44
16	JJA	$\Delta\%$	-6	1	2	-7	-6	-3
17	SON	CH2018	35	32	31	32	36	40
18	SON	RhiresD	35	34	31	31	38	40
20	SON	$\Delta\%$	0	-4	0	3	-3	1

Unter **RCP 4.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte RhiresD insgesamt sehr gut ab. Die grösste Abweichung besteht in der Region BasBro. Auf saisonaler Basis handelt es sich um eine insgesamt

gute Modellgüte. Die Modellierungsergebnisse im Winter (DJF) sind dafür verantwortlich, dass man auf saisonaler Basis insgesamt nicht von einer sehr guten Modellgüte sprechen kann. Aus regionaler Sicht ist die Modellgüte in den Regionen PlaNor und PlaSud weniger gut als in den anderen Regionen.

Tab. 2.4.12: Mittlere Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags [mm/d]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 (RCP 8.5) und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	46	42	40	43	48	54
2	Y	RhiresD	46	46	42	43	48	50
4	Y	$\Delta\%$	-1	-9	-5	0	0	7
5	DJF	CH2018	28	25	25	25	29	35
6	DJF	RhiresD	27	24	26	22	26	32
8	DJF	$\Delta\%$	4	4	-2	16	9	12
9	MAM	CH2018	31	28	27	29	33	36
10	MAM	RhiresD	29	28	28	26	30	34
12	MAM	$\Delta\%$	7	-2	-2	12	8	8
13	JJA	CH2018	36	32	31	35	38	43
14	JJA	RhiresD	36	32	30	36	40	44
16	JJA	$\Delta\%$	-1	3	3	-4	-6	-2
17	SON	CH2018	35	34	31	32	37	40
18	SON	RhiresD	35	34	31	31	38	40
20	SON	$\Delta\%$	-1	-2	0	5	-2	1

Unter **RCP 8.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte RhiresD sehr gut ab. Aus regionaler Sicht schwanken die Abweichungen zwischen Modell- und Referenzwert zwischen -9 und +7%. Auf saisonaler Basis handelt es sich wiederum um eine insgesamt sehr gute Modellgüte. Sie ist im Winter (DJF) und Frühling (MAM) weniger gut als in den übrigen Jahreszeiten. In der Regionen PlaNor, PlaSud und PreAlp bestehen deutlich grössere Abweichungen zwischen Modell- und Referenzwert.

## Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.13: Prozentuale Veränderung der Mittleren Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags in der mittleren Zukunft 2040–2069 gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	2	3	2	4	0	0
DJF	4	2	7	5	3	3
MAM	0	2	2	-2	1	1
JJA	1	6	0	-1	-3	-2
SON	4	9	9	6	4	0

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.14: Prozentuale Veränderung der Mittleren Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags in der mittleren Zukunft 2040–2069 gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	4	12	8	8	7	5
DJF	7	12	9	8	6	4
MAM	2	7	8	8	2	5
JJA	7	3	3	6	6	2
SON	7	9	6	4	5	6

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP4.5: Die Mittleren Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags verändern sich auf Jahresbasis gegenüber der Referenzperiode kaum. Aus saisonaler Sicht besteht ein Raum-Zeit-Mosaik von leichten bis moderaten Veränderungen. Klare Strukturen sind nicht erkennbar. Regional sind die Unterschiede gering.

RCP8.5: Es gilt als erstes hervorzuheben, dass die Mittleren Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 ausnahmslos zunehmen. Die Zunahme ist auf Jahresbasis mehrheitlich moderat. BasBro weist als einzige Region eine grosse Zunahme auf. Das beim Szenario RCP4.5 festgestellte Mosaik bei den saisonalen Werten gewinnt hier nun an Prägnanz mit mehrheitlich moderaten Zunahmen im Winter (DJF), Frühling (MAM) und Herbst (SON).

## Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.15: Prozentuale Veränderung der Mittleren Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags in der fernen Zukunft 2070–2099 gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	5	6	6	6	4	2
DJF	4	6	8	7	5	3
MAM	4	9	7	9	5	7
JJA	7	8	6	7	4	9
SON	5	8	10	2	4	5

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.16: Prozentuale Veränderung der Mittleren Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags in der fernen Zukunft 2070–2099 gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	7	16	13	8	7	6
DJF	18	19	17	23	17	16
MAM	12	17	21	16	12	9
JJA	-3	-2	-1	3	2	-2
SON	6	12	12	6	4	6

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Die Mittleren Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags nehmen auf Jahresbasis in kleinem bis moderatem Ausmass zu. Auch auf saisonaler Basis nehmen die Werte durchwegs zu. Diese Zunahmen sind mehrheitlich moderat. Aus regionaler Sicht sind die Zunahmen in den höher gelegenen Gebieten, also PlaSud und PreAlp, insgesamt kleiner als im restlichen Kantonsteil.

RCP 8.5: Die Zunahmen der Mittleren Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags schwanken auf Jahresbasis zwischen moderat und gross. Auf saisonaler Basis nehmen die Werte im Winter (DJF), Frühling (MAM) und Herbst (SON) durchwegs zu, im Winter und Frühling mehr als im Herbst. Im Sommer sind die Unterschiede zur Referenzperiode klein. Aufgrund dieser nur kleinen Veränderungen im Sommer macht es wenig Sinn, dem Vorzeichen der Veränderung eine zu grosse Bedeutung beizumessen. Interessant ist es trotzdem, dass in den einzelnen Regionen die Werte im Sommer nun abnehmen.

## Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt behandelt. Die Ergebnisse werden pro Szenario in zwei Tabellen zusammengefasst, die für sich selbst sprechen sollen.

Die erste Tabelle zeigt den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Es wird zwischen den Abweichungen auf Jahresbasis und – verdichtet zu einem einzigen Wert – auf saisonaler Basis unterschieden. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violetttöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode. Bei den in der Tabelle ausgewiesenen Abweichungen sind die Vorzeichen, also ob es sich um Zu- oder Abnahmen gegenüber der Referenzperiode handelt, nicht berücksichtigt.

In der zweiten Tabelle werden diese Informationen zu einer finalen Beurteilung der Abweichungen verdichtet (Abw. Y, Abw. Saisons). Diese finale Beurteilung erlaubt es in der Gesamtsynthese in Kapitel 2.5, den Grad der Abweichungen aller klimatischen Kenngrössen direkt zu vergleichen. Zusätzlich werden auch die Vorzeichen der Veränderungen berücksichtigt. Es ergibt sich aus dem Zusammenschluss der saisonalen Veränderungen im Kanton und in den Regionen: + bedeutet eine Zunahme der Werte im Vergleich zur Referenz, - eine Abnahme. ± bedeutet, dass die Vorzeichen der Veränderungen pro Saisons in den fünf Regionen nicht übereinstimmen, also kein einheitliches Bild entsteht. Die Stärke der Veränderungen wird mit der Anzahl der Plus- bzw. Minuszeichen beschrieben:

+/-: kleine Zu-/Abnahme            ++/- -: mittlere Zu-/Abnahme  
 +++/ - - -: grosse Zu-/Abnahme    ++++/- - - -: sehr grosse Zu-/Abnahme

### RCP 4.5

Tab. 2.4.17: Gesamtbewertung der Veränderung der Mittleren Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	1	1	1	1	1	1
2055	Saisons	4	6	6	6	4	4
2085	Jahr	2	2	2	2	1	1
2085	Saisons	6	8	9	7	6	7

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.18: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Mittleren Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags unter RCP 4.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>klein</b>	+	<b>klein</b>	+	±	±	++
um 2085	<b>mittel</b>	++	<b>mittel</b>	++	++	++	++

### RCP 8.5

Tab. 2.4.19: Synthese der Veränderung der Mittleren Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	1	3	2	2	2	2
2055	Saisons	7	8	7	7	7	6
2085	Jahr	2	3	3	2	2	2
2085	Saisons	9	10	11	10	8	8

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.20: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Mittleren Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags unter RCP8.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>mittel</b>	++	<b>mittel</b>	++	++	+	++
um 2085	<b>mittel</b>	++	<b>mittel</b>	+++	+++	±	++

### Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigen sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

Abb. 2.8: Mittlere saisonale Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

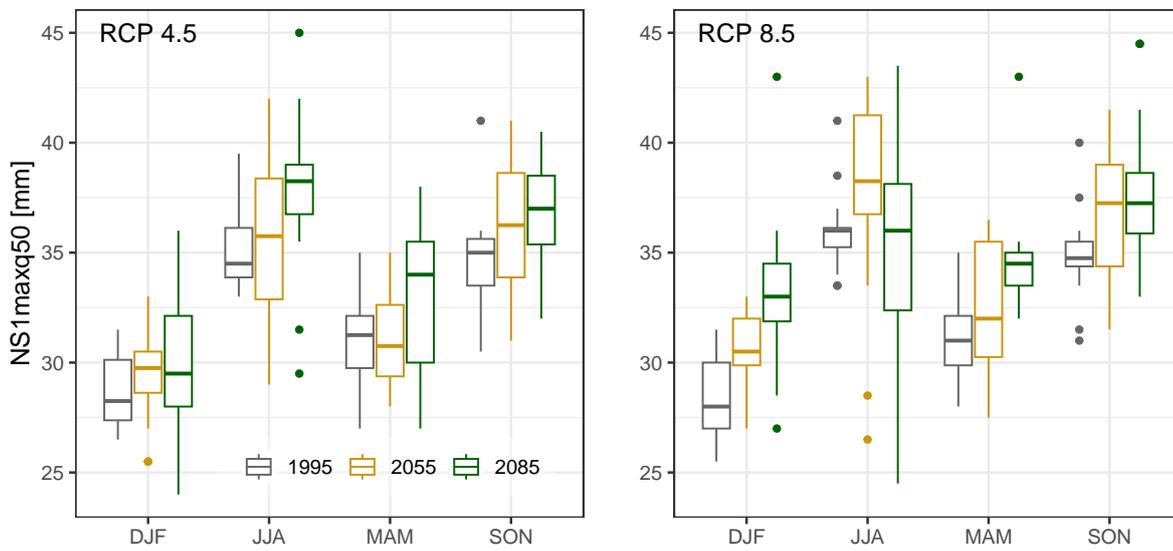
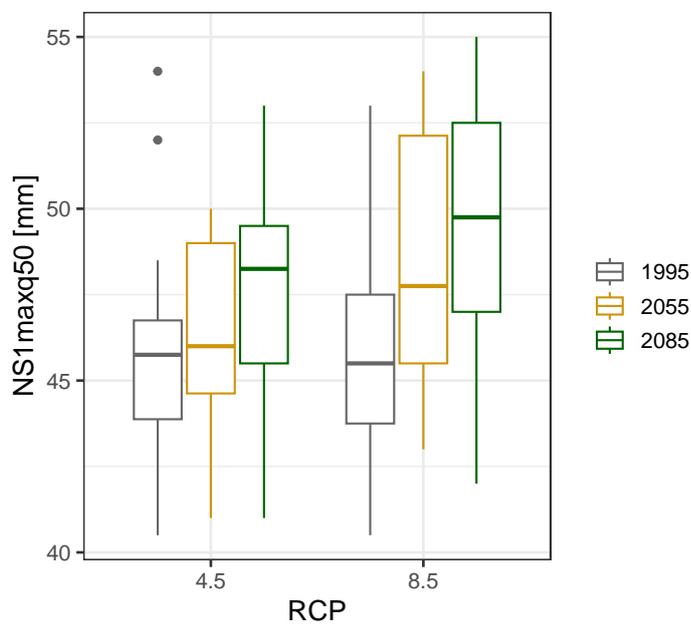


Abb. 2.9: Mittlere jährliche Höchstwerte des Tagesniederschlags im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.



### 2.4.3 Seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags

#### Definition der Kenngrösse

Seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags [mm/d] einer 30-jährigen Periode in der Granularität Jahr und Saison.

Vorgehen: (1) Bestimmung der grössten jährlichen und saisonalen Tagesniederschläge pro Einzeljahr. (2) Aus der Verteilung der dreissig grössten Tagesniederschläge wird jener Wert bestimmt, der in 10 % der Fälle über- und in 90 % der Fälle unterschritten wird.

#### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte RhiresD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden.

Tab. 2.4.21: Seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags [mm/d]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 (RCP 4.5) und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	60	58	56	60	64	72
2	Y	RhiresD	56	58	53	61	62	69
4	Y	$\Delta\%$	8	2	7	-1	3	4
5	DJF	CH2018	42	37	36	37	45	53
6	DJF	RhiresD	39	32	32	33	33	49
8	DJF	$\Delta\%$	7	15	13	11	36	7
9	MAM	CH2018	42	42	41	42	44	51
10	MAM	RhiresD	41	42	43	44	44	46
12	MAM	$\Delta\%$	5	1	-6	-4	0	13
13	JJA	CH2018	54	52	47	55	57	62
14	JJA	RhiresD	50	49	47	49	54	60
16	JJA	$\Delta\%$	7	6	0	11	5	3
17	SON	CH2018	54	50	47	49	56	57
18	SON	RhiresD	49	47	45	49	56	51
20	SON	$\Delta\%$	9	7	5	0	-1	12

Unter **RCP 4.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte RhiresD sehr gut ab. Die grösste Abweichung ist in der Region GraMar erkennbar. Auf saisonaler Basis ist die Modellgüte insgesamt gut. Die nur ausreichende Modellgüte im Winter (DJF) ist dafür verantwortlich, dass man auf saisonaler Basis nicht von einer sehr guten Modellgüte sprechen kann. Aus regionaler Sicht ist die Modellgüte in den Regionen PlaSud und PreAlp weniger gut als in den anderen Regionen. Ungenügend ist die Modellierung der DJF-Werte in der Region PlaNor.

Tab. 2.4.22: Seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags [mm/d]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 (RCP 8.5) und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	60	58	57	59	66	75
2	Y	RhiresD	56	58	53	61	62	69
4	Y	$\Delta\%$	6	1	8	-2	6	8
5	DJF	CH2018	42	37	36	38	43	52
6	DJF	RhiresD	39	32	32	33	33	49
8	DJF	$\Delta\%$	9	16	11	13	30	6
9	MAM	CH2018	43	40	40	42	46	51
10	MAM	RhiresD	41	42	43	44	44	46
12	MAM	$\Delta\%$	5	-3	-8	-4	5	11
13	JJA	CH2018	53	50	47	53	56	62
14	JJA	RhiresD	50	49	47	49	54	60
16	JJA	$\Delta\%$	6	3	-1	7	3	2
17	SON	CH2018	52	49	45	48	53	58
18	SON	RhiresD	49	47	45	49	56	51
20	SON	$\Delta\%$	7	3	0	-4	-5	13

Unter **RCP 8.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte RhiresD insgesamt gut ab. Die Abweichungen zwischen dem Modell- und Referenzwert schwanken zwischen -2 (BasBro) und 8 % (PreAlp). Auch auf saisonaler Basis ist die Modellgüte insgesamt gut. Wie schon bei RCP 4.5 ist die Modellgüte im Winter (DJF) und in den Regionen PlaSud und PreAlp am geringsten. Wiederum ungenügend ist die Modellgüte bei der Kombination Winter und PlaSud.

## Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.23: Relative Veränderung der Seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	1	4	3	1	2	2
DJF	9	4	10	5	9	4
MAM	2	-1	-5	3	-1	7
JJA	4	2	2	1	0	-1
SON	5	7	5	6	5	5

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.24: Relative Veränderung der Seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	9	10	7	8	9	7
DJF	10	13	13	10	10	5
MAM	11	7	10	7	11	7
JJA	7	7	9	6	7	14
SON	5	13	7	7	3	4

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Die Seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags verändern sich auf Jahresbasis kaum. Aus saisonaler Sicht bestehen insgesamt moderate Zunahmen im Winter (DJF) und Herbst (SON). Kaum Veränderungen gegenüber der Referenzperiode sind im Frühling (MAM) und Sommer (JJA) vorhanden.

RCP 8.5: Es besteht eine generelle Zunahme der Seltenen Höchstwerte auf Jahresbasis sowie in den Saisons. Aus Jahressicht ist die Zunahme moderat. Auf saisonaler Ebene schwankt sie zwischen vorwiegend moderaten Zunahmen im Sommer und Herbst und moderaten bis grossen Zunahmen im Winter und Frühling.

## Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.25: Relative Veränderung der Seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	6	3	3	6	4	2
DJF	7	4	7	10	8	6
MAM	7	3	5	9	11	7
JJA	7	-3	7	-1	3	4
SON	-2	6	4	4	-2	4

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.26: Relative Veränderung der Seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	12	13	14	13	7	8
DJF	16	18	26	17	15	11
MAM	16	13	14	15	16	5
JJA	8	7	17	4	5	5
SON	4	15	16	7	4	3

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Aus jährlicher Sicht verändern sich die Seltenen Jahreshöchstwerte mehrheitlich kaum gegenüber der Referenzperiode. Bei den Jahreszeiten entsteht aus der Sicht des Vorzeichens, also ob es sich um Zu- oder Abnahmen handelt, ein relativ klares Bild: Zunahmen im Winter (DJF) und Frühling (MAM), Zu- oder Abnahmen im Sommer (JJA) und Herbst (SON). Die Veränderungen sind mehrheitlich klein bis moderat.

RCP 8.5: In der fernen Zukunft sind alle Veränderungen gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 unter diesem Szenario positiv. Es handelt sich also generell um Zunahmen. Aus jährlicher Sicht sind die Zunahmen gross bis moderat. Saisonal gesehen nehmen die Werte im Winter und Frühling in einem grossen Ausmass, im Sommer und Herbst je nach Region in einem unterschiedlichen Ausmass zu.

## Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt behandelt. Die Ergebnisse werden pro Szenario in zwei Tabellen zusammengefasst, die für sich selbst sprechen sollen.

Die erste Tabelle zeigt den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Es wird zwischen den Abweichungen auf Jahresbasis und – verdichtet zu einem einzigen Wert – auf saisonaler Basis unterschieden. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violettöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode. Bei den in der Tabelle ausgewiesenen Abweichungen sind die Vorzeichen, also ob es sich um Zu- oder Abnahmen gegenüber der Referenzperiode handelt, nicht berücksichtigt.

In der zweiten Tabelle werden diese Informationen zu einer finalen Beurteilung der Abweichungen verdichtet (Abw. Y, Abw. Saisons). Diese finale Beurteilung erlaubt es in der Gesamtsynthese in Kapitel 2.5, den Grad der Abweichungen aller klimatischen Kenngrössen direkt zu vergleichen. Zusätzlich werden auch die Vorzeichen der Veränderungen berücksichtigt. Es ergibt sich aus dem Zusammenschluss der saisonalen Veränderungen im Kanton und in den Regionen: + bedeutet eine Zunahme der Werte im Vergleich zur Referenz, - eine Abnahme. ± bedeutet, dass die Vorzeichen der Veränderungen pro Saisons in den fünf Regionen nicht übereinstimmen, also kein einheitliches Bild entsteht. Die Stärke der Veränderungen wird mit der Anzahl der Plus- bzw. Minuszeichen beschrieben:

+/-: kleine Zu-/Abnahme      ++/- -: mittlere Zu-/Abnahme  
 +++/ - - -: grosse Zu-/Abnahme      ++++/- - - -: sehr grosse Zu-/Abnahme

### RCP 4.5

Tab. 2.4.27: Synthese der Veränderung der Seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	1	1	1	1	1	1
2055	Saisons	6	5	8	6	6	6
2085	Jahr	2	1	1	2	1	1
2085	Saisons	7	5	7	7	7	6

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.28: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags unter RCP 4.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>klein</b>	+	<b>mittel</b>	++	±	±	++
um 2085	<b>klein</b>	+	<b>mittel</b>	++	++	±	±

## RCP 8.5

Tab. 2.4.29: Synthese der Veränderungen der Seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	2	3	2	2	2	2
2055	Saisons	10	10	10	9	9	8
2085	Jahr	3	3	3	3	2	2
2085	Saisons	9	11	13	9	9	8

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.30: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags unter RCP 8.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>mittel</b>	++	<b>mittel</b>	+++	++	+	++
um 2085	<b>gross</b>	+++	<b>mittel</b>	+++	+++	++	++

## Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigen sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

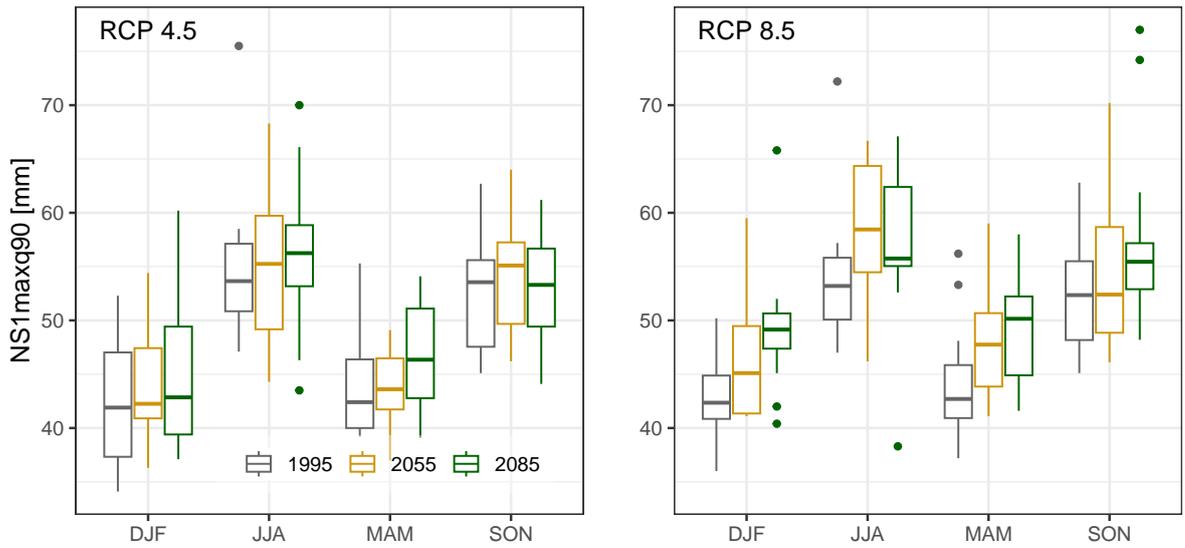


Abb. 2.10: Seltene saisonale Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der 90 %-Quantile von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

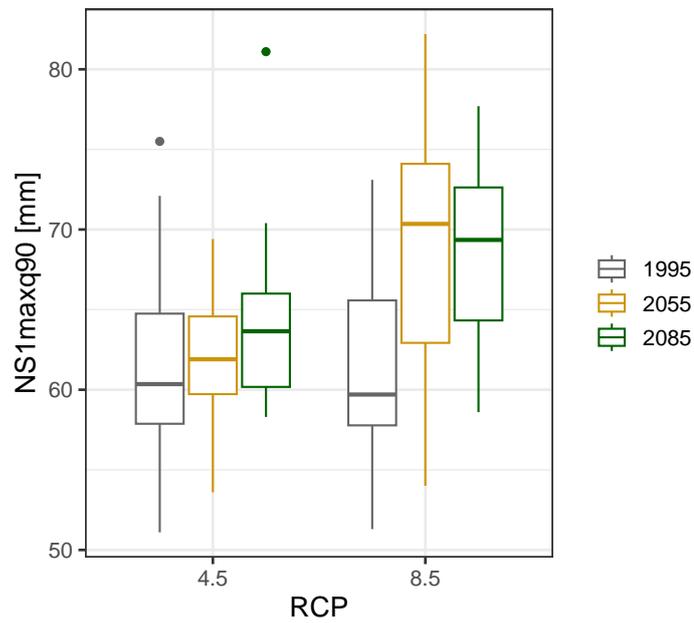


Abb. 2.11: Seltene jährliche Höchstwerte des Tagesniederschlags im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der 90 %-Quantile von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

## 2.4.4 Sehr seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags

### Definition der Kenngrösse

Sehr seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags [mm/d] einer 30-jährigen Periode in der Granularität Jahr und Saison.

Vorgehen: (1) Bestimmung der grössten jährlichen und saisonalen Tagesniederschläge pro Einzeljahr. (2) Aus der Verteilung der dreissig grössten Tagesniederschläge wird jener Wert bestimmt, der in 5 % der Fälle über- und in 95 % der Fälle unterschritten wird.

### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte RhiresD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden.

Tab. 2.4.31: Sehr seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 (RCP 4.5) und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	66	63	61	65	70	76
2	Y	RhiresD	67	65	67	69	72	76
4	Y	$\Delta\%$	-1	-3	-10	-6	-2	0
5	DJF	CH2018	47	43	42	42	49	57
6	DJF	RhiresD	41	33	37	35	41	61
8	DJF	$\Delta\%$	14	32	14	22	20	-7
9	MAM	CH2018	48	47	46	47	50	56
10	MAM	RhiresD	47	52	49	55	52	58
12	MAM	$\Delta\%$	2	-11	-7	-16	-4	-4
13	JJA	CH2018	58	55	55	57	61	67
14	JJA	RhiresD	54	56	49	52	64	72
16	JJA	$\Delta\%$	9	-1	12	10	-4	-7
17	SON	CH2018	58	54	53	55	60	64
18	SON	RhiresD	52	48	49	54	59	55
20	SON	$\Delta\%$	10	13	8	3	3	18

Unter **RCP 4.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte RhiresD sehr gut ab. Die grösste Abweichung ist in der Region GraMar erkennbar. Auf saisonaler Basis ist die Modellgüte nur gerade ausreichend. Dazu tragen vor allem auch die teilweise ungenügende Abbildung der Referenzwerte im Winter in den Regionen BasBro, PlaNor und PlaSud bei.

Tab. 2.4.32: Sehr seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 (RCP 8.5) und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	65	64	61	66	72	80
2	Y	RhiresD	67	65	67	69	72	76
4	Y	$\Delta\%$	-2	-2	-9	-4	0	5
5	DJF	CH2018	46	41	41	40	48	58
6	DJF	RhiresD	41	33	37	35	41	61
8	DJF	$\Delta\%$	11	26	12	15	18	-4
9	MAM	CH2018	48	46	45	47	52	57
10	MAM	RhiresD	47	52	49	55	52	58
12	MAM	$\Delta\%$	3	-12	-8	-15	-1	-2
13	JJA	CH2018	57	55	53	58	62	68
14	JJA	RhiresD	54	56	49	52	64	72
16	JJA	$\Delta\%$	7	-1	8	11	-4	-5
17	SON	CH2018	58	54	53	52	60	63
18	SON	RhiresD	52	48	49	54	59	55
20	SON	$\Delta\%$	10	12	8	-2	2	15

Unter **RCP 8.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte RhiresD auch unter diesem Szenario sehr gut ab. Die grösste Abweichung ist wiederum in der Region GraMar erkennbar. Auf saisonaler Basis ist die Modellgüte insgesamt gut, also besser als unter RCP 4.5. Aber auch hier ist die Modellgüte im Winter schlechter als in den anderen Saisons.

## Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.33: Relative Veränderung der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	1	5	2	6	2	2
DJF	6	-1	3	3	7	3
MAM	-2	1	0	1	-2	7
JJA	2	3	-2	-2	3	5
SON	6	6	2	5	5	5

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.34: Relative Veränderung der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	12	9	6	12	9	8
DJF	8	6	9	12	12	5
MAM	6	7	4	2	5	8
JJA	14	8	8	9	12	8
SON	10	9	8	10	5	8

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Die Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags verändern sich auf Jahresbasis kaum. Die Werte nehmen alle zu. Bei den saisonalen Werten dominieren die kleinen Veränderungen; dabei handelt es sich sowohl um Zu- als auch um Abnahmen gegenüber der Referenzperiode 1981–2010. Einzig im Herbst (SON) sind mehrheitlich moderate Zunahmen erkennbar.

RCP 8.5: Die Veränderungen gegenüber der Referenzperiode unterscheiden sich bei diesem Szenario deutlich vom RCP 4.5: Die Veränderungen – es handelt sich durchwegs um Zunahmen – sind auf Jahresbasis mehrheitlich moderat und in der Region PlaNor sogar gross. Ein ähnliches Bild entsteht auf saisonaler Basis, wo ebenfalls die moderaten Zunahmen dominieren. Die insgesamt kleinsten Zunahmen verzeichnet der Frühling.

## Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.35: Relative Veränderung der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissions-szenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	4	5	3	3	1	13
DJF	4	-1	6	5	5	3
MAM	5	5	5	7	5	3
JJA	8	5	1	3	4	4
SON	6	6	5	5	6	3

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.36: Relative Veränderung der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissions-szenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	12	16	16	10	12	13
DJF	11	17	21	15	11	11
MAM	12	12	11	12	16	15
JJA	15	11	13	7	13	8
SON	8	13	20	12	7	6

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Die Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags nehmen auf Jahresbasis generell zu, wobei die Veränderungen klein bis moderat und nur für PreAlp gross ausfallen. Bei den saisonalen Werten treten nur kleine und moderate Veränderungen gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 auf.

RCP 8.5: Die Veränderungen gegenüber der Referenzperiode unterscheiden sich auch hier deutlich vom RCP 4.5: Die Veränderungen – es handelt sich durchwegs um Zunahmen – sind auf Jahresbasis generell gross. Auf saisonaler Basis dominieren die grossen Zunahmen.

## Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt behandelt. Die Ergebnisse werden pro Szenario in zwei Tabellen zusammengefasst, die für sich selbst sprechen sollen.

Die erste Tabelle zeigt den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Es wird zwischen den Abweichungen auf Jahresbasis und – verdichtet zu einem einzigen Wert – auf saisonaler Basis unterschieden. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violetttöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode. Bei den in der Tabelle ausgewiesenen Abweichungen sind die Vorzeichen, also ob es sich um Zu- oder Abnahmen gegenüber der Referenzperiode handelt, nicht berücksichtigt.

In der zweiten Tabelle werden diese Informationen zu einer finalen Beurteilung der Abweichungen verdichtet (Abw. Y, Abw. Saisons). Diese finale Beurteilung erlaubt es in der Gesamtsynthese in Kapitel 2.5, den Grad der Abweichungen aller klimatischen Kenngrössen direkt zu vergleichen. Zusätzlich werden auch die Vorzeichen der Veränderungen berücksichtigt. Es ergibt sich aus dem Zusammenschluss der saisonalen Veränderungen im Kanton und in den Regionen: + bedeutet eine Zunahme der Werte im Vergleich zur Referenz, - eine Abnahme. ± bedeutet, dass die Vorzeichen der Veränderungen pro Saisons in den fünf Regionen nicht übereinstimmen, also kein einheitliches Bild entsteht. Die Stärke der Veränderungen wird mit der Anzahl der Plus- bzw. Minuszeichen beschrieben:

+/-: kleine Zu-/Abnahme            ++/- -: mittlere Zu-/Abnahme  
 +++/ - - -: grosse Zu-/Abnahme    ++++/- - - -: sehr grosse Zu-/Abnahme

### RCP 4.5

Tab. 2.4.37: Synthese der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	1	2	1	2	1	1
2055	Saisons	6	5	4	5	6	7
2085	Jahr	1	2	1	1	1	3
2085	Saisons	7	7	7	7	7	4

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.38: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags unter RCP 4.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>klein</b>	+	<b>mittel</b>	±	±	±	+
um 2085	<b>mittel</b>	++	<b>mittel</b>	±	++	+	++

## RCP 8.5

Tab. 2.4.39: Synthese der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	3	2	2	3	2	2
2055	Saisons	10	8	7	9	10	8
2085	Jahr	3	3	3	3	3	3
2085	Saisons	11	12	14	11	11	10

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.40: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags unter RCP 8.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>mittel</b>	++	<b>mittel</b>	++	++	++	++
um 2085	<b>gross</b>	+++	<b>gross</b>	+++	+++	+++	+++

## Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigen sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

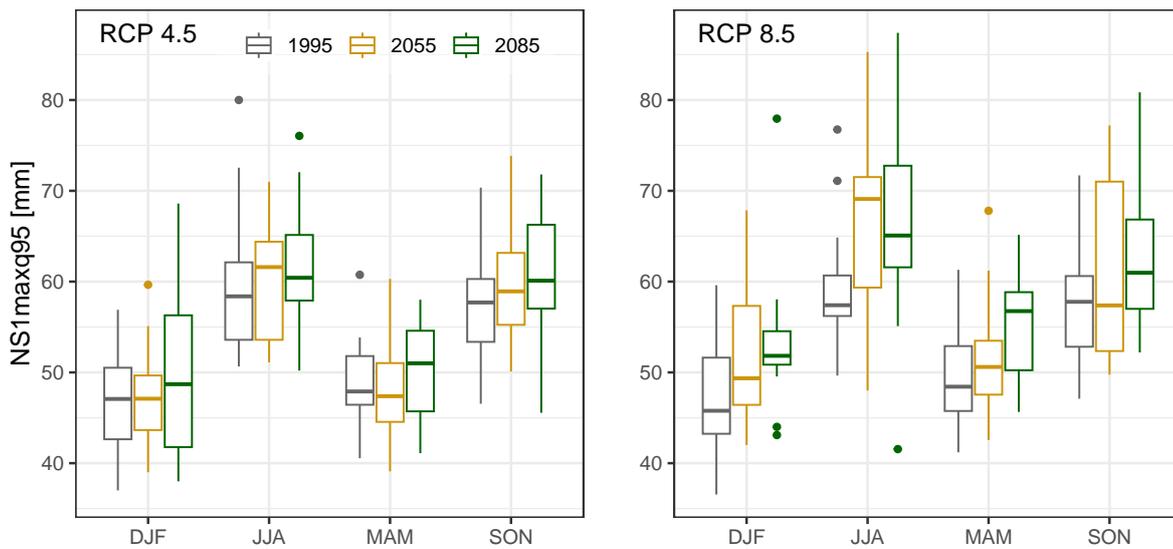


Abb. 2.12: Sehr seltene saisonale Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der 95%-Quantile von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

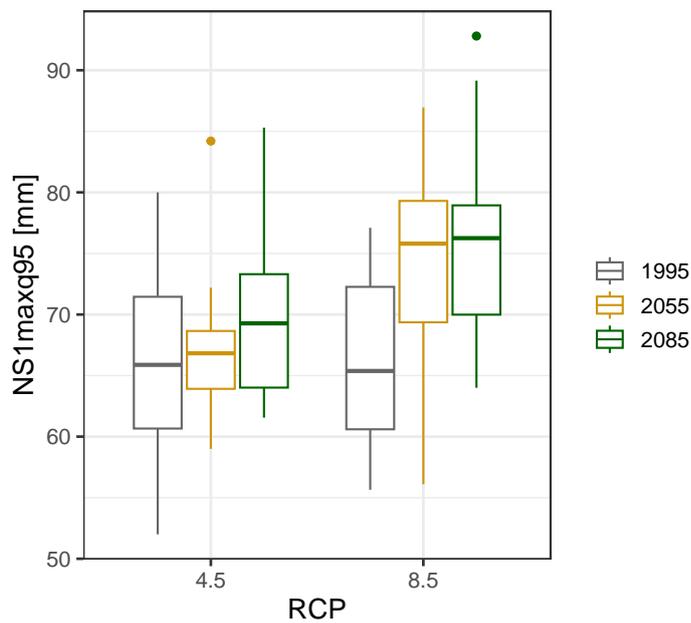


Abb. 2.13: Sehr seltene jährliche Höchstwerte des Tagesniederschlags im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der 95%-Quantile von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

## 2.4.5 Extrem seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags

### Definition der Kenngrösse

Extrem seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags [mm/d] einer 30-jährigen Periode in der Granularität Jahr und Saison.

Vorgehen: (1) Bestimmung der grössten jährlichen und saisonalen Tagesniederschläge pro Einzeljahr. (2) Aus der Verteilung der dreissig grössten Tagesniederschläge wird jener Wert bestimmt, der in 1% der Fälle über- und in 99% der Fälle unterschritten wird.

### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte RhiresD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden.

Tab. 2.4.41: Extrem seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 (RCP 4.5) und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	72	72	70	73	79	89
2	Y	RhiresD	72	73	79	78	74	83
4	Y	$\Delta\%$	-1	-1	-11	-6	7	8
5	DJF	CH2018	55	49	49	48	57	69
6	DJF	RhiresD	47	42	41	41	56	63
8	DJF	$\Delta\%$	18	18	21	19	2	10
9	MAM	CH2018	57	53	51	54	60	64
10	MAM	RhiresD	62	61	56	64	67	68
12	MAM	$\Delta\%$	-8	-12	-8	-15	-9	-5
13	JJA	CH2018	66	64	64	66	69	74
14	JJA	RhiresD	68	65	67	66	74	83
16	JJA	$\Delta\%$	-3	-1	-5	-1	-7	-10
17	SON	CH2018	65	65	62	65	71	77
18	SON	RhiresD	63	67	72	73	60	67
20	SON	$\Delta\%$	4	-4	-14	-12	17	15

Unter **RCP 4.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte RhiresD insgesamt gut ab. Auch saisonal ist die Modellgüte insgesamt gut. Sie schwankt zwischen sehr gut im Sommer (JJA) und ausreichend im Winter (DJF) und Herbst (SON). Regional gesehen werden die Werte in der Regionen BasBro und PlaSud besser abgebildet (Prädikat gut) als in den restlichen Gebieten (Prädikat ausreichend).

Tab. 2.4.42: Extrem seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 (RCP 8.5) und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	73	71	69	73	79	88
2	Y	RhiresD	72	73	79	78	74	83
4	Y	$\Delta\%$	2	-3	-12	-7	7	6
5	DJF	CH2018	55	47	48	47	57	73
6	DJF	RhiresD	47	42	41	41	56	63
8	DJF	$\Delta\%$	19	14	18	17	3	17
9	MAM	CH2018	57	53	50	53	60	65
10	MAM	RhiresD	62	61	56	64	67	68
12	MAM	$\Delta\%$	-8	-13	-10	-16	-10	-4
13	JJA	CH2018	66	68	65	69	74	76
14	JJA	RhiresD	68	65	67	66	74	83
16	JJA	$\Delta\%$	-3	5	-3	3	0	-9
17	SON	CH2018	65	63	61	64	70	77
18	SON	RhiresD	63	67	72	73	60	67
20	SON	$\Delta\%$	4	-6	-15	-13	16	14

Auch unter **RCP 8.5** ist Modellgüte auf jährlicher und saisonaler Basis gut. Auch hier werden die Sommerwerte sehr gut abgebildet. Und auch die regionale Struktur der Modellgüte entspricht jener beim Szenario ICP 4.5

## Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.43: Relative Veränderung der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	7	9	2	3	6	8
DJF	-3	1	0	-1	-3	-3
MAM	-4	0	0	-4	-3	-2
JJA	0	8	1	6	2	6
SON	12	4	4	6	10	5

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.44: Relative Veränderung der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	14	20	5	10	16	19
DJF	12	1	3	7	11	2
MAM	3	1	5	5	7	8
JJA	17	5	6	13	17	18
SON	11	18	7	12	14	9

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Die Extrem seltenen Jahreshöchstwerte nehmen aus jährlicher Sicht im Vergleich zur Referenzperiode in kleinem bis moderatem Ausmass zu. Saisonal gesehen sind die Veränderungen insgesamt klein. Im Winter (DJF) und Frühling (MAM) nehmen die Werte in den Regionen sowohl zu als auch ab. Im Sommer (JJA) und Herbst (SON) treten nur Zunahmen auf.

RCP 8.5: Unter diesem Szenario sind die Zunahmen der jährlichen Werte signifikant grösser als unter RCP 4.5. Die Zunahmen sind meistens gross, in einem Fall sogar sehr gross. Die Werte nehmen in allen Regionen und Saisons im Vergleich zur Referenzperiode 1981–2010 zu, am stärksten im Sommer und Herbst. Aus regionaler Sicht sind grosse Unterschiede zwischen benachbarten Regionen erkennbar. Dieser Umstand weist auf die Problematik hin, extreme Werte zu modellieren.

## Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.45: Relative Veränderung der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	8	15	9	8	6	6
DJF	5	5	9	1	4	6
MAM	4	5	4	4	0	-6
JJA	6	9	8	11	0	11
SON	6	3	-2	9	10	5

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.46: Relative Veränderung der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	23	25	20	15	19	15
DJF	6	16	14	15	8	0
MAM	18	17	8	19	21	15
JJA	17	13	19	14	16	28
SON	7	17	19	8	8	4

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Die Veränderungen der Jahreswerte der Kenngrösse gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 sind positiv und meist moderat. Auf saisonaler Basis besteht ein Mosaik von kleinen bis moderaten Veränderungen, bei denen es sich in den meisten Fällen um Zunahmen handelt. Aus regionaler Sicht sticht die Region BasBro hervor, welche auf Jahresbasis grosse Zunahmen aufweist.

RCP 8.5: Die Veränderungen auf Jahresbasis sind gross bis sogar sehr gross. Es handelt sich also um Zunahmen gegenüber der Referenzperiode. Auch die saisonalen Werte nehmen alle zu. Die Veränderungen sind insgesamt gross. Im Frühling (MAM) und Sommer (JJA) sind sie grösser als in den beiden anderen Saisons. Aus regionaler Sicht sind die Zunahmen der Jahreswerte in den tiefer gelegenen Regionen grösser als in den höher gelegenen.

## Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt behandelt. Die Ergebnisse werden pro Szenario in zwei Tabellen zusammengefasst, die für sich selbst sprechen sollen.

Die erste Tabelle zeigt den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Es wird zwischen den Abweichungen auf Jahresbasis und – verdichtet zu einem einzigen Wert – auf saisonaler Basis unterschieden. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violettöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode. Bei den in der Tabelle ausgewiesenen Abweichungen sind die Vorzeichen, also ob es sich um Zu- oder Abnahmen gegenüber der Referenzperiode handelt, nicht berücksichtigt.

In der zweiten Tabelle werden diese Informationen zu einer finalen Beurteilung der Abweichungen verdichtet (Abw. Y, Abw. Saisons). Diese finale Beurteilung erlaubt es in der Gesamtsynthese in Kapitel 2.5, den Grad der Abweichungen aller klimatischen Kenngrössen direkt zu vergleichen. Zusätzlich werden auch die Vorzeichen der Veränderungen berücksichtigt. Es ergibt sich aus dem Zusammenschluss der saisonalen Veränderungen im Kanton und in den Regionen: + bedeutet eine Zunahme der Werte im Vergleich zur Referenz, - eine Abnahme. ± bedeutet, dass die Vorzeichen der Veränderungen pro Saisons in den fünf Regionen nicht übereinstimmen, also kein einheitliches Bild entsteht. Die Stärke der Veränderungen wird mit der Anzahl der Plus- bzw. Minuszeichen beschrieben:

+/-: kleine Zu-/Abnahme      ++/- -: mittlere Zu-/Abnahme  
 +++/ - - -: grosse Zu-/Abnahme      ++++/- - - -: sehr grosse Zu-/Abnahme

### RCP 4.5

Tab. 2.4.47: Synthese der Veränderungen der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlag basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	2	2	1	1	2	2
2055	Saisons	6	5	4	6	6	6
2085	Jahr	2	3	2	2	2	2
2085	Saisons	7	7	6	7	6	9

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.48: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags unter RCP 4.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>mittel</b>	++	<b>mittel</b>	±	±	+	++
um 2085	<b>mittel</b>	++	<b>mittel</b>	++	±	++	±

## RCP 8.5

Tab. 2.4.49: Synthese der Veränderungen der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	3	4	2	3	3	3
2055	Saisons	10	7	7	10	11	8
2085	Jahr	4	4	4	3	3	3
2085	Saisons	10	12	11	11	11	9

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.50: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags unter RCP 8.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>gross</b>	+++	<b>mittel</b>	++	+	+++	+++
um 2085	<b>sehr gross</b>	++++	<b>gross</b>	++	+++	+++	+++

## Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigen sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

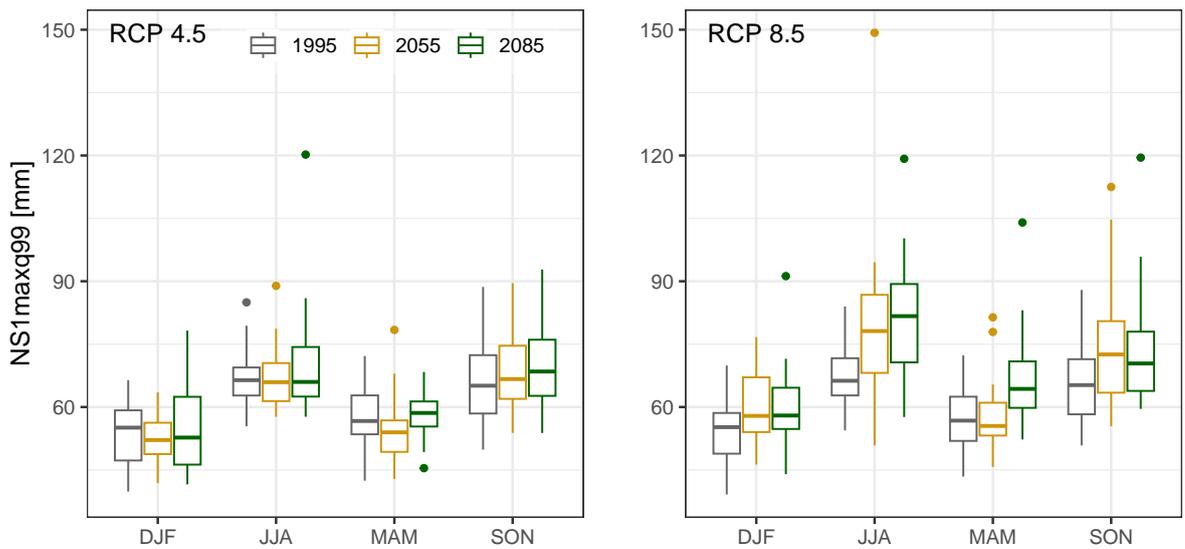


Abb. 2.14: Extrem seltene saisonale Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der 99 %-Quantile von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

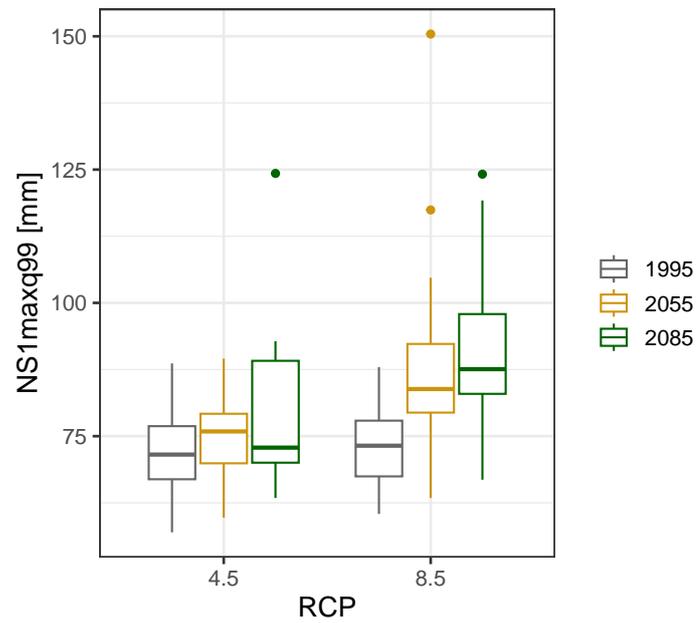


Abb. 2.15: Extrem seltene jährliche Höchstwerte des Tagesniederschlags im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der 99 %-Quantile von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

## 2.4.6 Mittlere Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags

### Definition der Kenngrösse

Mittlere Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags [mm/3d] einer 30-jährigen Periode in der Granularität Jahr und Saison.

Vorgehen: (1) Bestimmung der grössten jährlichen und saisonalen 3-Tagessummen pro Einzeljahr. (2) Mittelung dieser einzeljährlichen Werte zum Periodenmittel.

### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte RhiresD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden.

Tab. 2.4.51: Mittlere Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags [mm/3d]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010 unter RCP 4.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	79	70	68	71	84	98
2	Y	RhiresD	73	70	65	70	78	86
4	Y	$\Delta\%$	8	-1	4	2	8	14
5	DJF	CH2018	53	43	43	43	54	70
6	DJF	RhiresD	47	42	40	39	46	57
8	DJF	$\Delta\%$	14	3	7	12	18	22
9	MAM	CH2018	54	44	43	48	57	65
10	MAM	RhiresD	48	41	41	47	50	61
12	MAM	$\Delta\%$	14	10	3	3	13	7
13	JJA	CH2018	60	50	48	54	64	73
14	JJA	RhiresD	61	50	53	53	61	74
16	JJA	$\Delta\%$	-1	0	-9	3	4	-2
17	SON	CH2018	55	51	49	50	58	68
18	SON	RhiresD	57	55	53	55	62	64
20	SON	$\Delta\%$	-4	-8	-8	-9	-7	6

Unter **RCP 4.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte RhiresD insgesamt gut ab, in den Regionen BasBro, GraMar und PlaNor sogar sehr gut.

Auch auf saisonaler Basis handelt es sich um eine insgesamt gute Modellgüte. Einer nur ausreichenden Modellgüte im Winter (DJF) steht eine sehr gute Modellgüte im Sommer (JJA) gegenüber. Aus regionaler Sicht reicht das Spektrum von einer sehr guten Modellierung in der Region BasBro bis zu guten bis befriedigenden Modellierungen in den Regionen PlaSud und PreAlp.

Tab. 2.4.52: Mittlere Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags [mm/3d]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010 unter RCP 8.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	77	70	66	70	80	98
2	Y	RhiresD	73	70	65	70	78	86
4	Y	$\Delta\%$	6	-1	2	0	4	13
5	DJF	CH2018	53	43	43	43	54	68
6	DJF	RhiresD	47	42	40	39	46	57
8	DJF	$\Delta\%$	14	2	7	12	17	20
9	MAM	CH2018	54	44	43	49	56	66
10	MAM	RhiresD	48	41	41	47	50	61
12	MAM	$\Delta\%$	13	10	4	3	12	8
13	JJA	CH2018	60	50	48	55	64	74
14	JJA	RhiresD	61	50	53	53	61	74
16	JJA	$\Delta\%$	-1	0	-8	4	4	-1
17	SON	CH2018	56	51	49	51	60	70
18	SON	RhiresD	57	55	53	55	62	64
20	SON	$\Delta\%$	-2	-8	-8	-8	-3	8

Unter **RCP 8.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte RhiresD in den Regionen BasBro, GraMar und PlaNor sehr gut, in der Region PreAlp hingegen nur ausreichend.

Auf saisonaler Basis handelt es sich um eine insgesamt gute Modellgüte. Einer nur ausreichenden Modellgüte im Winter (DJF) steht eine sehr gute Modellgüte im Sommer (JJA) gegenüber. Aus regionaler Sicht ist die Modellgüte in den tiefer gelegenen Regionen GraMar, BasBro und PlaNor besser als in den höher gelegenen Regionen PlaSud und PreAlp.

## Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.53: Relative Veränderung der Mittleren Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	-2	0	0	-4	-1	-1
DJF	3	11	9	7	2	2
MAM	-1	0	4	-2	0	2
JJA	-8	2	-3	-4	-5	-7
SON	4	7	5	4	3	3

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.54: Relative Veränderung der Mittleren Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	4	6	8	5	4	-2
DJF	4	8	7	8	5	3
MAM	5	10	10	4	7	2
JJA	2	2	2	2	2	-5
SON	5	6	7	7	6	4

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Die Mittleren Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags verändern sich auf Jahresbasis kaum. Aus saisonaler Sicht nehmen die Werte im Winter (DJF) und Herbst (SON) in unterschiedlichem Ausmass zu. Im Sommer (JJA) nehmen fast alle Werte ab, dies in einem kleinen bis moderaten Ausmass. Im Frühling (MAM) sind die Veränderungen indifferent. Saisonal gesehen nehmen die Werte – mit einer Ausnahme – überall zu. Der Grad der Zunahme variiert allerdings zwischen den Regionen.

RCP 8.5: Die Mittleren Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags verändern sich auf Jahresbasis gegenüber der Referenzperiode mehrheitlich moderat. In der Region PreAlp nehmen die Werte sogar ab. Aus saisonaler Sicht nehmen die Werte – mit einer Ausnahme – alle zu. Der Grad dieser Zunahmen liegt mehrheitlich im kleinen bis moderaten Bereich und variiert zwischen den Regionen. Bei den Jahreswerten ist ein Unterschied zwischen den höher gelegenen Regionen PlaSud, PreAlp und den restlichen Regionen des Kantons zu erkennen.

## Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.55: Relative Veränderung der Mittleren Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	1	2	3	2	2	-1
DJF	-2	8	4	6	-1	-3
MAM	3	3	9	3	4	3
JJA	1	7	3	3	1	1
SON	-2	7	5	0	0	-4

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.56: Relative Veränderung der Mittleren Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	9	12	14	10	7	5
DJF	14	17	16	18	16	8
MAM	8	14	16	11	9	7
JJA	-4	-7	2	-6	-4	-7
SON	2	6	5	3	-1	0

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Die Mittleren Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags verändern sich auf Jahresbasis gegenüber der Referenzperiode kaum. Aus saisonaler Sicht bestehen insgesamt nur kleine Veränderungen. Im Frühling (MAM) und Sommer (JJA) nehmen alle Werte zu.

RCP 8.5: Dieses Szenario zeichnet ein deutlich anders Bild als das Szenario RCP 4.5. Die Mittleren Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags nehmen in moderatem bis grossem Ausmass zu, insbesondere in den tiefer gelegenen Regionen GraMar, BasBro und PlaNor. Aus saisonaler Sicht fällt der Gegensatz zwischen Winter (DJF)/Frühling (MAM) mit mehrheitlich grossen Zunahmen und Sommer (JJA) mit mehrheitlich kleinen bis moderaten Abnahmen auf. Im Herbst (SON) ergeben sich sowohl Zu- als auch Abnahmen.

## Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt behandelt. Die Ergebnisse werden pro Szenario in zwei Tabellen zusammengefasst, die für sich selbst sprechen sollen.

Die erste Tabelle zeigt den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Es wird zwischen den Abweichungen auf Jahresbasis und – verdichtet zu einem einzigen Wert – auf saisonaler Basis unterschieden. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violetttöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode. Bei den in der Tabelle ausgewiesenen Abweichungen sind die Vorzeichen, also ob es sich um Zu- oder Abnahmen gegenüber der Referenzperiode handelt, nicht berücksichtigt.

In der zweiten Tabelle werden diese Informationen zu einer finalen Beurteilung der Abweichungen verdichtet (Abw. Y, Abw. Saisons). Diese finale Beurteilung erlaubt es in der Gesamtsynthese in Kapitel 2.5, den Grad der Abweichungen aller klimatischen Kenngrössen direkt zu vergleichen. Zusätzlich werden auch die Vorzeichen der Veränderungen berücksichtigt. Es ergibt sich aus dem Zusammenschluss der saisonalen Veränderungen im Kanton und in den Regionen: + bedeutet eine Zunahme der Werte im Vergleich zur Referenz, - eine Abnahme. ± bedeutet, dass die Vorzeichen der Veränderungen pro Saisons in den fünf Regionen nicht übereinstimmen, also kein einheitliches Bild entsteht. Die Stärke der Veränderungen wird mit der Anzahl der Plus- bzw. Minuszeichen beschrieben:

+/-: kleine Zu-/Abnahme            ++/- -: mittlere Zu-/Abnahme  
 +++/ - - -: grosse Zu-/Abnahme    ++++/- - - -: sehr grosse Zu-/Abnahme

### RCP 4.5

Tab. 2.4.57: Synthese der Veränderungen der Mittleren Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	1	1	1	1	1	1
2055	Saisons	5	7	6	5	5	5
2085	Jahr	1	1	1	1	1	1
2085	Saisons	4	7	6	5	4	4

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.58: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Mittleren Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags unter RCP4.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>klein</b>	±	<b>mittel</b>	++	±	±	+
um 2085	<b>klein</b>	±	<b>mittel</b>	±	+	+	±

## RCP 8.5

Tab. 2.4.59: Synthese der Veränderungen der Mittleren Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	1	2	2	2	1	1
2055	Saisons	6	8	8	6	7	5
2085	Jahr	2	3	3	3	2	2
2085	Saisons	7	10	9	9	7	7

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.60: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Mittleren Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags unter RCP 8.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>mittel</b>	±	<b>mittel</b>	++	++	±	++
um 2085	<b>mittel</b>	++	<b>mittel</b>	+++	+++	±	±

## Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigen sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

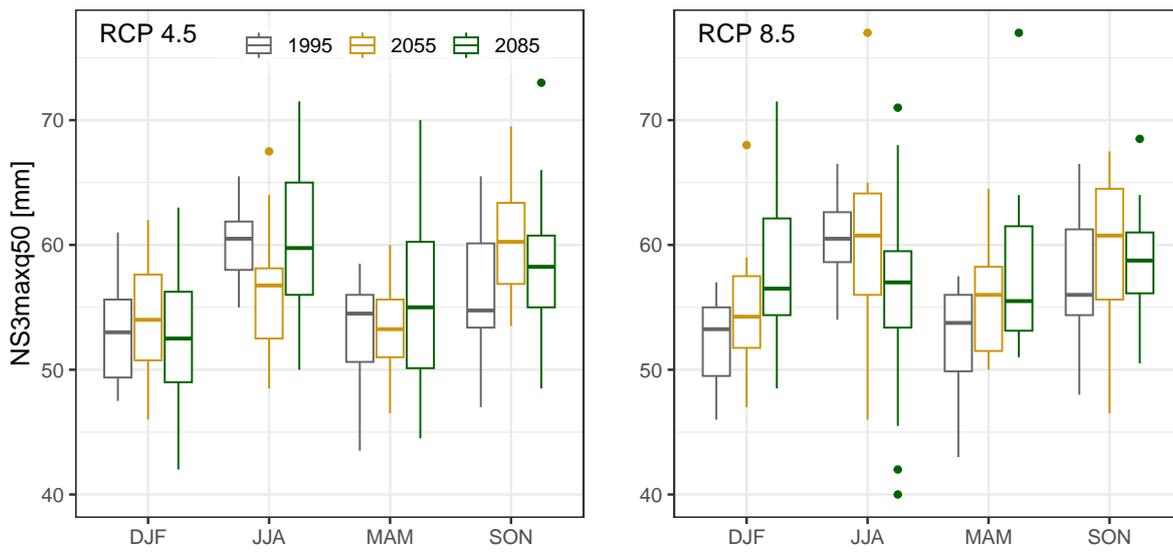


Abb. 2.16: Mittlere saisonale Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

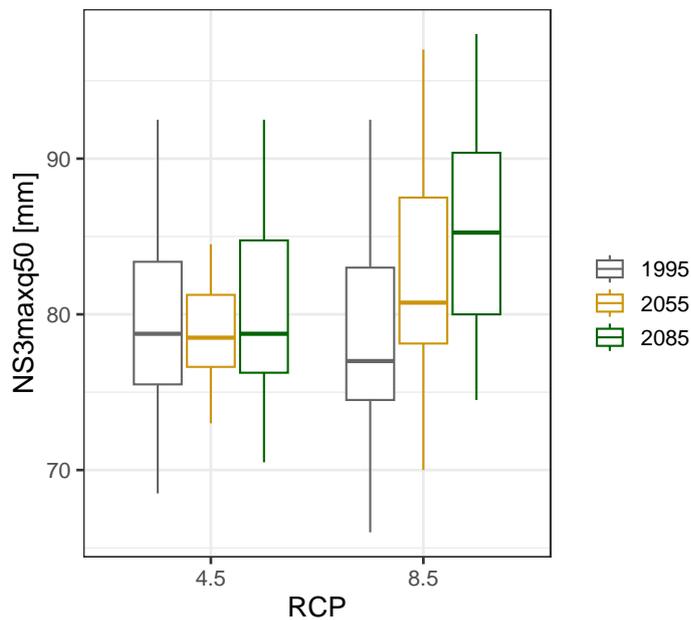


Abb. 2.17: Mittlere jährliche Höchstwerte des 3-Tagesniederschlags im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

## 2.4.7 Seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags

### Definition der Kenngrösse

Seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags [mm/3d] einer 30-jährigen Periode in der Granularität Jahr und Saison.

Vorgehen: (1) Bestimmung der grössten jährlichen und saisonalen 3-Tagessummen pro Einzeljahr. (2) Aus der Verteilung dieser dreissig grössten 3-Tagesniederschläge wird jener Wert bestimmt, der in 10 % der Fälle über- und in 90 % der Fälle unterschritten wird.

### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte RhiresD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden.

Tab. 2.4.61: Seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags [mm/3d]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010 unter RCP 4.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	105	95	90	99	111	130
2	Y	RhiresD	93	88	83	95	99	118
4	Y	$\Delta\%$	13	8	9	5	12	10
5	DJF	CH2018	77	66	64	67	79	103
6	DJF	RhiresD	64	55	59	54	63	84
8	DJF	$\Delta\%$	20	19	8	22	25	23
9	MAM	CH2018	77	67	67	69	83	94
10	MAM	RhiresD	79	83	77	79	82	82
12	MAM	$\Delta\%$	-2	-19	-13	-12	1	15
13	JJA	CH2018	92	79	75	87	96	110
14	JJA	RhiresD	85	67	74	76	90	101
16	JJA	$\Delta\%$	9	18	2	14	7	8
17	SON	CH2018	84	84	78	78	88	101
18	SON	RhiresD	80	80	68	80	85	84
20	SON	$\Delta\%$	4	5	15	-2	4	20

Unter **RCP 4.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte RhiresD insgesamt gut. Auf saisonaler Basis liegt die Modellgüte nur gerade ausreichend. Am schlechtesten werden die Beobachtungen im Winter (DJF) abgebildet. Aus regionaler Sicht ist die Modellgüte in allen Regionen ausser PlaSud (gut) nur ausreichend.

Tab. 2.4.62: Seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags [mm/3d]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010 unter RCP 8.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	106	98	89	101	112	128
2	Y	RhiresD	93	88	83	95	99	118
4	Y	$\Delta\%$	14	11	8	6	13	8
5	DJF	CH2018	75	65	62	61	77	105
6	DJF	RhiresD	64	55	59	54	63	84
8	DJF	$\Delta\%$	17	18	5	13	22	26
9	MAM	CH2018	77	67	64	68	81	95
10	MAM	RhiresD	79	83	77	79	82	82
12	MAM	$\Delta\%$	-3	-18	-17	-13	-1	16
13	JJA	CH2018	92	80	75	88	97	110
14	JJA	RhiresD	85	67	74	76	90	101
16	JJA	$\Delta\%$	8	19	2	16	7	9
17	SON	CH2018	83	83	81	78	92	102
18	SON	RhiresD	80	80	68	80	85	84
20	SON	$\Delta\%$	4	4	18	-2	8	21

Unter **RCP 8.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte RhiresD insgesamt gut ab. In den Regionen BasBro und PlaSud ist die Güte nur ausreichend. Auf saisonaler Basis ist die Modellgüte ebenfalls nur ausreichend. Nur im Herbst (SON) ist sie gut. Zudem können auch die Werte der Regionen allesamt nur ausreichend modelliert werden.

## Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.63: Relative Veränderung der Seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	8	5	7	5	7	3
DJF	2	9	6	1	1	2
MAM	3	1	-6	1	4	10
JJA	-2	-1	-1	-3	0	-3
SON	3	4	4	3	0	3

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.64: Relative Veränderung der Seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	12	13	11	9	7	7
DJF	11	17	16	15	12	6
MAM	4	10	5	13	9	-2
JJA	3	8	8	6	4	3
SON	4	14	6	6	2	1

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Die Seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags nehmen im Vergleich zur Referenzperiode 1981–2010 auf Jahresbasis mit Ausnahme der Region PreAlp (geringe Zunahme) moderat zu. Aus saisonaler Sicht sind die Veränderungen mehrheitlich klein.

RCP 8.5: Die Jahreswerte der Seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags verzeichnen eine moderate bis grosse Zunahme. Es besteht ein Unterschied zwischen den tiefer gelegenen und den höher gelegenen Regionen. Wie die Jahreswerte nehmen auch die saisonalen Werte gegenüber der Referenzperiode alle zu, wobei die Zunahmen im Winter (DJF) und Frühling (MAM) grösser sind als im Sommer (JJA) und Herbst (SON). Auch bei den saisonalen Werten sind die Veränderungen in den höher gelegenen Regionen kleiner als in den tiefer gelegenen.

## Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.65: Relative Veränderung der Seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	11	12	11	14	7	4
DJF	7	1	1	-1	4	1
MAM	6	3	8	15	5	2
JJA	-3	-2	4	1	-4	8
SON	3	4	0	2	1	0

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.66: Relative Veränderung der Seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	10	18	17	10	12	6
DJF	12	24	25	18	13	1
MAM	15	19	14	24	16	4
JJA	3	4	15	0	2	-5
SON	11	5	13	8	10	5

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Die Veränderungen – sprich Zunahmen der Seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags – sind auf Jahresbasis in den tieferen Lagen gross und in den höheren Lagen (PlaSud, PreAlp) moderat bis klein. Aus saisonaler Sicht besteht ein Raum-Zeit-Mosaik aus meist kleinen, wenigen moderaten und einer grossen Zunahme.

RCP 8.5: Die Zunahme der Jahreswerte der Seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags ist mehrheitlich gross. PreAlp weist als einzige Region «nur» eine moderate Zunahme auf. Saisonal sind nun – im Gegensatz zum Szenario RCP 4.5 – deutlichere Raum-Zeit-Strukturen erkennbar: Kleine bis sehr grosse Zunahmen im Winter (DJF) und Frühling (MAM), kleine bis grossen Zunahmen im Herbst (SON) und ein uneinheitliches Bild im Sommer. Aus regionaler Sicht fällt die Region PreAlp mit ihren kleinen Veränderungen auf.

## Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt behandelt. Die Ergebnisse werden pro Szenario in zwei Tabellen zusammengefasst, die für sich selbst sprechen sollen.

Die erste Tabelle zeigt den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Es wird zwischen den Abweichungen auf Jahresbasis und – verdichtet zu einem einzigen Wert – auf saisonaler Basis unterschieden. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violettöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode. Bei den in der Tabelle ausgewiesenen Abweichungen sind die Vorzeichen, also ob es sich um Zu- oder Abnahmen gegenüber der Referenzperiode handelt, nicht berücksichtigt.

In der zweiten Tabelle werden diese Informationen zu einer finalen Beurteilung der Abweichungen verdichtet (Abw. Y, Abw. Saisons). Diese finale Beurteilung erlaubt es in der Gesamtsynthese in Kapitel 2.5, den Grad der Abweichungen aller klimatischen Kenngrössen direkt zu vergleichen. Zusätzlich werden auch die Vorzeichen der Veränderungen berücksichtigt. Es ergibt sich aus dem Zusammenschluss der saisonalen Veränderungen im Kanton und in den Regionen: + bedeutet eine Zunahme der Werte im Vergleich zur Referenz, - eine Abnahme. ± bedeutet, dass die Vorzeichen der Veränderungen pro Saisons in den fünf Regionen nicht übereinstimmen, also kein einheitliches Bild entsteht. Die Stärke der Veränderungen wird mit der Anzahl der Plus- bzw. Minuszeichen beschrieben:

+/-: kleine Zu-/Abnahme                      ++/- -: mittlere Zu-/Abnahme  
 +++/ - - -: grosse Zu-/Abnahme            ++++/- - - -: sehr grosse Zu-/Abnahme

### RCP 4.5

Tab. 2.4.67: Synthese der Veränderungen der Seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	2	2	2	2	2	1
2055	Saisons	4	5	6	4	4	6
2085	Jahr	3	3	3	3	2	1
2085	Saisons	6	4	5	6	5	5

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.68: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags unter RCP4.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>mittel</b>	++	<b>klein</b>	+	±	-	+
um 2085	<b>mittel</b>	++	<b>klein</b>	±	++	±	+

## RCP 8.5

Tab. 2.4.69: Synthese der Veränderungen der Seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	3	3	3	2	2	2
2055	Saisons	6	11	9	10	7	5
2085	Jahr	3	3	3	3	3	2
2085	Saisons	10	10	13	10	10	6

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.70: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags unter RCP 8.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>mittel</b>	++	<b>mittel</b>	+++	±	++	++
um 2085	<b>gross</b>	+++	<b>gross</b>	+++	+++	±	++

## Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigen sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

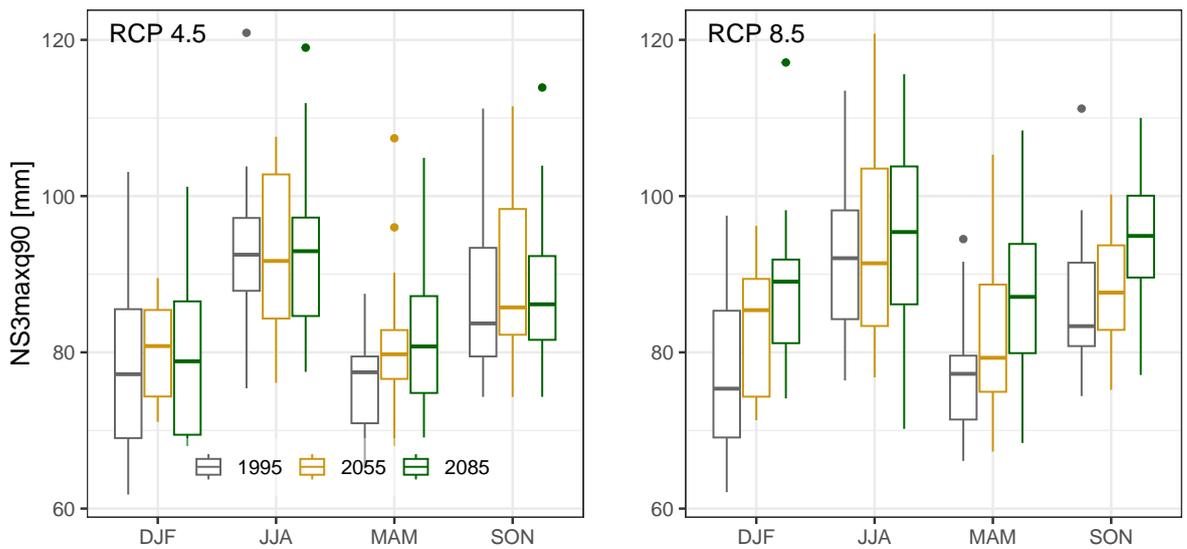


Abb. 2.18: Seltene saisonale Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der 90 %-Quantile von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

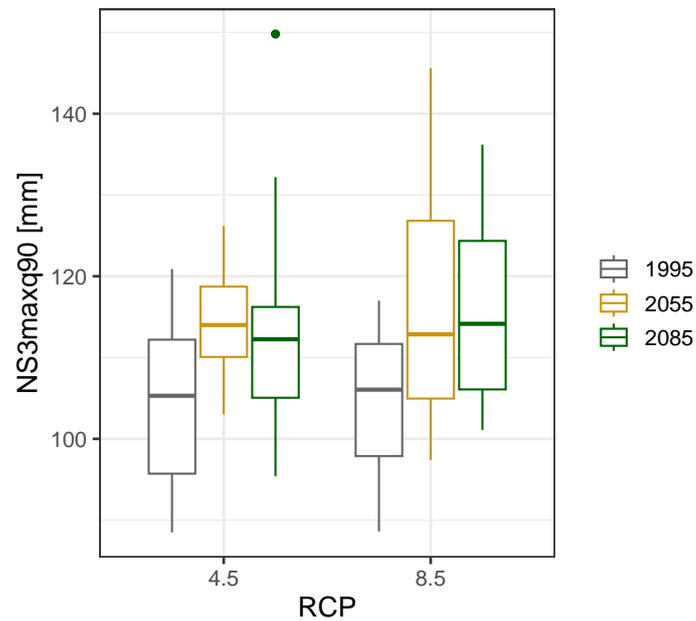


Abb. 2.19: Seltene jährliche Höchstwerte des 3-Tagesniederschlags im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der 90 %-Quantile von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

## 2.4.8 Sehr seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags

### Definition der Kenngrösse

Sehr seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags [mm/3d] einer 30-jährigen Periode in der Granularität Jahr und Saison.

Vorgehen: (1) Bestimmung der grössten jährlichen und saisonalen 3-Tagessummen pro Einzeljahr. (2) Aus der Verteilung dieser dreissig grössten 3-Tagesniederschläge wird jener Wert bestimmt, der in 5 % der Fälle über- und in 95 % der Fälle unterschritten wird.

### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte RhiresD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden.

Tab. 2.4.71: Sehr seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags [mm/3d]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010 unter RCP 4.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	113	101	99	105	119	140
2	Y	RhiresD	97	96	100	106	104	124
4	Y	$\Delta\%$	17	4	-2	0	14	13
5	DJF	CH2018	88	71	70	72	91	114
6	DJF	RhiresD	75	62	63	59	76	97
8	DJF	$\Delta\%$	18	14	11	22	20	18
9	MAM	CH2018	86	76	72	82	91	104
10	MAM	RhiresD	85	85	80	90	85	99
12	MAM	$\Delta\%$	1	-11	-10	-8	6	5
13	JJA	CH2018	102	88	84	99	105	117
14	JJA	RhiresD	90	79	76	87	100	116
16	JJA	$\Delta\%$	13	11	10	14	5	1
17	SON	CH2018	94	91	84	88	100	117
18	SON	RhiresD	87	85	81	88	87	91
20	SON	$\Delta\%$	9	8	3	0	15	29

Unter **RCP 4.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte RhiresD insgesamt gut ab. Die Modellgüte ergibt ein regionales Muster mit sehr guten Modellierungen in den tief gelegenen Regionen BasBros bis PlaNor und nur ausreichenden Modellierungen in den höher gelegenen Regionen des Kantons Freiburg. Auf saisonaler Basis ist die Modellgüte nur ausreichend. Vor allem die Winterwerte (DJF) werden nur knapp ausreichend abgebildet. Aus regionaler Sicht werden die Regionen PlaSud und PreAlp weniger gut als die anderen Regionen erfasst.

Tab. 2.4.72: Sehr seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags [mm/3d]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010 unter RCP 8.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	114	103	99	108	119	144
2	Y	RhiresD	97	96	100	106	104	124
4	Y	$\Delta\%$	18	7	-1	2	15	16
5	DJF	CH2018	88	72	75	71	90	113
6	DJF	RhiresD	75	62	63	59	76	97
8	DJF	$\Delta\%$	18	15	18	20	19	17
9	MAM	CH2018	87	79	75	83	91	107
10	MAM	RhiresD	85	85	80	90	85	99
12	MAM	$\Delta\%$	3	-8	-7	-8	7	9
13	JJA	CH2018	103	90	84	100	109	120
14	JJA	RhiresD	90	79	76	87	100	116
16	JJA	$\Delta\%$	14	14	12	15	9	3
17	SON	CH2018	97	93	84	87	102	115
18	SON	RhiresD	87	85	81	88	87	91
20	SON	$\Delta\%$	12	9	4	-2	18	27

Unter **RCP 8.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte RhiresD wie bei RCP 4.5 gut ab. Die grösste Abweichung bestehen wiederum in den Regionen PlaNor und PreAlp. Auf saisonaler Basis ist die Modellgüte insgesamt ausreichend. Nur gerade die Werte im Frühling (MAM) konnten gut abgebildet werden. Aus regionaler Sicht sind die Unterschiede bei dieser Kenngrösse weniger gross als bei anderen Kenngrössen.

## Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.73: Relative Veränderung der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	12	10	12	15	13	6
DJF	10	13	13	4	9	7
MAM	3	2	1	0	2	9
JJA	4	4	-1	0	2	4
SON	4	7	8	5	4	0

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.74: Relative Veränderung der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	11	11	11	9	9	5
DJF	13	8	10	14	11	8
MAM	4	6	3	1	2	4
JJA	4	2	11	2	3	2
SON	8	11	5	7	10	6

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Die Veränderungen – alles Zunahmen – der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 sind auf Jahresbasis insgesamt gross. Eine Ausnahme bildet die der Region PreAlp mit moderaten Zunahmen. Aus saisonaler Sicht nehmen die Werte mit einer einzigen Ausnahme alle zu. Deutlich erkennbar sind im Winter (DJF) die grossen Zunahmen in den tief gelegenen Regionen BasBro und GraMar und die kleinen bis moderaten Zunahmen in den restlichen höher gelegenen Regionen. Im Frühling (MAM) und Herbst (SON) sind die Zunahmen klein bis moderat. Im Sommer (JJA) erkennt man die kleinsten Abweichungen von den Werten der Referenzperiode.

RCP 8.5: Die Zunahme der Jahreswerte der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags sind mittel bis gross. Wiederum ist eine Unterteilung des Kantons in Regionen grossen Zunahmen gegenüber der Referenz (BasBro, GraMar) und solchen mit einer moderaten Zunahme erkennbar. Die saisonalen Werte nehmen alle zu. Die Zunahmen sind im Winter und Herbst am grössten.

## Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.75: Relative Veränderung der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	8	12	11	5	4	6
DJF	9	0	1	3	6	1
MAM	6	5	7	2	6	-2
JJA	2	4	11	-3	5	14
SON	9	9	10	7	8	8

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.76: Relative Veränderung der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	15	21	16	14	13	7
DJF	10	19	12	10	12	6
MAM	17	19	19	22	15	9
JJA	1	1	11	0	3	-1
SON	12	15	19	12	10	9

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Die Jahreswerte dieser Kenngrösse nehmen alle zu. Die Zunahme ist in den tieferen Lagen grösser als in den Hochlagen des Kantons. Aus saisonaler Sicht nehmen alle Werte im Winter (DJF) und Herbst (SON) zu. Im Frühling (MAM) und Sommer (JJA) ist das Signal uneinheitlich, wobei auch hier die Zunahmen dominieren.

RCP 8.5: Die Zunahme der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags ist auf Jahresbasis gross bis sehr gross (Ausnahme PreAlp: moderat). In allen Jahreszeiten dominieren die Zunahmen, die im Winter, Frühling und Herbst gross ausfallen. Deutlich hebt sich davon der Sommer ab mit meist kleinen Veränderungen gegenüber der Referenzperiode. Aus regionaler Sicht fällt die Region PreAlp, also die höchstgelegene Region des Kantons Freiburg, mit den «nur» moderaten und einer kleinen Veränderung auf.

## Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt behandelt. Die Ergebnisse werden pro Szenario in zwei Tabellen zusammengefasst, die für sich selbst sprechen sollen.

Die erste Tabelle zeigt den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Es wird zwischen den Abweichungen auf Jahresbasis und – verdichtet zu einem einzigen Wert – auf saisonaler Basis unterschieden. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violetttöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode. Bei den in der Tabelle ausgewiesenen Abweichungen sind die Vorzeichen, also ob es sich um Zu- oder Abnahmen gegenüber der Referenzperiode handelt, nicht berücksichtigt.

In der zweiten Tabelle werden diese Informationen zu einer finalen Beurteilung der Abweichungen verdichtet (Abw. Y, Abw. Saisons). Diese finale Beurteilung erlaubt es in der Gesamtsynthese in Kapitel 2.5, den Grad der Abweichungen aller klimatischen Kenngrössen direkt zu vergleichen. Zusätzlich werden auch die Vorzeichen der Veränderungen berücksichtigt. Es ergibt sich aus dem Zusammenschluss der saisonalen Veränderungen im Kanton und in den Regionen: + bedeutet eine Zunahme der Werte im Vergleich zur Referenz, - eine Abnahme. ± bedeutet, dass die Vorzeichen der Veränderungen pro Saisons in den fünf Regionen nicht übereinstimmen, also kein einheitliches Bild entsteht. Die Stärke der Veränderungen wird mit der Anzahl der Plus- bzw. Minuszeichen beschrieben:

+/-: kleine Zu-/Abnahme            ++/- -: mittlere Zu-/Abnahme  
 +++/ - - -: grosse Zu-/Abnahme    ++++/- - - -: sehr grosse Zu-/Abnahme

### RCP 4.5

Tab. 2.4.77: Synthese der Veränderungen der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	3	3	3	3	3	2
2055	Saisons	6	7	7	5	5	6
2085	Jahr	2	3	3	2	1	2
2085	Saisons	7	6	9	5	8	7

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.78: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags unter RCP 4.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>gross</b>	+++	<b>mittel</b>	+++	+	±	++
um 2085	<b>mittel</b>	++	<b>mittel</b>	+	±	±	++

### RCP 8.5

Tab. 2.4.79: Synthese der Veränderungen der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	3	3	3	2	2	2
2055	Saisons	7	8	9	7	8	6
2085	Jahr	3	4	3	3	3	2
2085	Saisons	10	10	12	11	10	7

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.80: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags unter RCP 8.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>mittel</b>	++	<b>mittel</b>	+++	+	+	++
um 2085	<b>gross</b>	+++	<b>gross</b>	+++	+++	±	+++

### Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigen sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

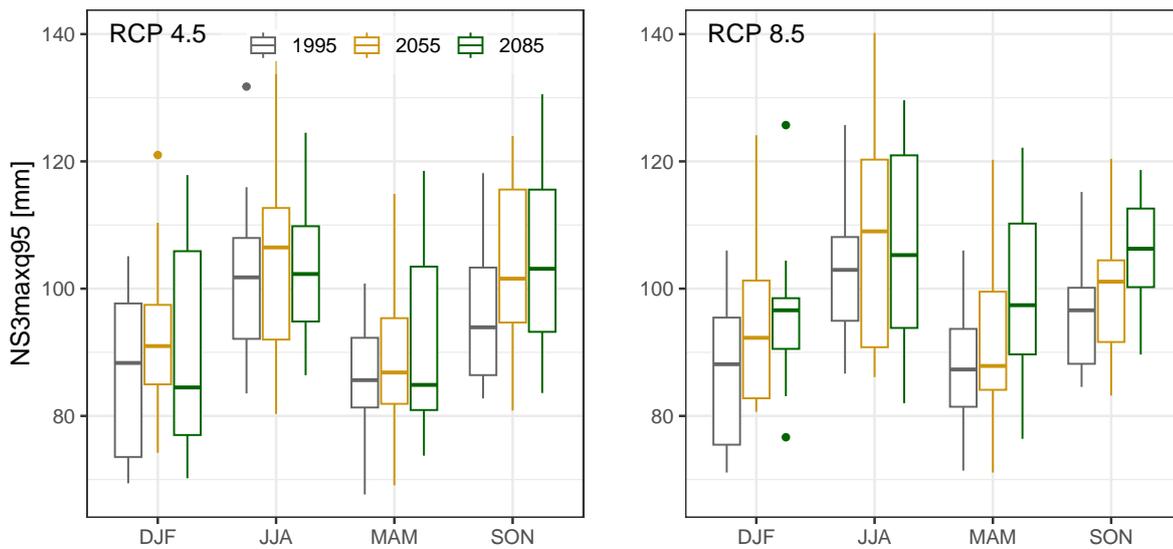


Abb. 2.20: Sehr seltene saisonale Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der 95 %-Quantile von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

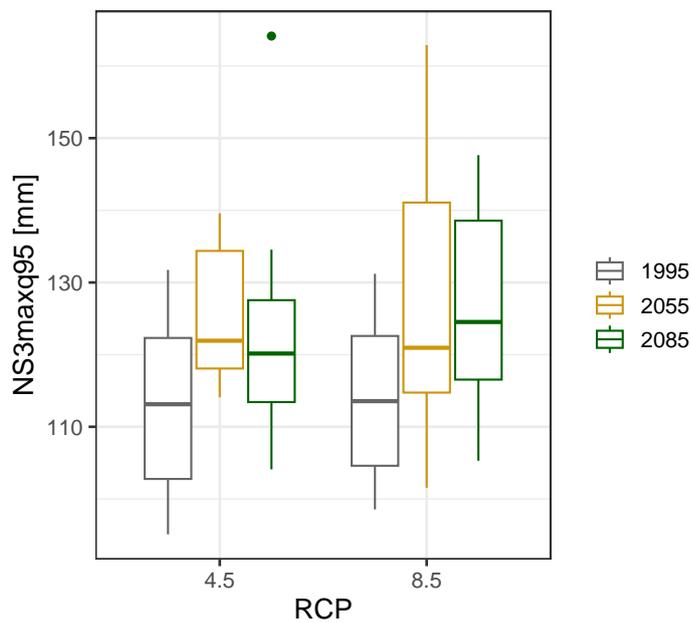


Abb. 2.21: Sehr seltene jährliche Höchstwerte des 3-Tagesniederschlags im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der 95 %-Quantile von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

#### **2.4.9 Extrem seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags**

##### **Definition der Kenngrösse**

Extrem seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags [mm/3d] einer 30-jährigen Periode in der Granularität Jahr und Saison.

Vorgehen: (1) Bestimmung der grössten jährlichen und saisonalen 3-Tagessummen pro Einzeljahr. (2) Aus der Verteilung dieser dreissig grössten 3-Tagesniederschläge wird jener Wert bestimmt, der in 1 % der Fälle über- und in 99 % der Fälle unterschritten wird.

##### **Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte**

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte RhiresD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden.

Tab. 2.4.81: Extrem seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags [mm/3d]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010 unter RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	CH2018	132	111	106	119	140	161
Y	RhiresD	109	111	145	119	114	140
Y	$\Delta$	23	-1	-39	0	26	22
Y	$\Delta\%$	21	-1	-27	0	22	16
DJF	CH2018	96	77	77	77	98	131
DJF	RhiresD	81	69	71	67	86	116
DJF	$\Delta$	15	8	6	10	12	16
DJF	$\Delta\%$	19	12	9	15	14	14
MAM	CH2018	94	87	85	97	99	123
MAM	RhiresD	95	88	82	95	101	109
MAM	$\Delta$	-2	-1	4	2	-2	15
MAM	$\Delta\%$	-2	-1	4	2	-2	14
JJA	CH2018	117	105	99	114	127	140
JJA	RhiresD	108	99	100	107	112	140
JJA	$\Delta$	9	6	-1	7	14	0
JJA	$\Delta\%$	9	6	-1	6	13	0
SON	CH2018	107	98	93	97	114	137
SON	RhiresD	92	106	140	113	89	110
SON	$\Delta$	15	-8	-47	-16	25	27
SON	$\Delta\%$	16	-8	-34	-14	29	24

Unter **RCP 4.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte RhiresD insgesamt nur ausreichend ab. In den Regionen GarMar und PlaSud ist die Modellgüte sogar ungenügend. Auch auf saisonaler Basis ist Modellgüte insgesamt nur ausreichend. Die Unterschiede sind aber gewaltig mit einer sehr guten Modellierung im Frühling (MAM), guten Modellierungen im Winter (DJF) und Sommer (JJA) sowie einer ungenügenden Modellierung im Herbst (SON). Regional liegt die Modellgüte zwischen gut (PlaNor und BasBro) und ausreichend.

Tab. 2.4.82: Extrem seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags [mm/3d]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010 unter RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	CH2018	134	112	111	125	140	164
Y	RhiresD	109	111	145	119	114	140
Y	$\Delta$	24	1	-34	6	26	25
Y	$\Delta\%$	22	1	-24	5	23	18
DJF	CH2018	103	80	82	79	111	135
DJF	RhiresD	81	69	71	67	86	116
DJF	$\Delta$	22	11	11	12	26	20
DJF	$\Delta\%$	27	16	16	18	30	17
MAM	CH2018	103	90	87	98	108	124
MAM	RhiresD	95	88	82	95	101	109
MAM	$\Delta$	8	2	5	2	7	16
MAM	$\Delta\%$	8	3	6	2	7	14
JJA	CH2018	116	105	100	112	128	138
JJA	RhiresD	108	99	100	107	112	140
JJA	$\Delta$	8	6	0	5	15	-2
JJA	$\Delta\%$	8	6	0	4	14	-2
SON	CH2018	109	98	91	98	113	136
SON	RhiresD	92	106	140	113	89	110
SON	$\Delta$	17	-8	-48	-15	24	26
SON	$\Delta\%$	18	-7	-35	-13	27	24

Unter **RCP 8.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte RhiresD erneut nur ausreichend ab. In den Regionen GraMar und PlaSud ist die Modellgüte wiederum ungenügend. Auch auf saisonaler Basis ist die Modellgüte nur ausreichend. Guten Modellierungsergebnissen im Frühling (MAM) und Sommer (JJA) stehen ungenügende im Winter (DJF) und Herbst (SON) gegenüber. Aus regionaler Sicht ist die Modellgüte in der Region PlaSud insgesamt ungenügend, in der Region GraMar ausreichend; in den restlichen Regionen ist sie gut.

## Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.83: Relative Veränderung der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	5	20	13	11	3	9
DJF	7	22	23	12	10	5
MAM	16	10	15	11	15	11
JJA	5	6	1	4	7	6
SON	8	22	20	14	8	-5

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.84: Relative Veränderung der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	11	18	11	9	6	5
DJF	1	5	3	13	4	-2
MAM	4	6	4	7	2	0
JJA	5	11	5	6	3	2
SON	10	14	11	14	2	5

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Die Extrem seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags nehmen auf Jahresbasis im Vergleich zur Referenzperiode 1981–2010 allesamt zu. Sehr gross ist die Zunahme in der Region BasBro, nur klein hingegen in der Region PlaSud. Aus saisonaler Sicht stehen mehrheitlich grossen bis sehr grossen Zunahmen im Winter (DJF)/Frühling (MAM) kleine bis moderate Zunahmen im Sommer (JJA) gegenüber. Sehr unterschiedlich ist das Bild im Herbst mit sehr grossen Zunahmen in den tieferen Lagen und sogar einer kleinen Abnahme in der Region PreAlp.

RCP 8.5: Die Veränderungen der Jahreswerte sind alle positiv. Es besteht ein Gegensatz zwischen den tiefer gelegenen Regionen mit grossen Zunahmen und den höher gelegenen Regionen mit moderaten Zunahmen. Ausser im Winter in der Region PreAlp nehmen die saisonalen Werte alle zu. Die Veränderungen sind im Sommer und Herbst grösser als im Frühjahr.

## Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.85: Relative Veränderung der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	11	21	25	9	8	12
DJF	6	13	7	7	5	2
MAM	9	10	9	7	6	1
JJA	13	12	23	9	13	7
SON	25	25	12	30	27	14

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.86: Relative Veränderung der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	10	20	22	12	7	6
DJF	8	10	4	2	3	0
MAM	16	24	24	19	16	15
JJA	4	8	12	3	7	4
SON	11	25	25	15	9	4

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Die Extrem seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags verändern sich auf Jahresbasis gegenüber der Referenzperiode in einem grossen bis sogar sehr grossen Ausmass. Es handelt sich alles um Zunahmen. Die grösste Zunahme mit +25% finden wir in der Region GraMar. Wiederum heben sich die beiden tief gelegenen Regionen BasBro und GraMar deutlich von den höher gelegenen Regionen ab. Auf saisonaler Basis sind die Zunahmen ebenfalls durchwegs positiv, besonders ausgeprägt im Sommer (JJA) und Herbst (SON). Die Zunahmen der Werte gegenüber der Referenzperiode sind in der Region PreAlp meistens am kleinsten.

RCP 8.5: Auf Jahresbasis ist das Muster der Zunahmen ähnlich wie bei RCP 4.5. Die Werte verändern sich gegenüber der Referenzperiode in den tiefer gelegenen Regionen in einem sehr grossen Ausmass, in den höher gelegenen Regionen in einem moderaten bis grossen Ausmass. Saisonal nehmen alle Werte zu. Die

Zunahmen sind im Winter (DJF) und Sommer kleiner als im Frühling (MAM) und Herbst. In den tief gelegenen Regionen BasBro und GraMar treten die grössten Zunahmen auf.

## **Synthese und Gesamtschau**

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt behandelt. Die Ergebnisse werden pro Szenario in zwei Tabellen zusammengefasst, die für sich selbst sprechen sollen.

Die erste Tabelle zeigt den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Es wird zwischen den Abweichungen auf Jahresbasis und – verdichtet zu einem einzigen Wert – auf saisonaler Basis unterschieden. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violetttöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode. Bei den in der Tabelle ausgewiesenen Abweichungen sind die Vorzeichen, also ob es sich um Zu- oder Abnahmen gegenüber der Referenzperiode handelt, nicht berücksichtigt.

In der zweiten Tabelle werden diese Informationen zu einer finalen Beurteilung der Abweichungen verdichtet (Abw. Y, Abw. Saisons). Diese finale Beurteilung erlaubt es in der Gesamtsynthese in Kapitel 2.5, den Grad der Abweichungen aller klimatischen Kenngrössen direkt zu vergleichen. Zusätzlich werden auch die Vorzeichen der Veränderungen berücksichtigt. Es ergibt sich aus dem Zusammenschau der saisonalen Veränderungen im Kanton und in den Regionen: + bedeutet eine Zunahme der Werte im Vergleich zur Referenz, - eine Abnahme. ± bedeutet, dass die Vorzeichen der Veränderungen pro Saisons in den fünf Regionen nicht übereinstimmen, also kein einheitliches Bild entsteht. Die Stärke der Veränderungen wird mit der Anzahl der Plus- bzw. Minuszeichen beschrieben:

+/-: kleine Zu-/Abnahme            ++/- -: mittlere Zu-/Abnahme  
+++/- - -: grosse Zu-/Abnahme    ++++/- - - -: sehr grosse Zu-/Abnahme

### **RCP 4.5**

Abschliessend sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Modellgüte bei dieser Kenngrösse saisonal und regional auch ungenügend sein kann.

Tab. 2.4.87: Synthese der Veränderungen der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	2	4	3	3	1	2
2055	Saisons	9	13	12	10	10	9
2085	Jahr	3	4	4	2	2	3
2085	Saisons	11	13	11	10	11	7

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.88: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags unter RCP 4.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>mittel</b>	++	<b>gross</b>	+++	+++	+	±
um 2085	<b>gross</b>	+++	<b>gross</b>	++	++	+++	++++

### RCP 8.5

Tab. 2.4.89: Synthese der Veränderungen der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	3	3	3	2	2	2
2055	Saisons	7	10	7	10	4	5
2085	Jahr	3	4	4	3	2	2
2085	Saisons	9	13	12	8	8	6

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.90: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags unter RCP 8.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>mittel</b>	++	<b>mittel</b>	±	+	++	++
um 2085	<b>gross</b>	+++	<b>mittel</b>	+	+++	++	+++

## Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigen sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

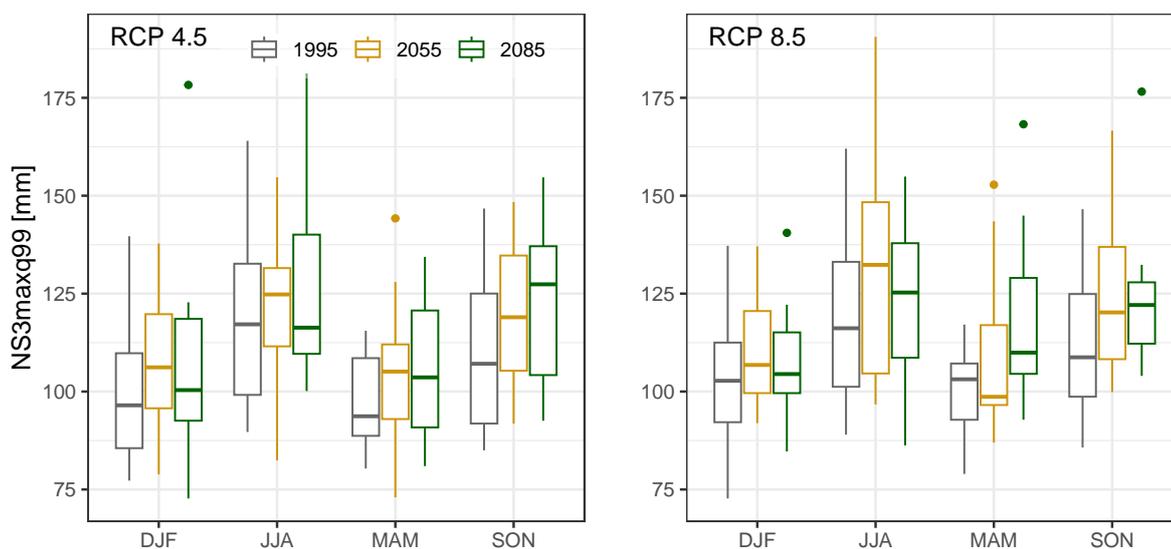


Abb. 2.22: Extrem saisonale Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der 99 %-Quantile von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

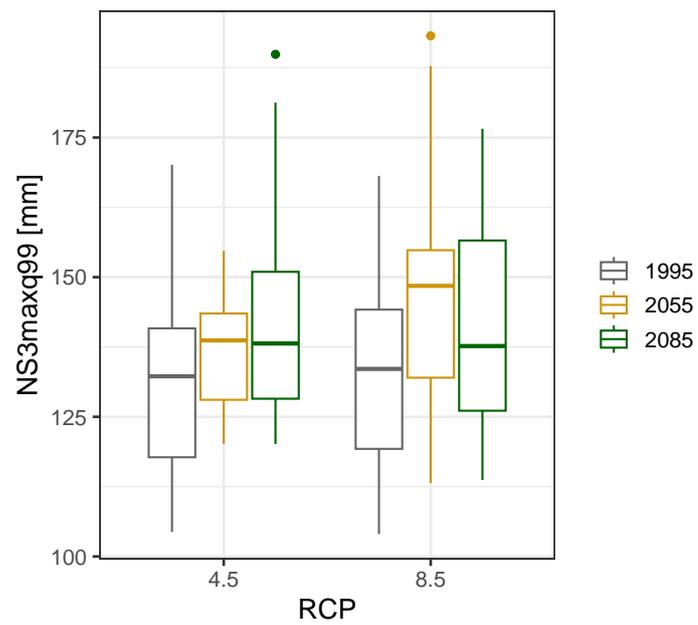


Abb. 2.23: Extrem seltene jährliche Höchstwerte des 3-Tagesniederschlags im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der 99 %-Quantile von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

## 2.4.10 Mittlere Jahrestiefstwerte der 3-Wochenniederschlagssumme

### Definition der Kenngrösse

Mittlere Jahrestiefstwerte der 3-Wochenniederschlagssumme [mm/3 Wochen] einer 30-jährigen Periode in der Granularität Jahr und Saison.

*Vorgehen pro Modellkette:* (1) Pro Einzeljahr: Aufsummierung der Tagesniederschläge von 21 aufeinander folgenden Tagen [mm/3 Wochen], dies mit einem gleitenden Zeitfenster, das jeweils um einen Tag verschoben wird. (2) Bestimmung der kleinsten jährlichen sowie der kleinsten saisonalen 3-Wochensummen (3) Mittelung der dreissig einzeljährlichen Werte zum Kennwert.

### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte RhiresD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden.

Tab. 2.4.91: Mittlere Jahrestiefstwerte der 3-Wochenniederschlagssumme [mm/3 Wochen]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010 unter RCP 4.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	3	2	2	2	2	3
2	Y	RhiresD	3	1	1	1	2	4
4	Y	$\Delta\%$	2	66	96	77	6	-9
5	DJF	CH2018	8	6	7	6	7	10
6	DJF	RhiresD	9	6	6	7	9	10
8	DJF	$\Delta\%$	-13	0	9	-11	-17	3
9	MAM	CH2018	13	8	9	10	13	18
10	MAM	RhiresD	13	7	7	10	13	18
12	MAM	$\Delta\%$	-5	15	28	-3	-1	-1
13	JJA	CH2018	19	13	14	16	18	25
14	JJA	RhiresD	24	17	16	19	22	31
16	JJA	$\Delta\%$	-20	-22	-15	-14	-17	-19
17	SON	CH2018	12	9	10	10	11	15
18	SON	RhiresD	13	8	7	10	14	17
20	SON	$\Delta\%$	-12	8	38	0	-17	-12

Unter RCP 4.5 werden die Beobachtungsdaten RhiresD durch das Modell insgesamt ungenügend abgebildet. Zwar gibt es in einzelnen Kombinationen zwischen Region und Saison durchaus gute, in Einzelfällen sogar sehr gute Modellierungen, aber die Schwankungen in der Modellgüte sind derart gross, dass eine Vergleichbarkeit der Daten nicht gegeben ist.

Tab. 2.4.92: Mittlere Jahrestiefstwerte der 3-Wochenniederschlagssumme [mm/3 Wochen]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010 unter RCP 8.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	3	2	2	2	3	4
2	Y	RhiresD	3	1	1	1	2	4
4	Y	$\Delta\%$	34	68	110	73	11	2
5	DJF	CH2018	8	6	7	7	8	11
6	DJF	RhiresD	9	6	6	7	9	10
8	DJF	$\Delta\%$	-11	8	15	-6	-14	4
9	MAM	CH2018	12	8	9	10	13	17
10	MAM	RhiresD	13	7	7	10	13	18
12	MAM	$\Delta\%$	-8	19	35	-1	-6	-7
13	JJA	CH2018	19	13	15	16	18	25
14	JJA	RhiresD	24	17	16	19	22	31
16	JJA	$\Delta\%$	-19	-23	-11	-16	-17	-19
17	SON	CH2018	12	9	10	10	11	14
18	SON	RhiresD	13	8	7	10	14	17
20	SON	$\Delta\%$	-9	5	33	-2	-19	-16

Auch unter diesem Szenario ist die Modellgüte insgesamt ungenügend.

### Fazit der Modellbeurteilung

Da die Referenzwerte der Beobachtungsperiode nur ungenügend modelliert werden können, wird hier auf eine Darstellung der Ergebnisse verzichtet

## 2.4.11 Mittlere Anzahl an Tagen pro Jahr ohne Niederschlag

### Definition der Kenngrösse

Mittlere Anzahl an Tagen pro Jahr ohne Niederschlag [d/dt] einer 30-jährigen Periode, wobei ein «Tag ohne Niederschlag» als Tag mit weniger als 1 mm Niederschlag definiert ist.

Vorgehen: (1) Bestimmung der Anzahl der Tage ohne Niederschlag pro Jahr und Saison. (2) Aus der Verteilung der Anzahl der Tage ohne Niederschlag wird der Mittelwert gebildet.

### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte RhiresD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden.

Tab. 2.4.93: Mittlere Anzahl an Tagen pro Jahr ohne Niederschlag [d/dt]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010 unter RCP 4.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	219	238	235	232	224	213
2	Y	RhiresD	220	235	235	232	224	213
4	Y	$\Delta\%$	-1	1	0	0	0	0
5	DJF	CH2018	55	58	58	58	55	52
6	DJF	RhiresD	56	60	59	60	57	54
8	DJF	$\Delta\%$	-3	-2	-2	-2	-4	-2
9	MAM	CH2018	53	58	58	56	53	50
10	MAM	RhiresD	54	60	60	57	54	51
12	MAM	$\Delta\%$	-1	-2	-3	-1	-2	-2
13	JJA	CH2018	54	60	60	58	55	52
14	JJA	RhiresD	54	58	58	56	54	50
16	JJA	$\Delta\%$	2	3	3	4	1	2
17	SON	CH2018	57	60	60	60	58	56
18	SON	RhiresD	58	61	60	62	58	57
20	SON	$\Delta\%$	-1	-1	-1	-3	0	-2

Unter RCP 4.5 handelt es sich um eine sehr gute Modellgüte. Bemerkenswert ist, dass alle e Werte sehr gut abgebildet werden.

Tab. 2.4.94: Mittlere Anzahl an Tagen pro Jahr ohne Niederschlag [d/dt]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes RhiresD in der Periode 1981–2010 unter RCP 8.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	220	238	234	233	223	212
2	Y	RhiresD	220	235	235	232	224	213
4	Y	$\Delta\%$	0	1	0	0	0	0
5	DJF	CH2018	55	58	58	58	56	54
6	DJF	RhiresD	56	60	59	60	57	54
8	DJF	$\Delta\%$	-3	-2	-1	-2	-2	0
9	MAM	CH2018	52	58	58	56	52	50
10	MAM	RhiresD	54	60	60	57	54	51
12	MAM	$\Delta\%$	-2	-3	-2	-2	-3	-3
13	JJA	CH2018	54	60	60	58	56	52
14	JJA	RhiresD	54	58	58	56	54	50
16	JJA	$\Delta\%$	2	2	3	4	2	2
17	SON	CH2018	58	60	60	60	58	57
18	SON	RhiresD	58	61	60	62	58	57
20	SON	$\Delta\%$	0	-2	-1	-3	1	0

Auch unter **RCP 8.5** werden alle Raum-Zeit-Kombinationen sehr gut erfasst.

### Veränderungen um 2055

In diesem Kapitel wird der Farbcode für die Darstellung der Veränderungen umgestellt. Rottöne bedeuten eine Zunahme der Tage ohne Niederschläge. Es wird also trockener. Blautöne bedeuten eine Abnahme der Tage ohne Niederschläge. Es wird feuchter.

Tab. 2.4.95: Relative Veränderung der Mittleren Anzahl an Tagen pro Jahr ohne Niederschlag in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissions-szenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	1	1	1	1	1	1
DJF	0	-2	-3	-1	-1	0
MAM	-1	0	-2	-1	-1	-2
JJA	8	8	7	9	7	7
SON	2	1	2	1	3	3

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.96: Relative Veränderung der Mittleren Anzahl an Tagen pro Jahr ohne Niederschlag in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissions-szenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	1	2	1	0	2	2
DJF	-4	-4	-4	-4	-4	-3
MAM	0	-1	-2	-2	1	0
JJA	8	7	8	8	8	9
SON	4	3	3	3	3	5

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Im Vergleich zur Referenzperiode 1981–2010 verändert sich die Anzahl Tage ohne Niederschläge kaum. Einzig im Sommer (JJA) nimmt die Zahl der Tage ohne Niederschlag moderat zu.

RCP 8.5: Auch unter diesem Szenario verändert sich die Anzahl Tage ohne Niederschlag gegenüber der Referenzperiode nur wenig. Es entsteht ein sehr ähnliches Raum-Zeit-Muster wie unter RCP 4.5.

## Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.97: Relative Veränderung der Mittleren Anzahl an Tagen pro Jahr ohne Niederschlag in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	1	1	1	1	1	1
DJF	-2	-3	-4	-2	-2	-1
MAM	-2	-3	-3	-3	-2	-3
JJA	7	7	6	8	9	7
SON	2	2	2	2	2	1

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.98: Relative Veränderung der Mittleren Anzahl an Tagen pro Jahr ohne Niederschlag in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	4	3	3	3	4	4
DJF	-5	-5	-6	-5	-4	-5
MAM	0	-2	-1	-1	0	-2
JJA	20	14	15	17	20	20
SON	7	3	5	3	7	7

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Sowohl die Jahreswerte als auch die saisonalen Veränderungen sind klein. Die Werte des Sommers zeigen durchwegs eine moderate Zunahme der Tage ohne Niederschlag.

RCP 8.5: Die Veränderung der Jahreswerte gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 ist immer noch klein aber insgesamt etwas grösser als unter RCP 4.5. Auf saisonaler Basis zeigen sich nun erstmals deutliche Konturen mit moderaten Abnahmen der Anzahl Tage ohne Niederschlag im Winter (DJF) und grossen bis sehr grossen Zunahmen der Anzahl Tage ohne Niederschlag im Sommer (JJA):

## Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt be-

handelt. Die Ergebnisse werden pro Szenario in zwei Tabellen zusammengefasst, die für sich selbst sprechen sollen.

Die erste Tabelle zeigt den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Es wird zwischen den Abweichungen auf Jahresbasis und – verdichtet zu einem einzigen Wert – auf saisonaler Basis unterschieden. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violetttöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode. Bei den in der Tabelle ausgewiesenen Abweichungen sind die Vorzeichen, also ob es sich um Zu- oder Abnahmen gegenüber der Referenzperiode handelt, nicht berücksichtigt.

In der zweiten Tabelle werden diese Informationen zu einer finalen Beurteilung der Abweichungen verdichtet (Abw. Y, Abw. Saisons). Diese finale Beurteilung erlaubt es in der Gesamtsynthese in Kapitel 2.5, den Grad der Abweichungen aller klimatischen Kenngrössen direkt zu vergleichen. Zusätzlich werden auch die Vorzeichen der Veränderungen berücksichtigt. Es ergibt sich aus dem Zusammenschluss der saisonalen Veränderungen im Kanton und in den Regionen: + bedeutet eine Zunahme der Werte im Vergleich zur Referenz, - eine Abnahme. ± bedeutet, dass die Vorzeichen der Veränderungen pro Saisons in den fünf Regionen nicht übereinstimmen, also kein einheitliches Bild entsteht. Die Stärke der Veränderungen wird mit der Anzahl der Plus- bzw. Minuszeichen beschrieben:

+/-: kleine Zu-/Abnahme            ++/- -: mittlere Zu-/Abnahme  
 +++/ - - -: grosse Zu-/Abnahme    ++++/- - - -: sehr grosse Zu-/Abnahme

## RCP 4.5

Tab. 2.4.99: Synthese der Veränderungen der Mittleren Anzahl an Tagen pro Jahr ohne Niederschlag basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	1	1	1	1	1	1
2055	Saisons	5	5	5	5	5	5
2085	Jahr	1	1	1	1	1	1
2085	Saisons	5	5	5	5	5	5

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.100: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der mittleren Anzahl der Tage ohne Niederschlag unter RCP 4.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst. + bedeutet hier, dass die Anzahl Tage ohne Niederschlag zunimmt, es also trockener wird.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>klein</b>	+	<b>klein</b>	-	-	++	+
um 2085	<b>klein</b>	+	<b>klein</b>	-	-	++	+

## RCP 8.5

Tab. 2.4.101: Synthese der Veränderungen der Anzahl der Tage ohne Niederschlag basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	1	1	1	1	1	1
2055	Saisons	5	5	5	5	5	6
2085	Jahr	1	1	1	1	1	1
2085	Saisons	9	7	8	7	8	9

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.102: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der mittleren Anzahl der Tage ohne Niederschlag unter RCP 8.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>klein</b>	+	<b>mittel</b>	-	±	++	+
um 2085	<b>klein</b>	+	<b>mittel</b>	--	-	+++	++

## Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigen sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

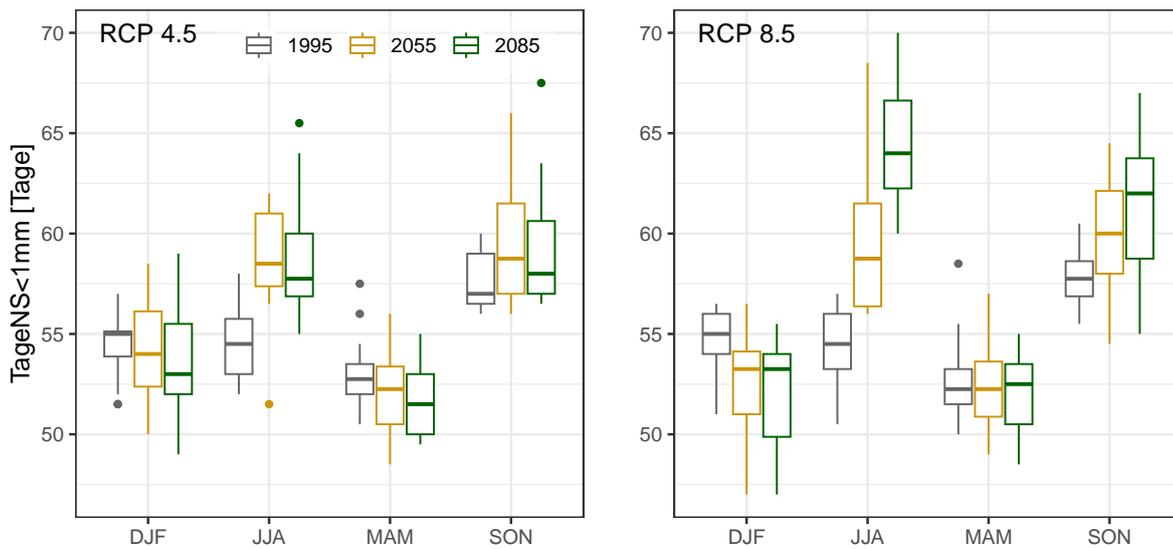


Abb. 2.24: Mittlere Anzahl der Tage ohne Niederschlag pro Saison im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

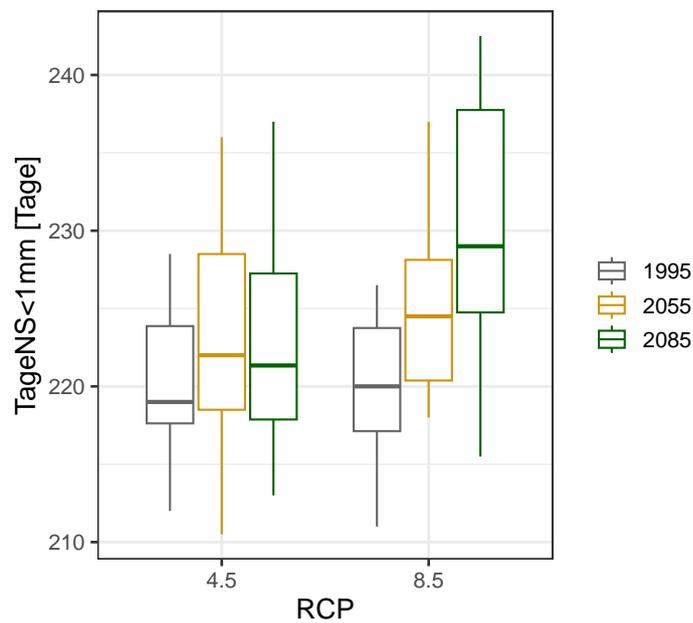


Abb. 2.25: Mittlere jährliche Anzahl der Tage ohne Niederschlag im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

## 2.4.12 Mittlere Lufttemperatur

### Definition der Kenngrösse

Mittlere Lufttemperatur pro Saison und Jahr [°C] einer 30-jährigen Periode in der Granularität Jahr und Saison.

*Vorgehen:* (1) Bestimmung der jährlichen und saisonalen Mitteltemperaturen pro Einzeljahr. (2) Mittelung dieser einzeljährlichen Werte zum Periodenmittel.

### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte TabsD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden. Die Schwellenwerte zur Beurteilung der Modellgüte basieren auf den absoluten Werten, die gutachterlich festgelegt wurden (vgl. Kap. 2.3.5).

Tab. 2.4.103: Mittlere Lufttemperatur [°C]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 4.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	7.9	9.3	9.9	8.9	8.1	5.8
2	Y	TabsD	8.0	9.4	10.0	9.0	8.2	5.8
3	Y	Δ	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	0.1
5	DJF	CH2018	0.2	1.3	1.8	0.9	0.4	-1.3
6	DJF	TabsD	0.2	1.3	1.8	0.9	0.4	-1.2
7	DJF	Δ	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.1
9	MAM	CH2018	7.0	8.7	9.3	8.3	7.3	4.4
10	MAM	TabsD	7.6	9.2	9.9	8.8	7.9	4.9
11	MAM	Δ	-0.5	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.5
13	JJA	CH2018	16.2	17.8	18.5	17.4	16.4	13.6
14	JJA	TabsD	16.0	17.6	18.4	17.2	16.2	13.3
15	JJA	Δ	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3
17	SON	CH2018	8.4	9.7	10.2	9.3	8.6	6.7
18	SON	TabsD	8.3	9.5	10.0	9.1	8.5	6.4
19	SON	Δ	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.3

Unter **RCP 4.5** werden die modellierten CH2018-Werte der Jahresmitteltemperatur in allen Regionen sehr gut abgebildet. Die Unterschiede betragen maximal 0.1°C. Auch auf saisonaler Basis handelt es sich um eine

insgesamt sehr gute Modellgüte. Allerdings bildet das Modell die Beobachtungen im Mai nur ausreichend ab. Aus regionaler Sicht ist die Modellgüte sehr gut, ausser in der Region PreAlp (gut).

Tab. 2.4.104: Mittlere Lufttemperatur [°C]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 8.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	7.9	9.4	9.9	8.9	8.2	5.8
2	Y	TabsD	8.0	9.4	10.0	9.0	8.2	5.8
3	Y	Δ	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
5	DJF	CH2018	0.1	1.2	1.7	0.8	0.2	-1.4
6	DJF	TabsD	0.2	1.3	1.8	0.9	0.4	-1.2
7	DJF	Δ	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2
9	MAM	CH2018	7.0	8.7	9.3	8.3	7.3	4.5
10	MAM	TabsD	7.6	9.2	9.9	8.8	7.9	4.9
11	MAM	Δ	-0.5	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.5
13	JJA	CH2018	16.2	17.9	18.5	17.5	16.5	13.6
14	JJA	TabsD	16.0	17.6	18.4	17.2	16.2	13.3
15	JJA	Δ	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3
17	SON	CH2018	8.5	9.7	10.1	9.3	8.7	6.7
18	SON	TabsD	8.3	9.5	10.0	9.1	8.5	6.4
19	SON	Δ	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3

Unter **RCP 8.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte TabsD wiederum sehr gut ab. Auf saisonaler Basis ist die Modellgüte insgesamt etwas schlechter als auf Jahresbasis, aber immer noch gut. Im Frühling (MAM) ist – wie unter RCP4.5 – die Modellgüte nur ausreichend. Aus regionaler Sicht werden die höher gelegenen Regionen PlaSud und PreAlp gut, die übrigen Regionen sehr gut modelliert.

## Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.105: Absolute Veränderung der mittleren Lufttemperatur in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	1.6	1.5	1.6	1.5	1.6	1.7
DJF	1.9	1.8	1.6	2.0	1.9	1.9
MAM	1.5	1.3	1.4	1.4	1.5	1.7
JJA	1.8	1.8	1.7	1.7	1.8	1.9
SON	1.6	1.7	1.7	1.7	1.6	1.5

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C]

Tab. 2.4.106: Absolute Veränderung der mittleren Lufttemperatur in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	2.4	2.3	2.2	2.3	2.4	2.5
DJF	2.1	2.1	2.0	2.2	2.2	2.2
MAM	1.9	1.7	1.7	1.8	1.9	2.1
JJA	2.3	2.2	2.2	2.2	2.3	2.6
SON	2.5	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C]

RCP 4.5: Die Erwärmung ist im Kanton Freiburg gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 saisonal wie räumlich sehr ähnlich. Sie beträgt auf Jahresbasis und im Kantonsmittel 1.6 °C und schwankt saisonal zwischen 1.5 und 1.9 °C. Die Temperaturzunahme ist im Frühling (MAM) am kleinsten und im Winter (DJF) am grössten. In den Regionen ist die Spannbreite leicht grösser. Sie liegt zwischen 1.3 und 2.0 °C.

RCP 8.5: Die Zunahme der mittleren Jahrestemperatur ist im Vergleich zum Szenario RCP 4.5 im Kantonsdurchschnitt 0.8 °C höher. Die Temperaturzunahme ist wiederum im Frühling (MAM) am kleinsten und im Gegensatz zum Szenario RCP 4.5 im Herbst (SON) am grössten. Die Resultate zeigen, dass die Temperaturzunahme mit der Höhenlage der Regionen korreliert ist.

## Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.107: Absolute Veränderung der mittleren Lufttemperatur in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	2.1	2.0	2.0	2.0	2.2	2.3
DJF	2.2	2.3	2.1	2.3	2.2	2.1
MAM	1.9	1.8	1.8	1.8	2.0	2.0
JJA	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.3
SON	2.1	2.0	2.0	2.1	2.1	2.1

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C]

Tab. 2.4.108: Absolute Veränderung der mittleren Lufttemperatur in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	4.2	4.0	3.9	4.0	4.2	4.4
DJF	4.1	4.0	3.8	4.1	4.3	4.2
MAM	3.6	3.3	3.3	3.3	3.6	4.1
JJA	4.3	4.2	4.1	4.1	4.2	4.7
SON	4.0	3.9	3.9	3.9	4.0	4.1

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C]

RCP 4.5: Im Kantonsdurchschnitt beträgt die mittlere jährliche Temperaturerhöhung 2.1 °C. Die Erwärmung zur Referenzperiode 1981–2010 ist in den höher gelegenen Regionen grösser als in tiefer gelegenen Regionen. Saisonal gesehen ist die Temperaturzunahme im Frühling (MAM) am kleinsten und im Winter (DJF) am grössten.

RCP 8.5: Man erkennt die im Vergleich zur Referenzperiode 1981–2010 sehr grosse Erhöhung der Temperaturen im ganzen Kanton. Die mittlere Lufttemperatur nimmt über den ganzen Kanton gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 im Jahresdurchschnitt um 4.2 °C zu und schwankt saisonal zwischen 3.6 und 4.3 °C. Wiederum ist die Erwärmung in den Regionen PlaSud und PreAlp am grössten.

## Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt be-

handelt. Die Ergebnisse werden pro Szenario in zwei Tabellen zusammengefasst, die für sich selbst sprechen sollen.

Die erste Tabelle zeigt den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Es wird zwischen den Abweichungen auf Jahresbasis und – verdichtet zu einem einzigen Wert – auf saisonaler Basis unterschieden. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violetttöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode. Bei den in der Tabelle ausgewiesenen Abweichungen sind die Vorzeichen, also ob es sich um Zu- oder Abnahmen gegenüber der Referenzperiode handelt, nicht berücksichtigt.

In der zweiten Tabelle werden diese Informationen zu einer finalen Beurteilung der Abweichungen verdichtet (Abw. Y, Abw. Saisons). Diese finale Beurteilung erlaubt es in der Gesamtsynthese in Kapitel 2.5, den Grad der Abweichungen aller klimatischen Kenngrössen direkt zu vergleichen. Zusätzlich werden auch die Vorzeichen der Veränderungen berücksichtigt. Es ergibt sich aus dem Zusammenschluss der saisonalen Veränderungen im Kanton und in den Regionen: + bedeutet eine Zunahme der Werte im Vergleich zur Referenz, - eine Abnahme. ± bedeutet, dass die Vorzeichen der Veränderungen pro Saisons in den fünf Regionen nicht übereinstimmen, also kein einheitliches Bild entsteht. Die Stärke der Veränderungen wird mit der Anzahl der Plus- bzw. Minuszeichen beschrieben:

+/-: kleine Zu-/Abnahme                      +/- -: mittlere Zu-/Abnahme  
 +++/ - - -: grosse Zu-/Abnahme            ++++/- - - -: sehr grosse Zu-/Abnahme

Die Beurteilung der Abweichungen der Lufttemperatur von der Referenzperiode 1981–2010 beruht auf absoluten Differenzen der Temperatur. Man beachte, dass die dazu benötigten Schwellenwerte gutachterlich festgelegt wurden (vgl. Kap. 2.3.5).

#### RCP 4.5

Tab. 2.4.109: Synthese der Veränderungen der mittleren Lufttemperatur basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	2	2	2	2	2	2
2055	Saisons	8	8	8	9	8	8
2085	Jahr	3	3	3	3	3	3
2085	Saisons	11	11	11	11	12	12

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.110: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der mittleren Lufttemperaturen unter RCP 4.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>mittel</b>	++	<b>mittel</b>	++	++	++	++
um 2085	<b>gross</b>	+++	<b>gross</b>	+++	++	+++	+++

## RCP 8.5

Tab. 2.4.111: Synthese der Veränderungen der mittleren Lufttemperaturen basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	3	3	3	3	3	3
2055	Saisons	11	11	11	11	11	12
2085	Jahr	4	4	4	4	4	4
2085	Saisons	16	16	16	16	16	16

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.112: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der mittleren Lufttemperaturen unter RCP 8.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>gross</b>	+++	<b>gross</b>	+++	++	+++	+++
um 2085	<b>sehr gross</b>	++++	<b>sehr gross</b>	++++	++++	++++	++++

## Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigen sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

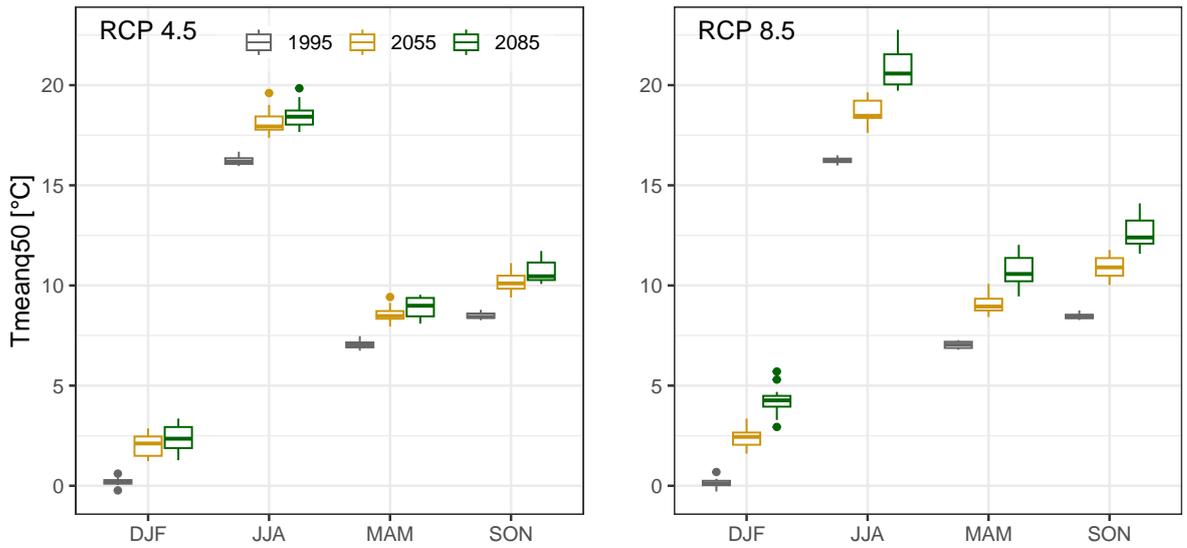


Abb. 2.26: Mittlere saisonale Lufttemperaturen im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

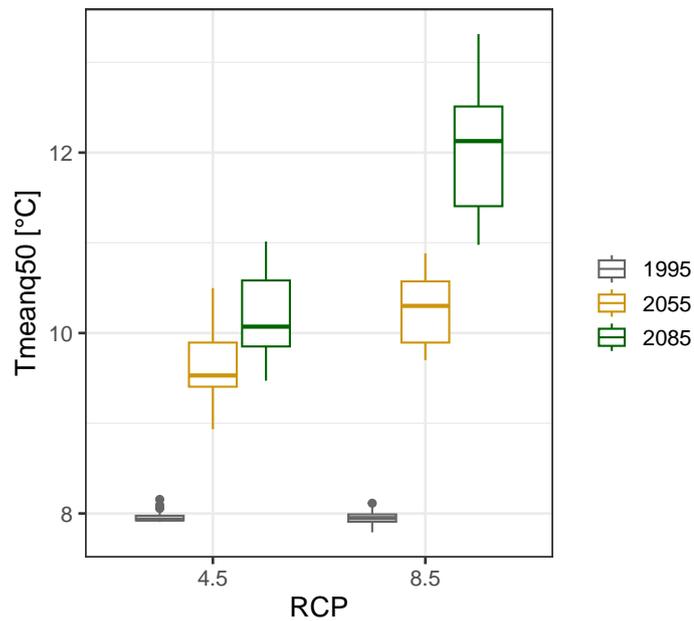


Abb. 2.27: Mittlere jährliche Lufttemperaturen im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

### 2.4.13 Mittlere Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur

#### Definition der Kenngrösse

Mittlere Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur [°C] einer 30-jährigen Periode in der Granularität Jahr und Saison.

*Vorgehen:* (1) Bestimmung der höchsten jährlichen und saisonalen Temperaturen pro Einzeljahr. (2) Mittelung dieser einzeljährlichen Maximalwerte zum Periodenmittel.

#### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte TabsD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden. Die Schwellenwerte zur Beurteilung der Modellgüte basieren auf den absoluten Werten, die gutachterlich festgelegt wurden (vgl. Kap. 2.3.5).

Tab. 2.4.113: Mittlere Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur [°C]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 4.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	22.5	24.0	24.5	23.6	22.9	20.3
2	Y	TabsD	22.3	24.1	24.7	23.5	23.0	20.0
3	Y	Δ	0.2	-0.1	-0.2	0.1	-0.1	0.3
5	DJF	CH2018	8.3	9.4	9.5	9.2	8.7	6.8
6	DJF	TabsD	8.1	9.5	9.4	9.5	8.8	6.6
7	DJF	Δ	0.2	-0.1	0.1	-0.3	-0.1	0.2
9	MAM	CH2018	16.3	18.0	18.9	17.7	16.6	13.5
10	MAM	TabsD	17.4	19.0	19.3	18.6	17.9	15.1
11	MAM	Δ	-1.1	-0.9	-0.4	-0.8	-1.4	-1.7
13	JJA	CH2018	22.5	24.0	24.5	23.6	22.9	20.3
14	JJA	TabsD	22.2	24.1	24.7	23.5	22.8	20.0
15	JJA	Δ	0.3	-0.1	-0.2	0.1	0.1	0.3
17	SON	CH2018	18.1	19.5	20.2	19.2	18.4	15.9
18	SON	TabsD	17.3	18.9	19.3	18.5	17.8	15.5
19	SON	Δ	0.8	0.7	0.8	0.7	0.6	0.4

Unter **RCP 4.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte TabsD sehr gut ab. Die grösste Abweichung beträgt 0.3 °C in der Region PreAlp. Auf saisonaler Basis ist die Modellgüte insgesamt gut. Während Winter (DJF) und Sommer (JJA) sehr gut modelliert werden, ist die Modellgüte im Herbst (SON) nur ausreichend und im Frühling (MAM) sogar ungenügend. Aus regionaler Sicht ist die Modellgüte in der Region PreAlp ausreichend, sonst ist sie gut.

Tab. 2.4.114: Mittlere Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur [°C]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 8.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	22.5	23.9	24.5	23.7	23.0	20.3
2	Y	TabsD	22.3	24.1	24.7	23.5	23.0	20.0
3	Y	Δ	0.1	-0.1	-0.2	0.1	0.0	0.3
5	DJF	CH2018	8.4	9.3	9.7	9.2	8.8	6.8
6	DJF	TabsD	8.1	9.5	9.4	9.5	8.8	6.6
7	DJF	Δ	0.3	-0.2	0.3	-0.3	0.0	0.2
9	MAM	CH2018	16.2	17.8	18.6	17.5	16.5	13.3
10	MAM	TabsD	17.4	19.0	19.3	18.6	17.9	15.1
11	MAM	Δ	-1.2	-1.1	-0.7	-1.0	-1.4	-1.8
13	JJA	CH2018	22.5	23.9	24.5	23.7	23.0	20.3
14	JJA	TabsD	22.2	24.1	24.7	23.5	22.8	20.0
15	JJA	Δ	0.3	-0.1	-0.2	0.1	0.2	0.3
17	SON	CH2018	18.2	19.5	20.1	19.2	18.4	16.0
18	SON	TabsD	17.3	18.9	19.3	18.5	17.8	15.5
19	SON	Δ	0.9	0.6	0.8	0.7	0.5	0.6

Unter **RCP 8.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte TabsD sehr gut ab. Die grösste Abweichung beträgt 0.3 °C in der Region PreAlp. Auf saisonaler Basis sind die Modellgüten aus saisonaler wie regionaler Sicht gleich strukturiert wie unter RCP 4.5. Insgesamt sind die Modellfehler etwas grösser, so dass die saisonale Modellgüte nur ausreichend ausfällt.

## Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.115: Absolute Veränderung der Mittleren Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	2.8	2.5	2.4	2.7	2.8	2.7
DJF	1.7	1.9	1.6	1.7	1.8	1.7
MAM	2.2	1.7	1.7	1.8	2.3	2.5
JJA	2.8	2.5	2.4	2.7	2.8	2.7
SON	2.1	2.0	2.0	1.9	2.1	2.2

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 [°C]

Tab. 2.4.116: Absolute Veränderung der Mittleren Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	2.9	3.0	2.9	2.9	2.9	3.0
DJF	2.1	1.9	1.8	1.9	2.0	2.2
MAM	2.7	2.5	2.3	2.4	2.8	3.3
JJA	3.0	3.0	2.9	2.9	2.9	3.0
SON	2.8	2.6	2.5	2.4	2.8	3.0

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 [°C]

RCP 4.5: Die Mittleren Jahreshöchstwerte nehmen auf Jahresbasis gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 in den Regionen zwischen 2.4 und 2.8 °C zu, im Kantonsdurchschnitt um 2.8 °C. In den höher gelegenen Kantonsgebieten (PlaSud und PreAlp) nehmen die Werte stärker zu als in tiefergelegenen Kantonsteilen. Aus saisonaler Sicht schwanken die Zunahmen zwischen 1.6 und 2.8 °C. Sie sind im Winter (DJF) am kleinsten, gefolgt von Herbst (SON) und Frühling (MAM). Die grössten Zunahmen mit bis zu 2.8 °C treten im Sommer (JJA) auf.

RCP 8.5: Die Zunahme der Mittleren Jahreshöchstwerte der Tagesmitteltemperatur erreicht auf Jahresbasis bis 3.0 °C. Die Unterschiede zwischen den Regionen betragen nur 0.1 °C. Der Kantonsdurchschnitt beträgt 2.9 °C. Bei den saisonalen Veränderungen fällt auf, dass die Temperaturzunahme im Frühling (MAM), Sommer (JJA) und Herbst (SON) ähnlich gross ist. Hingegen ist der Anstieg im Winter (DJF) deutlich kleiner. Die grössten Veränderungen gegenüber der Referenzperiode sind stets im Sommer zu finden.

## Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.117: Absolute Veränderung der Mittleren Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	3.2	3.1	3.0	3.1	3.2	3.2
DJF	2.1	1.9	1.9	1.9	2.2	2.5
MAM	2.4	1.9	1.9	2.0	2.6	2.7
JJA	3.2	3.1	3.0	3.1	3.2	3.1
SON	2.6	2.4	2.4	2.4	2.7	2.8

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 [°C]

Tab. 2.4.118: Absolute Veränderung der Mittleren Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	6.0	5.8	5.7	5.7	5.9	5.8
DJF	3.8	3.7	3.7	3.8	4.1	4.2
MAM	4.7	3.8	3.9	4.0	4.7	5.4
JJA	5.8	5.7	5.7	5.5	5.8	5.6
SON	4.9	4.8	4.8	4.7	5.1	5.2

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 [°C]

RCP 4.5: Die Mittleren Höchstwerte nehmen aus jährlicher Sicht im Kantonsdurchschnitt um 3.2 °C gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 zu. Die regionalen Unterschiede sind klein. Saisonal gesehen ist die Zunahme im Sommer (JJA) wesentlich grösser als in den anderen Jahreszeiten. Die Zunahme im Winter (DJF) ist um 1 °C und mehr kleiner als im Sommer.

RCP 8.5: Aus der Sicht des ganzen Kantons beträgt die Zunahme der Mittleren Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 auf Jahresbasis 6.0 °C. In den Regionen nehmen die Jahreswerte zwischen 5.7 und 5.9 °C zu. Aus saisonaler Sicht ist eine Dreiteilung zu beobachten: Die kleinsten Temperaturzunahmen treten im Winter (DJF) und die grössten im Sommer (JJA) auf. Diese sind um rund 2 °C grösser als im Winter. Dazwischen liegen Frühling (MAM) und Herbst (SON).

## Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt behandelt. Die Ergebnisse werden pro Szenario in zwei Tabellen zusammengefasst, die für sich selbst sprechen sollen.

Die erste Tabelle zeigt den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Es wird zwischen den Abweichungen auf Jahresbasis und – verdichtet zu einem einzigen Wert – auf saisonaler Basis unterschieden. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violetttöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode. Bei den in der Tabelle ausgewiesenen Abweichungen sind die Vorzeichen, also ob es sich um Zu- oder Abnahmen gegenüber der Referenzperiode handelt, nicht berücksichtigt.

In der zweiten Tabelle werden diese Informationen zu einer finalen Beurteilung der Abweichungen verdichtet (Abw. Y, Abw. Saisons). Diese finale Beurteilung erlaubt es in der Gesamtsynthese in Kapitel 2.5, den Grad der Abweichungen aller klimatischen Kenngrössen direkt zu vergleichen. Zusätzlich werden auch die Vorzeichen der Veränderungen berücksichtigt. Es ergibt sich aus dem Zusammenschluss der saisonalen Veränderungen im Kanton und in den Regionen: + bedeutet eine Zunahme der Werte im Vergleich zur Referenz, - eine Abnahme. ± bedeutet, dass die Vorzeichen der Veränderungen pro Saisons in den fünf Regionen nicht übereinstimmen, also kein einheitliches Bild entsteht. Die Stärke der Veränderungen wird mit der Anzahl der Plus- bzw. Minuszeichen beschrieben:

+/-: kleine Zu-/Abnahme            ++/- -: mittlere Zu-/Abnahme  
+++/- -: grosse Zu-/Abnahme    ++++/- -: sehr grosse Zu-/Abnahme

Die Beurteilung der Abweichungen der Lufttemperatur von der Referenzperiode 1981–2010 basiert auf absoluten Differenzen der Temperatur. Man beachte, dass die dazu benötigten Schwellenwerte gutachterlich festgelegt wurden (vgl. Kap. 2.3.5).

## RCP 4.5

Tab. 2.4.119: Synthese der Veränderung der Mittleren Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	3	3	3	3	3	3
2055	Saisons	11	10	10	9	11	11
2085	Jahr	4	4	4	4	4	4
2085	Saisons	13	11	11	12	13	13

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.120: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Mittleren Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur unter RCP 4.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>gross</b>	+++	<b>gross</b>	++	+++	+++	+++
um 2085	<b>sehr gross</b>	++++	<b>gross</b>	+++	+++	++++	+++

## RCP 8.5

Tab. 2.4.121: Synthese der Veränderungen der Mittleren Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	3	4	3	3	3	4
2055	Saisons	13	12	11	11	12	15
2085	Jahr	4	4	4	4	4	4
2085	Saisons	16	16	16	16	16	16

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.122: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Mittleren Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur unter RCP 8.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>gross</b>	+++	<b>gross</b>	++	+++	+++	+++
um 2085	<b>sehr gross</b>	++++	<b>sehr gross</b>	++++	++++	++++	++++

## Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigen sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

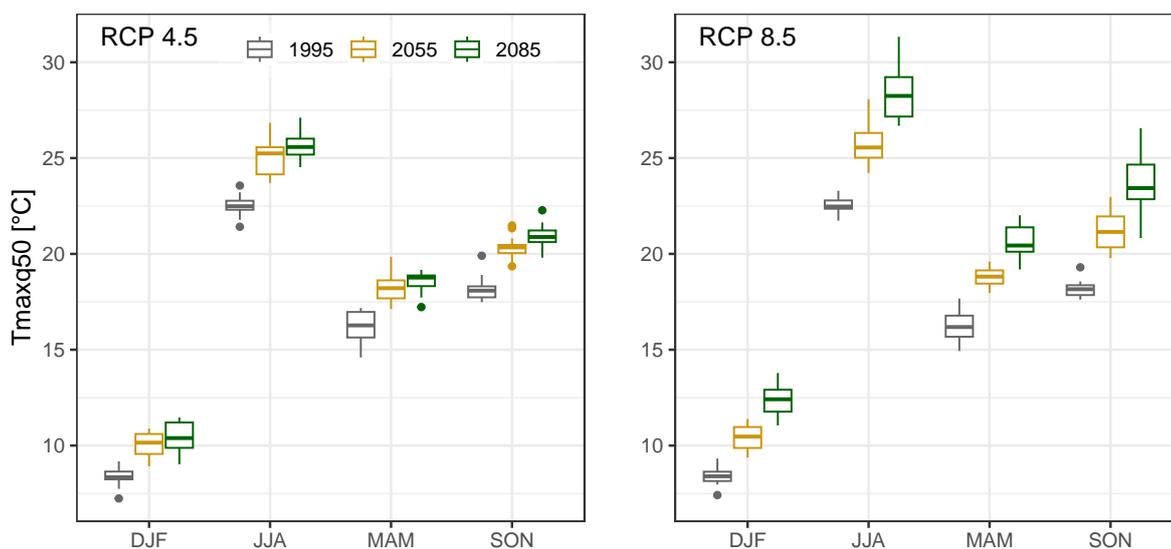


Abb. 2.28: Mittlere saisonale Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

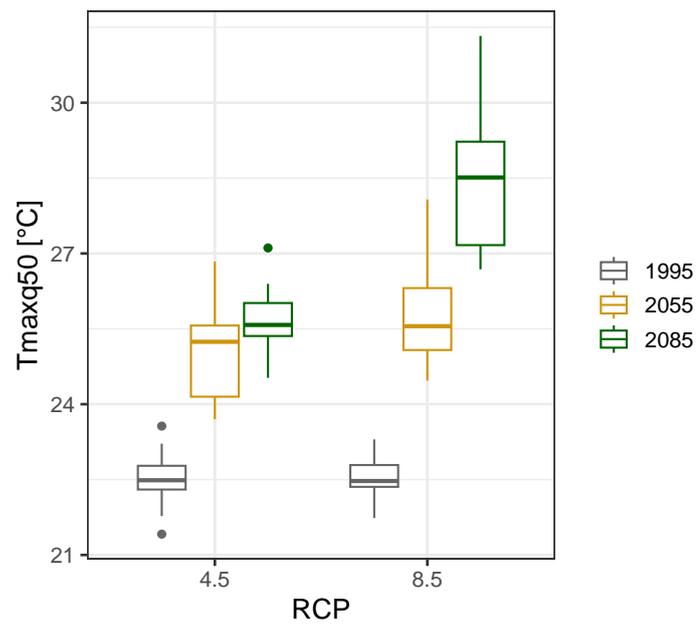


Abb. 2.29: Mittlere jährliche Höchstwerte der Tageslufttemperatur im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

## 2.4.14 Seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur

### Definition der Kenngrösse

Seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur [°C] einer 30-jährigen Periode in der Granularität Jahr und Saison.

*Vorgehen:* (1) Bestimmung der höchsten jährlichen und saisonalen Temperaturen pro Einzeljahr. (2) Aus der Verteilung dieser dreissig grössten Lufttemperaturen wird jener Wert bestimmt, der in 10 % der Fälle über- und in 90 % der Fälle unterschritten wird.

### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte TabsD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden. Die Schwellenwerte zur Beurteilung der Modellgüte basieren auf den absoluten Werten, die gutachterlich festgelegt wurden (vgl. Kap. 2.3.5).

Tab. 2.4.123: Seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur [°C]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 4.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	24.5	26.2	26.5	25.6	24.9	22.3
2	Y	TabSD	24.3	25.9	26.6	25.4	24.6	21.8
3	Y	Δ	0.2	0.3	-0.1	0.2	0.2	0.5
5	DJF	CH2018	10.3	11.4	11.7	11.2	10.8	8.8
6	DJF	TabSD	10.2	11.6	11.2	11.6	11.1	7.9
7	DJF	Δ	0.1	-0.2	0.5	-0.4	-0.3	0.9
9	MAM	CH2018	19.0	20.4	21.1	20.2	19.4	16.4
10	MAM	TabSD	19.4	20.9	21.4	20.6	19.9	17.0
11	MAM	Δ	-0.4	-0.5	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6
13	JJA	CH2018	24.5	26.2	26.5	25.6	24.9	22.3
14	JJA	TabSD	24.3	25.9	26.6	25.4	24.6	21.8
15	JJA	Δ	0.2	0.3	-0.1	0.2	0.2	0.5
17	SON	CH2018	20.3	21.6	22.2	21.2	20.6	18.2
18	SON	TabSD	19.1	21.0	21.3	20.4	19.8	17.4
19	SON	Δ	1.2	0.6	0.9	0.7	0.8	0.8

Unter **RCP 4.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte TabsD sehr gut ab. Die grösste Abweichung tritt in der Region PreAlp mit 0.5 °C auf. Auf saisonaler Basis handelt es sich um eine insgesamt gute Modellgüte. Nur im Herbst (SON) ist die Modellierung ausreichend. Die Modellgüte ist auch in den Regionen insgesamt gut, ausser in der Region PreAlp (ausreichend).

Tab. 2.4.124: Seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur [°C]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 8.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	24.6	26.1	26.5	25.8	25.0	22.3
2	Y	TabsD	24.3	25.9	26.6	25.4	24.6	21.8
3	Y	Δ	0.4	0.2	-0.1	0.3	0.3	0.5
5	DJF	CH2018	10.2	11.2	11.4	11.0	10.5	8.7
6	DJF	TabsD	10.2	11.6	11.2	11.6	11.1	7.9
7	DJF	Δ	0.0	-0.4	0.2	-0.6	-0.6	0.9
9	MAM	CH2018	18.8	20.7	21.4	20.3	19.3	16.2
10	MAM	TabsD	19.4	20.9	21.4	20.6	19.9	17.0
11	MAM	Δ	-0.6	-0.3	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
13	JJA	CH2018	24.6	26.1	26.5	25.8	25.0	22.3
14	JJA	TabsD	24.3	25.9	26.6	25.4	24.6	21.8
15	JJA	Δ	0.4	0.2	-0.1	0.3	0.3	0.5
17	SON	CH2018	20.1	21.5	22.1	21.2	20.4	18.0
18	SON	TabsD	19.1	21.0	21.3	20.4	19.8	17.4
19	SON	Δ	1.0	0.6	0.8	0.8	0.6	0.6

Unter **RCP 8.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte TabsD insgesamt gut ab. In der Region PreAlp ist sie allerdings nur ausreichend. Auf saisonaler Basis ist die Modellgüte insgesamt ebenfalls gut. Nur im Herbst (SON) ist sie schlechter, aber noch ausreichend. In vier von fünf Regionen ist das Modell als gut zu beurteilen. Davon weicht die Region PreAlp mit einer ausreichenden Güte ab.

## Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.125: Absolute Veränderung der Seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissions-szenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	2.8	2.8	2.6	2.8	2.9	2.4
DJF	1.6	1.4	1.3	1.5	1.6	1.7
MAM	2.2	1.8	1.9	2.1	2.3	2.0
JJA	2.8	2.8	2.6	2.8	2.9	2.4
SON	2.3	2.2	2.0	2.2	2.4	2.4

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 [°C]

Tab. 2.4.126: Absolute Veränderung der Seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissions-szenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	3.5	3.5	3.4	3.5	3.6	3.7
DJF	2.3	2.0	1.9	2.0	2.4	2.7
MAM	2.7	2.3	2.4	2.4	2.6	2.9
JJA	3.5	3.5	3.4	3.5	3.6	3.7
SON	3.3	3.4	3.3	3.2	3.5	3.2

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 [°C]

RCP 4.5: Die Jahreswerte der Seltenen Jahreshöchstwerte der Tagesmitteltemperatur nehmen im Vergleich zur Referenzperiode 1981–2010 im Kantonsdurchschnitt um 2.8 °C zu. Aus regionaler Sicht ist die Zunahme in der Region PreAlp am kleinsten. Aus saisonaler Sicht sind die Zunahmen im Winter (DJF) am kleinsten, gefolgt von Frühling (MAM) und Herbst (SON). Die Zunahmen im Sommer (JJA) sind – ausser in der Region PreAlp – um mindestens ein Grad Celsius grösser als im Winter.

RCP 8.5: Die Seltenen Jahreshöchstwerte der Tagesmitteltemperatur nehmen auf Jahresbasis im Kantonsdurchschnitt um 3.5 °C zu. Mit 3.7 °C ist die Zunahme in der Region PreAlp am grössten. Auf saisonaler Basis ist ein deutlicher Unterschied zwischen Winter und Frühling auf der einen Seite und Sommer/Herbst auf der anderen Seite erkennbar. Die Zunahmen im Sommer/Herbst sind wesentlich grösser.

## Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.127: Absolute Veränderung der Seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissions-szenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	3.1	2.9	2.9	3.1	3.1	2.9
DJF	1.9	1.5	1.7	1.6	2.0	2.4
MAM	2.1	1.8	2.0	1.8	2.1	2.3
JJA	3.1	2.9	2.9	3.1	3.1	2.9
SON	3.5	3.4	3.4	3.4	3.6	3.4

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 [°C]

Tab. 2.4.128: Absolute Veränderung der Seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissions-szenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	6.2	6.3	6.4	6.4	6.2	5.9
DJF	3.7	3.5	3.2	3.6	3.8	4.0
MAM	4.3	3.8	3.8	3.9	4.3	4.8
JJA	6.2	6.3	6.4	6.4	6.2	5.9
SON	7.0	7.1	7.3	7.0	7.2	7.0

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 [°C]

RCP 4.5: Die Jahreswerte der Seltenen Jahreshöchstwerte der Tagesmitteltemperatur nehmen im Kantons-durchschnitt um 3.1°C zu. Die regionalen Werte unterscheiden sich nur wenig vom kantonalen Mittel. Auf saisonaler Basis zeigt sich auch hier ein sehr deutlicher Unterschied zwischen Winter (DJF) und Frühling (MAM) auf der einen Seite und Sommer (JJA)/Herbst (SON) auf der anderen Seite. Im Sommer und Herbst ist die Temperaturerhöhung mit rund 1°C gegenüber Winter und Frühling wesentlich grösser. Zudem ist die Zunahme im Herbst grösser als jene im Sommer.

RCP 8.5: Die Seltenen Jahreshöchstwerte der Tagesmitteltemperatur nehmen auf Jahresbasis im Kantons-durchschnitt um 6.2°C zu. In den Regionen GraMar und PlaNor beträgt die Zunahme gar 6.4°C. Saisonal gesehen ist die Zunahme im Sommer rund 3°C höher als im Winter (Ausnahme Region PreAlp), jene im Herbst gar bis zu 4°C.

## Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt behandelt. Die Ergebnisse werden pro Szenario in zwei Tabellen zusammengefasst, die für sich selbst sprechen sollen.

Die erste Tabelle zeigt den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Es wird zwischen den Abweichungen auf Jahresbasis und – verdichtet zu einem einzigen Wert – auf saisonaler Basis unterschieden. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violetttöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode. Bei den in der Tabelle ausgewiesenen Abweichungen sind die Vorzeichen, also ob es sich um Zu- oder Abnahmen gegenüber der Referenzperiode handelt, nicht berücksichtigt.

In der zweiten Tabelle werden diese Informationen zu einer finalen Beurteilung der Abweichungen verdichtet (Abw. Y, Abw. Saisons). Diese finale Beurteilung erlaubt es in der Gesamtsynthese in Kapitel 2.5, den Grad der Abweichungen aller klimatischen Kenngrössen direkt zu vergleichen. Zusätzlich werden auch die Vorzeichen der Veränderungen berücksichtigt. Es ergibt sich aus dem Zusammenschluss der saisonalen Veränderungen im Kanton und in den Regionen: + bedeutet eine Zunahme der Werte im Vergleich zur Referenz, - eine Abnahme. ± bedeutet, dass die Vorzeichen der Veränderungen pro Saisons in den fünf Regionen nicht übereinstimmen, also kein einheitliches Bild entsteht. Die Stärke der Veränderungen wird mit der Anzahl der Plus- bzw. Minuszeichen beschrieben:

+/-: kleine Zu-/Abnahme            ++/- -: mittlere Zu-/Abnahme  
+++/- -: grosse Zu-/Abnahme    ++++/- -: sehr grosse Zu-/Abnahme

Die Beurteilung der Abweichungen der Lufttemperatur von der Referenzperiode 1981–2010 beruht auf absoluten Differenzen der Temperatur. Man beachte, dass die dazu benötigten Schwellenwerte gutachterlich festgelegt wurden (vgl. Kap. 2.3.5).

## RCP 4.5

Tab. 2.4.129: Synthese der Veränderungen der Seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	3	3	3	3	3	3
2055	Saisons	11	10	10	11	11	11
2085	Jahr	4	3	3	4	4	3
2085	Saisons	13	11	12	12	14	13

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.130: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur unter RCP 4.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>gross</b>	+++	<b>gross</b>	++	+++	+++	+++
um 2085	<b>sehr gross</b>	++++	<b>gross</b>	++	+++	++++	++++

## RCP 8.5

Tab. 2.4.131: Synthese der Veränderungen der Seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	4	4	4	4	4	4
2055	Saisons	14	14	13	14	14	14
2085	Jahr	4	4	4	4	4	4
2085	Saisons	16	16	16	16	16	16

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.132: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur unter RCP 8.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>sehr gross</b>	++++	<b>gross</b>	+++	+++	++++	++++
um 2085	<b>sehr gross</b>	++++	<b>sehr gross</b>	++++	++++	++++	++++

## Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigen sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

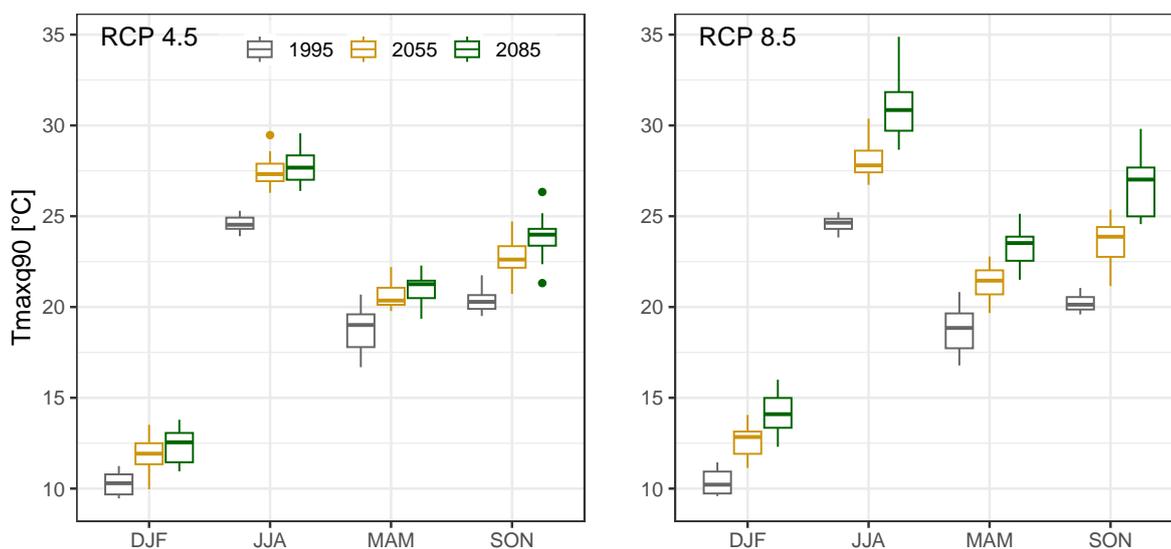


Abb. 2.30: Seltene saisonale Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der 90 %-Quantile von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

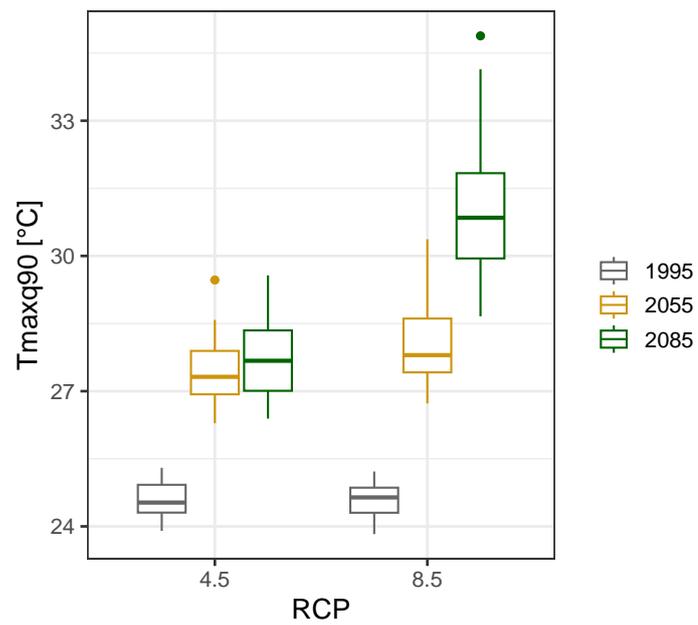


Abb. 2.31: Seltene jährliche Höchstwerte der Tageslufttemperatur im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der 90 %-Quantile von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

## 2.4.15 Sehr seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur

### Definition der Kenngrösse

Sehr seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur [°C] einer 30-jährigen Periode in der Granularität Jahr und Saison.

*Vorgehen:* (1) Bestimmung der höchsten jährlichen und saisonalen Temperaturen pro Einzeljahr. (2) Aus der Verteilung dieser dreissig grössten Lufttemperaturen wird jener Wert bestimmt, der in 5 % der Fälle über- und in 95 % der Fälle unterschritten wird.

### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte TabsD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden. Die Schwellenwerte zur Beurteilung der Modellgüte basieren auf den absoluten Werten, die gutachterlich festgelegt wurden (vgl. Kap. 2.3.5).

Tab. 2.4.133: Sehr seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur [°C]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 4.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	25.2	26.8	27.3	26.4	25.6	22.7
2	Y	TabSD	24.6	26.1	26.9	25.5	25.0	22.3
3	Y	Δ	0.6	0.7	0.4	0.9	0.7	0.3
5	DJF	CH2018	11.0	12.0	12.1	11.6	11.3	9.4
6	DJF	TabSD	10.8	12.1	11.6	12.3	11.8	8.4
7	DJF	Δ	0.2	-0.1	0.5	-0.6	-0.5	1.0
9	MAM	CH2018	19.4	20.9	21.8	20.7	19.9	16.9
10	MAM	TabSD	20.4	22.0	22.5	21.6	21.0	17.7
11	MAM	Δ	-1.0	-1.1	-0.8	-1.0	-1.1	-0.7
13	JJA	CH2018	25.2	26.8	27.3	26.4	25.6	22.7
14	JJA	TabSD	24.6	26.1	26.9	25.5	25.0	22.3
15	JJA	Δ	0.6	0.7	0.4	0.9	0.7	0.3
17	SON	CH2018	20.7	22.1	22.7	21.7	21.0	18.7
18	SON	TabSD	19.9	21.4	22.2	21.0	20.3	17.5
19	SON	Δ	0.9	0.7	0.5	0.7	0.7	1.1

Unter **RCP 4.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte TabsD nur ausreichend ab. Einzig in der Region PreAlp handelt es sich um eine gute Modellierung. Aus saisonaler Sicht werden die Werte im Frühling (MAM) insgesamt ungenügend abgebildet. In den anderen Jahreszeiten ist die Modellgüte durchwegs ausreichend. Die Werte der Region GraMar erfasst das Modell besser (Prädikat gut) als in den übrigen Gebieten (Prädikat ausreichend)

Tab. 2.4.134: Sehr seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur [°C]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 8.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	25.3	26.8	27.4	26.4	25.7	22.7
2	Y	TabsD	24.6	26.1	26.9	25.5	25.0	22.3
3	Y	Δ	0.7	0.7	0.4	0.9	0.7	0.4
5	DJF	CH2018	10.4	11.5	11.8	11.4	11.1	9.2
6	DJF	TabsD	10.8	12.1	11.6	12.3	11.8	8.4
7	DJF	Δ	-0.3	-0.6	0.2	-0.9	-0.7	0.7
9	MAM	CH2018	19.3	20.9	21.7	20.6	19.7	16.9
10	MAM	TabsD	20.4	22.0	22.5	21.6	21.0	17.7
11	MAM	Δ	-1.1	-1.1	-0.8	-1.0	-1.4	-0.8
13	JJA	CH2018	25.3	26.8	27.4	26.4	25.7	22.7
14	JJA	TabsD	24.6	26.1	26.9	25.5	25.0	22.3
15	JJA	Δ	0.7	0.7	0.4	0.9	0.7	0.4
17	SON	CH2018	20.7	22.0	22.5	21.7	20.9	18.5
18	SON	TabsD	19.9	21.4	22.2	21.0	20.3	17.5
19	SON	Δ	0.8	0.6	0.4	0.6	0.6	1.0

Unter **RCP 8.5** ist die Modellgüte bei den jährlichen und saisonalen Werten insgesamt nur ausreichend. Auch die Beobachtungen der Regionen werden mehrheitlich nur ausreichend modelliert. Eine Ausnahme bildet die Region BasBro mit einer guten Modellierung.

## Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.135: Absolute Veränderung der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	2.9	2.7	2.7	2.8	2.9	2.9
DJF	1.8	1.6	1.5	1.2	1.7	1.9
MAM	1.9	1.8	1.8	1.9	1.9	1.9
JJA	2.9	2.7	2.7	2.8	2.9	2.9
SON	2.7	2.5	2.5	2.4	2.7	2.7

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 [°C]

Tab. 2.4.136: Absolute Veränderung der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	3.6	3.5	3.4	3.7	3.6	3.5
DJF	2.1	1.8	1.9	1.9	2.3	2.4
MAM	2.7	2.4	2.4	2.4	2.8	3.0
JJA	3.6	3.5	3.4	3.7	3.6	3.5
SON	3.7	3.8	3.9	3.7	3.8	3.6

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 [°C]

RCP4.5: Die Sehr seltenen Höchstwerte der Tageslufttemperatur nehmen auf Jahresbasis und im Kantonsdurchschnitt um 2.9 °C zu. Die Unterschiede zwischen den Regionen sind gering. Aus saisonaler Sicht besteht ein grosser Gegensatz zwischen Winter (DJF) und Frühling (MAM) auf der einen und Sommer (JJA) und Herbst (SON) auf der anderen Seite. Die Zunahmen im Sommer/Herbst sind rund 1 bis 1.2 °C grösser als im Winter/Herbst.

RCP8.5: Auf Jahresbasis beträgt die Erhöhung der sehr seltenen Jahreshöchstwerte gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 3.6 °C. Die regionalen Werte weichen nur wenig von diesem Kantonsdurchschnitt ab. Saisonal ist wiederum die bereits unter RCP4.5 erwähnte Zweigliederung in Winter/Frühjahr und Sommer/Herbst erkennbar. Die Unterschiede liegen hier mehrheitlich im Bereich von 1.5 - 2.0 °C.

## Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.137: Absolute Veränderung der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	2.9	2.9	2.8	2.6	2.9	3.1
DJF	1.8	1.6	1.6	1.7	2.0	2.3
MAM	2.0	1.8	2.0	1.8	1.9	2.3
JJA	2.9	2.9	2.8	2.6	2.9	3.1
SON	3.8	3.6	3.7	3.6	3.8	3.8

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 [°C]

Tab. 2.4.138: Absolute Veränderung der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	6.4	6.8	6.8	6.7	6.4	6.5
DJF	3.5	3.5	3.4	3.6	3.7	3.8
MAM	4.5	4.1	4.1	4.2	4.3	4.9
JJA	6.4	6.8	6.8	6.7	6.4	6.5
SON	7.3	7.4	7.2	7.3	7.4	6.9

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 [°C]

RCP 4.5: Auf Jahresbasis beträgt die Zunahme der Jahreswerte gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 im Kantonsdurchschnitt 2.9 °C – wie schon in der mittleren Zukunft. Auch hier sind die regionalen Unterschiede eher klein. Die grösste Zunahme ist in der Region PreAlp zu beobachten. Saisonal nehmen die Sehr seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur vom Winter (DJF) zum Herbst (SON) zu. Die Unterschiede zwischen den kleinsten Werten im Winter und den grössten Werten im Herbst sind beträchtlich und liegen im Bereich von 2 °C.

RCP 8.5: Unter diesem Szenario beträgt die Zunahme der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte auf Jahresbasis und im Kantonsdurchschnitt 6.4 °C. Das sind 3.5 °C mehr als unter dem Szenario 4.5 (!). Aus saisonaler Sicht ist die Erwärmung im Winter am kleinsten und im Herbst am grössten. Wiederum sind deutlich zwei Gruppen erkennbar, nämlich Winter/Frühling und Sommer/Herbst.

## Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt behandelt. Die Ergebnisse werden pro Szenario in zwei Tabellen zusammengefasst, die für sich selbst sprechen sollen.

Die erste Tabelle zeigt den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Es wird zwischen den Abweichungen auf Jahresbasis und – verdichtet zu einem einzigen Wert – auf saisonaler Basis unterschieden. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violetttöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode. Bei den in der Tabelle ausgewiesenen Abweichungen sind die Vorzeichen, also ob es sich um Zu- oder Abnahmen gegenüber der Referenzperiode handelt, nicht berücksichtigt.

In der zweiten Tabelle werden diese Informationen zu einer finalen Beurteilung der Abweichungen verdichtet (Abw. Y, Abw. Saisons). Diese finale Beurteilung erlaubt es in der Gesamtsynthese in Kapitel 2.5, den Grad der Abweichungen aller klimatischen Kenngrössen direkt zu vergleichen. Zusätzlich werden auch die Vorzeichen der Veränderungen berücksichtigt. Es ergibt sich aus dem Zusammenschluss der saisonalen Veränderungen im Kanton und in den Regionen: + bedeutet eine Zunahme der Werte im Vergleich zur Referenz, - eine Abnahme. ± bedeutet, dass die Vorzeichen der Veränderungen pro Saisons in den fünf Regionen nicht übereinstimmen, also kein einheitliches Bild entsteht. Die Stärke der Veränderungen wird mit der Anzahl der Plus- bzw. Minuszeichen beschrieben:

+/-: kleine Zu-/Abnahme            ++/- -: mittlere Zu-/Abnahme  
+++/- -: grosse Zu-/Abnahme    ++++/- -: sehr grosse Zu-/Abnahme

Die Beurteilung der Abweichungen der Lufttemperatur von der Referenzperiode 1981–2010 basiert auf absoluten Differenzen der Temperatur. Man beachte, dass die dazu benötigten Schwellenwerte gutachterlich festgelegt wurden (vgl. Kap. 2.3.5).

## RCP 4.5

Tab. 2.4.139: Synthese der Veränderungen der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	3	3	3	3	3	3
2055	Saisons	10	10	10	10	10	10
2085	Jahr	3	3	3	3	3	4
2085	Saisons	12	11	12	11	12	14

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.140: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Sehr Seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur unter RCP 4.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>gross</b>	+++	<b>gross</b>	++	++	+++	+++
um 2085	<b>gross</b>	+++	<b>gross</b>	++	++	+++	++++

## RCP 8.5

Tab. 2.4.141: Synthese der Veränderungen der Sehr seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	4	4	4	4	4	4
2055	Saisons	14	13	13	13	14	15
2085	Jahr	4	4	4	4	4	4
2085	Saisons	16	16	16	16	16	16

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.142: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Sehr Seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur unter RCP 8.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>sehr gross</b>	++++	<b>sehr gross</b>	+++	+++	++++	++++
um 2085	<b>sehr gross</b>	++++	<b>sehr gross</b>	++++	++++	++++	++++

## Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigen sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

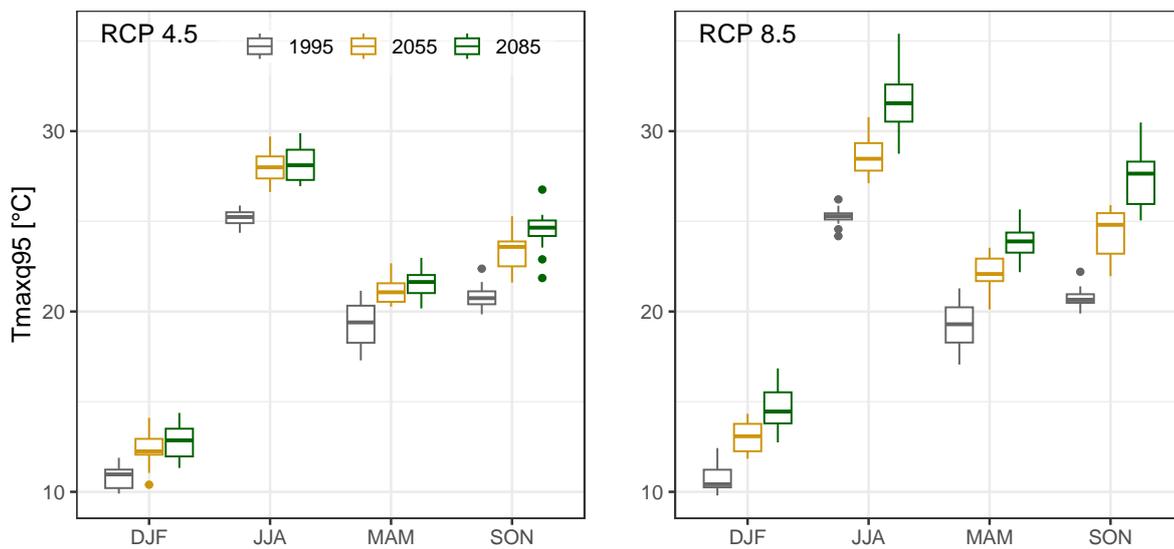


Abb. 2.32: Sehr seltene saisonale Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur im Kanton Freiburg: Die Box-plots zeigen die Streuung der 95%-Quantile von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

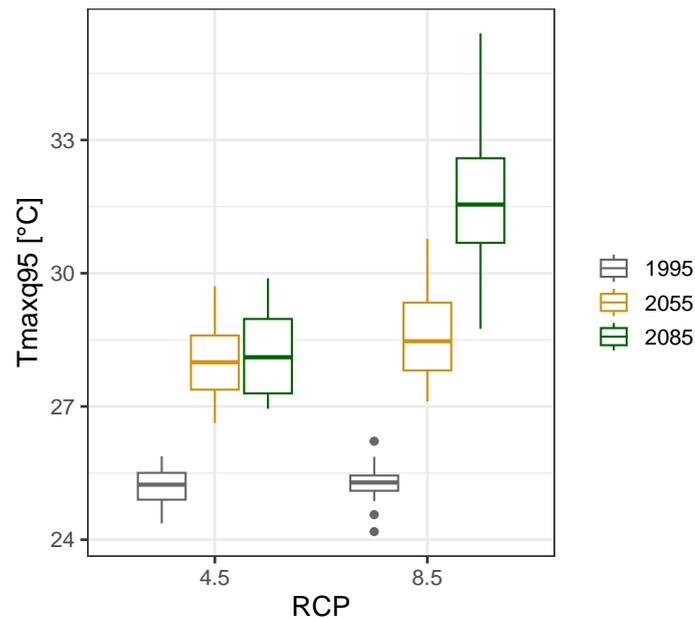


Abb. 2.33: Sehr seltene jährliche Höchstwerte der Tageslufttemperatur im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der 95 %-Quantile von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

#### 2.4.16 Extrem seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur

##### Definition der Kenngrösse

Extrem seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur [°C] einer 30-jährigen Periode in der Granularität Jahr und Saison.

*Vorgehen:* (1) Bestimmung der höchsten jährlichen und saisonalen Temperaturen pro Einzeljahr. (2) Aus der Verteilung dieser dreissig grössten Lufttemperaturen wird jener Wert bestimmt, der in 1% der Fälle über- und in 99% der Fälle unterschritten wird. Die Schwellenwerte zur Beurteilung der Modellgüte basieren auf den absoluten Werten, die gutachterlich festgelegt wurden (vgl. Kap. 2.3.5).

##### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte TabsD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden.

Tab. 2.4.143: Extrem seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur [°C]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 4.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	26.1	27.7	28.1	27.3	26.5	23.6
2	Y	TabsD	24.9	26.5	27.6	25.9	25.4	23.2
3	Y	Δ	1.2	1.3	0.6	1.4	1.0	0.4
5	DJF	CH2018	11.6	12.5	12.8	12.4	12.2	10.2
6	DJF	TabsD	11.9	13.1	12.1	12.9	13.0	10.0
7	DJF	Δ	-0.3	-0.6	0.6	-0.5	-0.8	0.3
9	MAM	CH2018	20.4	21.8	22.6	21.6	20.9	18.3
10	MAM	TabsD	22.3	23.3	23.6	23.2	23.1	19.9
11	MAM	Δ	-1.9	-1.6	-1.0	-1.6	-2.2	-1.6
13	JJA	CH2018	26.1	27.7	28.1	27.3	26.5	23.6
14	JJA	TabsD	24.9	26.5	27.6	25.9	25.4	23.2
15	JJA	Δ	1.2	1.3	0.6	1.4	1.0	0.4
17	SON	CH2018	21.5	23.0	23.6	22.5	21.8	19.4
18	SON	TabsD	21.7	23.1	22.9	22.7	22.6	19.1
19	SON	Δ	-0.2	-0.2	0.7	-0.2	-0.7	0.3

Unter **RCP 4.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte TabsD nur knapp ausreichend ab. So ist die Modellgüte in den Regionen PlaSud, PlaNor, BasBro und im ganzen Kanton ungenügend. Saisonal ist die Modellgüte im Frühjahr ungenügend und sonst ausreichend. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss diese insgesamt nur knapp genügende Modellgüte im Hinterkopf behalten werden.

Tab. 2.4.144: Extrem seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur [°C]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 8.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	25.9	27.6	28.2	27.2	26.3	23.5
2	Y	TabsD	24.9	26.5	27.6	25.9	25.4	23.2
3	Y	Δ	1.0	1.1	0.6	1.3	0.9	0.3
5	DJF	CH2018	11.8	12.6	12.9	12.4	12.3	10.2
6	DJF	TabsD	11.9	13.1	12.1	12.9	13.0	10.0
7	DJF	Δ	-0.2	-0.5	0.8	-0.5	-0.7	0.2
9	MAM	CH2018	20.7	22.1	22.8	21.8	21.1	18.4
10	MAM	TabsD	22.3	23.3	23.6	23.2	23.1	19.9
11	MAM	Δ	-1.6	-1.2	-0.8	-1.4	-2.0	-1.6
13	JJA	CH2018	25.9	27.6	28.2	27.2	26.3	23.5
14	JJA	TabsD	24.9	26.5	27.6	25.9	25.4	23.2
15	JJA	Δ	1.0	1.1	0.6	1.3	0.9	0.3
17	SON	CH2018	21.5	23.1	23.5	22.5	21.8	19.2
18	SON	TabsD	21.7	23.1	22.9	22.7	22.6	19.1
19	SON	Δ	-0.2	0.0	0.6	-0.2	-0.8	0.1

Unter **RCP 8.5** ist Modellgüte bei den Jahreswerten wiederum nur ausreichend. Ungenügend ist sie beim Kanton als Ganzes sowie in den Regionen BasBro und PlaNor, ausreichend in den Regionen GraMar und PlaSud und gut in der Region PreAlp. Auch saisonal ergibt sich ein unterschiedliches Bild. Die Modellgüte wechselt von ungenügend im Frühling (MAM) zu ausreichend im Sommer (JJA) und gut im Winter (DJF) und Herbst (SON). Auf regionaler Ebene wird die Region PlaSud ungenügend und die restlichen Regionen ausreichend modelliert.

## Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.145: Absolute Veränderung der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	2.5	2.6	2.5	2.5	2.5	2.6
DJF	1.3	1.3	1.2	1.3	1.4	1.7
MAM	1.9	1.8	1.7	1.7	1.8	2.1
JJA	2.5	2.6	2.5	2.5	2.5	2.6
SON	2.3	2.4	2.5	2.3	2.4	2.4

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 [°C]

Tab. 2.4.146: Absolute Veränderung der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	3.7	3.6	3.4	3.7	3.6	3.4
DJF	2.0	1.8	1.7	1.9	2.1	2.5
MAM	3.2	2.5	2.4	2.6	3.1	3.6
JJA	3.7	3.6	3.4	3.7	3.6	3.4
SON	4.0	4.2	4.2	4.0	3.9	4.2

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 [°C]

RCP 4.5: Die Extrem seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur nehmen auf Jahresbasis über den ganzen Kanton Freiburg hinweg um 2.5 °C gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 zu. Die Unterschiede zwischen den Regionen sind gering. Saisonal besteht ein Unterschied zwischen Winter (DJF)/Frühling (MAM) und Sommer (JJA)/Herbst (SON). Die Zunahmen sind im Sommer/Herbst deutlich höher.

RCP 8.5: Die Zunahme aus Jahressicht und im Kantonsdurchschnitt gegenüber der Referenzperiode ist hier um 1.2 °C grösser als unter RCP 4.5. Sie beträgt insgesamt 3.7 °C. Die Zunahme in den Regionen lassen kein klares Bild erkennen, also keine Unterschiede zwischen den tieferen und den höheren Regionen. Auf saisonaler Basis ist die Zunahme im Winter wesentlich kleiner als in den übrigen Jahreszeiten. Die grösste Zunahme ist im Herbst erkennbar.

## Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.147: Absolute Veränderung der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	2.9	2.7	2.5	2.6	2.8	3.1
DJF	2.2	1.7	1.7	1.9	2.1	2.3
MAM	1.7	1.7	1.6	1.5	1.6	2.2
JJA	2.9	2.7	2.5	2.6	2.8	3.1
SON	3.5	3.5	3.5	3.4	3.5	3.6

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 [°C]

Tab. 2.4.148: Absolute Veränderung der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	6.2	6.3	6.2	6.3	6.3	6.4
DJF	3.6	3.5	3.2	3.6	3.8	4.0
MAM	4.2	4.0	4.1	4.0	4.1	4.5
JJA	6.2	6.3	6.2	6.3	6.3	6.4
SON	7.5	7.4	7.5	7.5	7.5	7.2

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 [°C]

RCP 4.5: Die mittlere Zunahme im Kantons- und Jahresmittel beträgt 2.9 °C. Die Region PreAlp ist von der grössten Zunahme betroffen. Die Zunahmen gegenüber der Referenzperiode sind auf saisonaler Basis im Winter (DJF) und Frühjahr (MAM) bedeutend kleiner als im Sommer (JJA) und Herbst (SON). Auch hier sind die Zunahmen im Herbst am grössten.

RCP 8.5: Unter diesem Szenario nehmen die jährlichen Extrem seltenen Jahreshöchstwerte der Tagestemperatur gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 um 6.2 °C zu. Diese Zunahme ist um 3.3 °C höher als unter RCP 4.5. Saisonal besteht erneut ein sehr grosser Unterschied zwischen Winter/Frühjahr auf der einen und Sommer/Herbst auf der anderen Seite. Der Zunahme im Herbst ist beispielsweise mehr als doppelt so gross wie im Winter.

## Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt behandelt. Die Ergebnisse werden pro Szenario in zwei Tabellen zusammengefasst, die für sich selbst sprechen sollen.

Die erste Tabelle zeigt den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Es wird zwischen den Abweichungen auf Jahresbasis und – verdichtet zu einem einzigen Wert – auf saisonaler Basis unterschieden. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violetttöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode. Bei den in der Tabelle ausgewiesenen Abweichungen sind die Vorzeichen, also ob es sich um Zu- oder Abnahmen gegenüber der Referenzperiode handelt, nicht berücksichtigt.

In der zweiten Tabelle werden diese Informationen zu einer finalen Beurteilung der Abweichungen verdichtet (Abw. Y, Abw. Saisons). Diese finale Beurteilung erlaubt es in der Gesamtsynthese in Kapitel 2.5, den Grad der Abweichungen aller klimatischen Kenngrössen direkt zu vergleichen. Zusätzlich werden auch die Vorzeichen der Veränderungen berücksichtigt. Es ergibt sich aus dem Zusammenschluss der saisonalen Veränderungen im Kanton und in den Regionen: + bedeutet eine Zunahme der Werte im Vergleich zur Referenz, - eine Abnahme. ± bedeutet, dass die Vorzeichen der Veränderungen pro Saisons in den fünf Regionen nicht übereinstimmen, also kein einheitliches Bild entsteht. Die Stärke der Veränderungen wird mit der Anzahl der Plus- bzw. Minuszeichen beschrieben:

+/-: kleine Zu-/Abnahme            ++/- -: mittlere Zu-/Abnahme  
+++/- -: grosse Zu-/Abnahme    ++++/- -: sehr grosse Zu-/Abnahme

Die Beurteilung der Abweichungen der Lufttemperatur von der Referenzperiode 1981–2010 beruht auf absoluten Differenzen der Temperatur. Man beachte, dass die dazu benötigten Schwellenwerte gutachterlich festgelegt wurden (vgl. Kap. 2.3.5).

## RCP 4.5

Tab. 2.4.149: Synthese der Veränderungen der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	3	3	3	3	3	3
2055	Saisons	10	10	10	10	10	11
2085	Jahr	3	3	3	3	3	4
2085	Saisons	12	11	11	11	12	14

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.150: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur unter RCP 4.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>gross</b>	+++	<b>gross</b>	++	++	+++	+++
um 2085	<b>gross</b>	+++	<b>gross</b>	++	++	+++	++++

## RCP 8.5

Tab. 2.4.151: Synthese der Veränderungen der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	4	4	4	4	4	4
2055	Saisons	15	13	13	13	15	15
2085	Jahr	4	4	4	4	4	4
2085	Saisons	16	16	16	16	16	16

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.152: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der Extrem seltenen Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur unter RCP 8.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>sehr gross</b>	++++	<b>sehr gross</b>	+++	+++	++++	++++
um 2085	<b>sehr gross</b>	++++	<b>sehr gross</b>	++++	++++	++++	++++

## Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigen sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

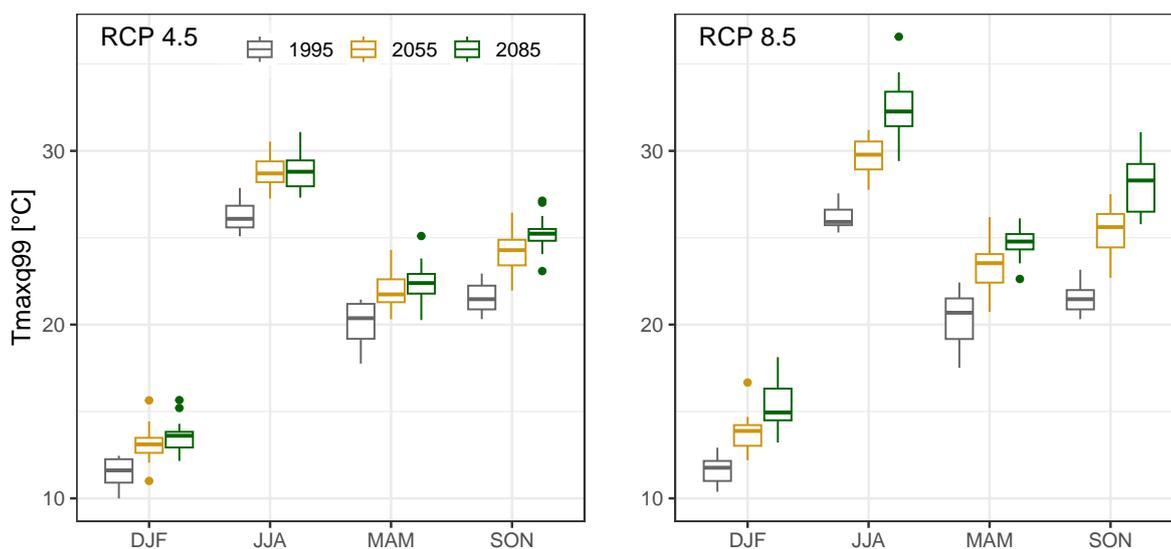


Abb. 2.34: Extrem seltene saisonale Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur im Kanton Freiburg: Die Box-plots zeigen die Streuung der 99 %-Quantile von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

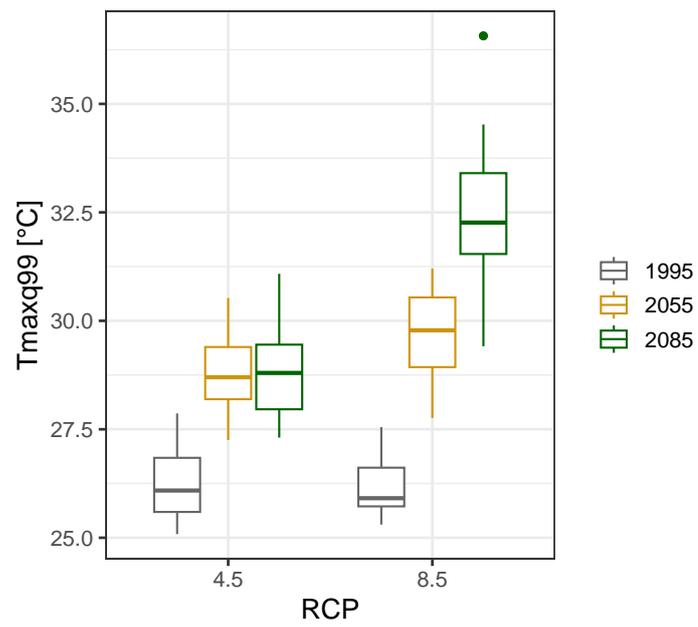


Abb. 2.35: Extrem seltene jährliche Höchstwerte der Tageslufttemperatur im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der 99 %-Quantile von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

## 2.4.17 Mittlere Anzahl heisser Tage pro Jahr

### Definition der Kenngrösse

Mittlere Anzahl heisser Tage pro Jahr [d/dt]. Die Beurteilung dieser Kenngrösse wird nur auf Jahresbasis durchgeführt.

Vorgehen: (1) Bestimmung der Anzahl der Anzahl heisser Tage in den Einzeljahren, also Tage mit einer mittleren Lufttemperatur > 20 °C. (2) Aus der Verteilung der Anzahl warmer Tage der Einzeljahre wird der Mittelwert gebildet.

### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte TabsD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden.

Bei dieser Kenngrösse sind die Ausgangswerte der Periode 1981–2010 oftmals klein bis sehr klein. Dies führt dazu, dass bereits kleine absolute Veränderungen grosse relative Veränderungen nach sich ziehen. Deshalb werden hier sowohl die absoluten als auch die relativen Differenzen zwischen den Referenzwerten und den Modellwerten ausgewiesen. Für die Beurteilung stützen wir uns aber auf die objektiven relativen Veränderungen ab.

Tab. 2.4.153: Mittlere Anzahl heisser Tage pro Jahr [d/dt]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	CH2018	11.5	27.5	34.0	23.0	14.5	1
Y	TabSD	10.0	25.5	32.0	21.5	12.5	1
Y	$\Delta$	1.5	2.0	2.0	1.5	2.0	0
Y	$\Delta\%$	15.0	7.8	6.2	7.0	16.0	0

Unter **RCP 4.5** ist die Modellgüte gut. Die Abweichungen betragen höchstens zwei Tage, wobei – das ist hier nochmals zu betonen – die Werte der Referenzwert sich stark unterscheiden (s. oben).

Tab. 2.4.154: Mittlere Anzahl heisser Tage pro Jahr [d/dt]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	CH2018	11.8	27.0	34.0	22.5	14.5	1
Y	TabSD	10.0	25.5	32.0	21.5	12.5	1
Y	$\Delta$	1.8	1.5	2.0	1.0	2.0	0
Y	$\Delta\%$	17.5	5.9	6.2	4.7	16.0	0

Auch unter **RCP 8.5** ist die Modellgüte wiederum gut. Die absoluten Differenzen zwischen Referenz und Modell liegen unter zwei Tagen.

### Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.155: Absolute und relative Veränderungen der Mittleren Anzahl heisser Tage pro Jahr in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	$\Delta$	19.5	21.5	23.5	21.2	18.5	9.5
Y	$\Delta\%$	169.6	78.2	69.1	92.2	127.6	950.0

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.156: Absolute und relative Veränderungen der Mittleren Anzahl heisser Tage pro Jahr in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	$\Delta$	24	30.2	32.8	27.2	23.8	11.5
Y	$\Delta\%$	203.4	111.9	96.5	120.9	164.1	1150.0

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Im Kantonsmittel und in den Regionen BasBro, GraMar und PlaNor verdoppelt sich die Anzahl der warmen Tage im Vergleich zur Referenzperiode 1981–2010 beinahe. In der Region PreAlp nimmt die mittlere Anzahl heisser Tage von 1 auf rund 10 zu.

RCP 8.5: Gegenüber RCP 4.5 sind die Werte hier 2 (PreAlp) bis rund 9 Tage (BasBro, GraMar) grösser, im Kantonsmittel um rund fünf Tage.

### Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.157: Absolute und relative Veränderungen der Mittleren Anzahl heisser Tage pro Jahr in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	$\Delta$	23	28	29.8	26.5	23.5	11.5
Y	$\Delta\%$	200.0	101.8	87.6	115.2	162.1	1150.0

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.158: Absolute und relative Veränderungen der Mittleren Anzahl heisser Tage pro Jahr in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	$\Delta$	48.2	56.2	56.5	54	48.2	30.5
Y	$\Delta\%$	408.5	208.1	166.2	240.0	332.4	3050.0

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Im Kantonsmittel sowie in den Regionen BasBro, GraMar und PlaNor verdoppelt sich die Anzahl der heissen Tage im Vergleich zur Referenzperiode. In der hoch gelegenen Region PreAlp ist die Zunahme relativ gesehen sehr gross.

RCP 8.5: Unter dem Szenario RCP 8.5 verdreifacht sich die Anzahl der warmen Tage im Vergleich zu RCP 4.5 für PreAlp und für alle anderen Regionen verdoppelt sie sich. Wie schon beim 4.5-Szenario ist der relative Anstieg der Anzahl heisser Tage in der hochgelegenen Region PreAlp sehr gross.

### Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt behandelt. Die Ergebnisse werden tabellarisch zusammengefasst. Die Tabellen zeigen den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf

Regionen. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violetttöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode.

Aufgrund der kleinen bis sehr kleinen Ausgangswerte und den festgestellten relativ grossen Zunahmen ergeben sich sehr grosse Prozentwerte bei den Veränderungen mit einem Wertebereich zwischen +69% und +3050%, wobei die Hälfte der Werte zwischen +69% und +189% liegen. Drei Viertel der Zunahmen liegen zudem unter 284%. Bei einer Zunahme um 100% verdoppeln sich die Ausgangswerte, bei 200% verdreifachen sie sich. Aufgrund dieser Ausgangslage wurden die Schwellenwerte zur Bestimmung des Grads der Zunahmen gutachterlich wie folgt festgelegt:

klein: < 25 %

mittel: 25 bis < 75 %

gross: 75 bis < 150 %

sehr gross: > 150 %

### RCP 4.5

Tab. 2.4.159: Synthese der Veränderungen der Mittleren Anzahl heisser Tage pro Jahr basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	4	3	2	3	3	4
2085	Jahr	4	3	3	3	4	4

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

### RCP 8.5

Tab. 2.4.160: Synthese der Veränderungen der Mittleren Anzahl heisser Tage pro Jahr basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	4	3	3	3	4	4
2085	Jahr	4	4	4	4	4	4

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

### Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgende Abbildung fasst die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigt sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16

Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

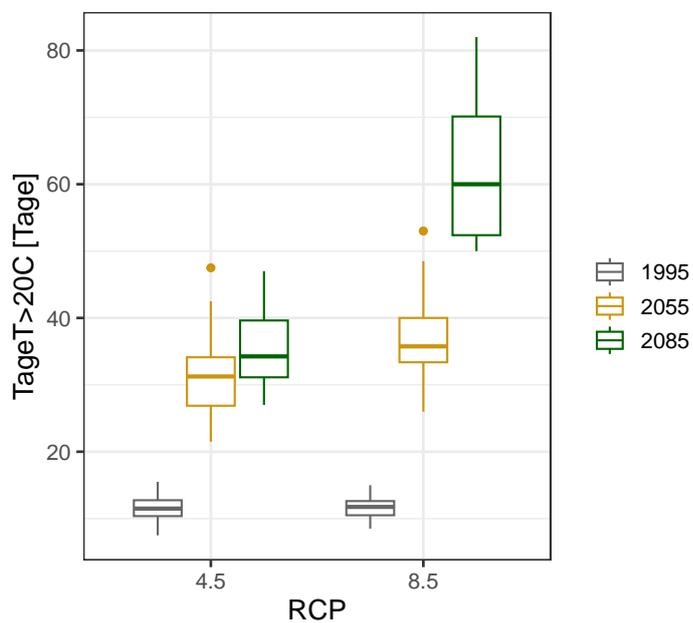


Abb. 2.36: Mittlere Anzahl heisser Tage pro Jahr im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

## 2.4.18 Mittlere Anzahl sehr heisser Tage pro Jahr

### Definition der Kenngrösse

Mittlere Anzahl sehr heisser Tage pro Jahr [d/dt]. Die Beurteilung dieser Kenngrösse wird nur auf Jahresbasis durchgeführt.

Vorgehen: 1) Bestimmung der Anzahl der Anzahl sehr heisser Tage in den Einzeljahren, also Tage mit einer mittleren Lufttemperatur > 25 °C. (2) Aus der Verteilung der Anzahl sehr heisser Tage der Einzeljahre wird der Mittelwert gebildet.

### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte TabsD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden.

Da die meisten Referenz- bzw. Ausgangswerte den Wert 0 haben bzw. zwischen 0 und 1 liegen, können bei dieser Kenngrösse keine Prozentwerte ausgewiesen werden (Problem: Division durch 0). Deshalb können die bei den heissen Tagen angewandten Schwellenwerte nicht verwendet werden. Es macht aber keinen Sinn, bei den sehr heissen Tagen ein eigenes Bewertungssystem einzuführen, weil die Vergleichbarkeit dann nicht gegeben ist. Deshalb geben wir bei der Darstellung der Veränderungen nur das Ausmass der Zunahme in Tagen [d] aus und verzichten auch auf eine Synthese.

Tab. 2.4.161: Mittlere Anzahl sehr heisser Tage pro Jahr [d/dt]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	CH2018	o	o	o	o	o	o
Y	TabsD	o	o	o	o	o	o
Y	Δ	o	o	o	o	o	o

Unter **RCP 4.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte TabsD sehr gut ab.

Tab. 2.4.162: Mittlere Anzahl sehr heisser Tage pro Jahr [d/dt]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	CH2018	0	0	0	0	0	0
Y	TabSD	0	0	0	0	0	0
Y	Δ	0	0	0	0	0	0

Unter **RCP 8.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte TabsD auch unter diesem Szenario sehr gut ab.

### Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.163: Absolute und relative Veränderungen der Mittleren Anzahl sehr heisser Tage pro Jahr in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	1	4.8	6.2	3.8	2	0

Tab. 2.4.164: Absolute und relative Veränderungen der Mittleren Anzahl sehr heisser Tage pro Jahr in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	1.8	5.8	7	4	2.2	0

RCP 4.5: Im Gegensatz zur Referenzperiode treten nun in allen Regionen ausser in der Region PreAlp einige sehr heisse Tage auf. Es ist selbsterklärend, dass die Anzahl in den tiefer gelegenen Regionen grösser ist als in den hoch gelegenen.

RCP 8.5: Die Zunahmen der Anzahl sehr heisser Tage im Vergleich zur Referenzperiode sind unter diesem Szenario etwa 1 Tag grösser als unter RCP 4.5. Das räumliche Muster bleibt dasselbe.

## Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.165: Absolute und relative Veränderungen der Mittleren Anzahl sehr heisser Tage pro Jahr in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	1.5	5.3	8	4	2.8	0

Tab. 2.4.166: Absolute und relative Veränderungen der Mittleren Anzahl sehr heisser Tage pro Jahr in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	12	23	24.8	18	11.5	3.5

Während die Grössenordnung der Zunahme unter RCP 4.5 jener der mittleren Zukunft entspricht, präsentiert das Szenario RCP 8.5 eine «andere Welt». In den tiefer gelegenen Regionen liegt die Mittlere Anzahl sehr heisser Tage pro Jahr im Bereich von 20 bis 25 Tagen, in den mittleren Lagen (PlaNor, PlaSud) 10 bis 20 Tage. Und auch in der Region PreAlp treten unter diesem Szenario erstmals sehr heisse Tage auf.

### Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgende Abbildung fasst die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigt sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

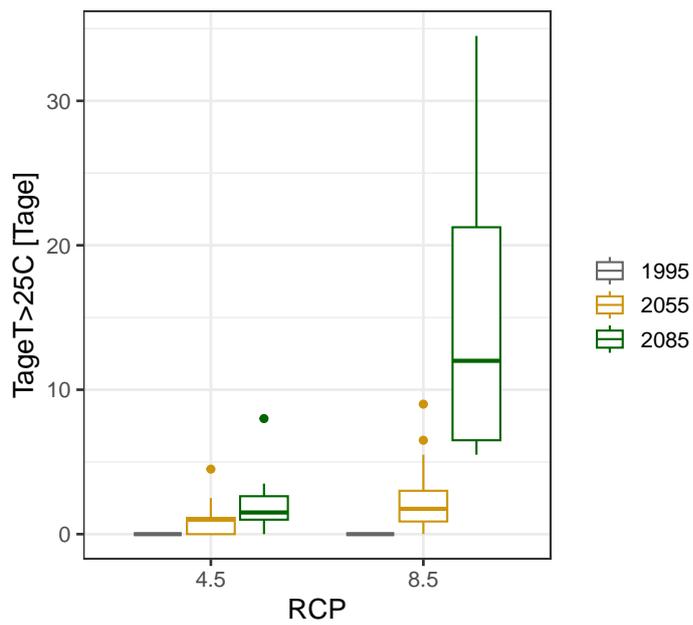


Abb. 2.37: Mittlere Anzahl sehr heisser Tage pro Jahr im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

## 2.4.19 Mittlere Anzahl kalter Tage pro Jahr

### Definition der Kenngrösse

Mittlere Anzahl kalter Tage pro Jahr [d/dt]. Die Beurteilung dieser Kenngrösse wird nur auf Jahresbasis durchgeführt.

Vorgehen: (1) Bestimmung der Anzahl kalter Tage in den Einzeljahren, also Tage mit einer mittleren Lufttemperatur  $< 0^{\circ}\text{C}$ . (2) Aus der Verteilung der Anzahl der Eistage der Einzeljahre wird der Mittelwert gebildet.

### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte TabsD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden.

Tab. 2.4.167: Mittlere Anzahl kalter Tage pro Jahr [d/dt]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	CH2018	56.0	42	35.0	48.2	55.0	80.2
Y	TabsD	57.5	42	34.5	47.5	56.0	82.5
Y	$\Delta$	-1.5	0	0.5	0.8	-1.0	-2.2
Y	$\Delta\%$	-2.6	0	1.4	1.6	-1.8	-2.7

Unter **RCP 4.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte TabsD durchwegs sehr gut ab.

Tab. 2.4.168: Mittlere Anzahl kalter Tage pro Jahr [d/dt]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	CH2018	57.0	41.8	34.8	47.8	55.0	80.8
Y	TabsD	57.5	42.0	34.5	47.5	56.0	82.5
Y	$\Delta$	-0.5	-0.2	0.2	0.2	-1.0	-1.8
Y	$\Delta\%$	-0.9	-0.6	0.7	0.5	-1.8	-2.1

Auch unter **RCP 8.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte TabsD durchwegs sehr gut ab.

## Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.169: Absolute und relative Veränderungen der Mittleren Anzahl kalter Tage pro Jahr in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissions-szenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	$\Delta$	-20.5	-19.5	-16.8	-19.8	-20	-24
Y	$\Delta\%$	-36.6	-46.4	-48.0	-41.1	-36.4	-29.9

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.170: Absolute und relative Veränderungen der Mittleren Anzahl kalter Tage pro Jahr in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissions-szenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	$\Delta$	-26.5	-20.2	-17.8	-21.5	-23.5	-33
Y	$\Delta\%$	-46.5	-48.3	-51.1	-45.0	-42.7	-40.8

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Die mittlere Zahl kalter Tage pro Jahr hat sich gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 in einem sehr gros-sen Ausmass verändert. Die Anzahl hat unter RCP 4.5 im Kantonsmittel um 21 Tage und unter RCP 8.5 um 27 Tage abgenommen. Relativ gesehen sind die Abnahmen in den tieferen Lagen (BasBro bis PlaSud) grösser als in der Region PreAlp.

## Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.171: Absolute und relative Veränderungen der Mittleren Anzahl kalter Tage pro Jahr in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissions-szenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	$\Delta$	-26.5	-22.2	-19.5	-24.2	-26	-29.8
Y	$\Delta\%$	-47.3	-52.9	-55.7	-50.2	-47.3	-37.2

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.172: Absolute und relative Veränderungen der Mittleren Anzahl kalter Tage pro Jahr in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	$\Delta$	-40.8	-32.5	-29.2	-34.2	-39	-52.2
Y	$\Delta\%$	-71.6	-77.8	-83.9	-71.5	-70.9	-64.6

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Die Abnahme der mittleren Anzahl kalter Tage gegenüber der Referenzperiode beträgt unter RCP4.5 im Kantonsmittel 27 Tage und erhöht sich dann unter RCP8.5 auf 41 Tage. Relativ gesehen sind das 47 bzw. 72 %. Wiederum sind die relativen Abnahmen in der Region PreAlp am kleinsten.

### Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP4.5 und RCP8.5 werden getrennt behandelt. Die Ergebnisse werden tabellarisch zusammengefasst. Die Tabellen zeigen den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violetttöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode.

### RCP4.5

Tab. 2.4.173: Synthese der Veränderungen der Mittleren Anzahl kalter Tage pro Jahr basierend auf dem Emissionsszenario RCP4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	4	4	4	4	4	4
2085	Jahr	4	4	4	4	4	4

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

## RCP 8.5

Tab. 2.4.174: Synthese der Veränderungen der Mittleren Anzahl kalter Tage pro Jahr basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	4	4	4	4	4	4
2085	Jahr	4	4	4	4	4	4

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

### Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgende Abbildung fasst die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigt sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50% der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

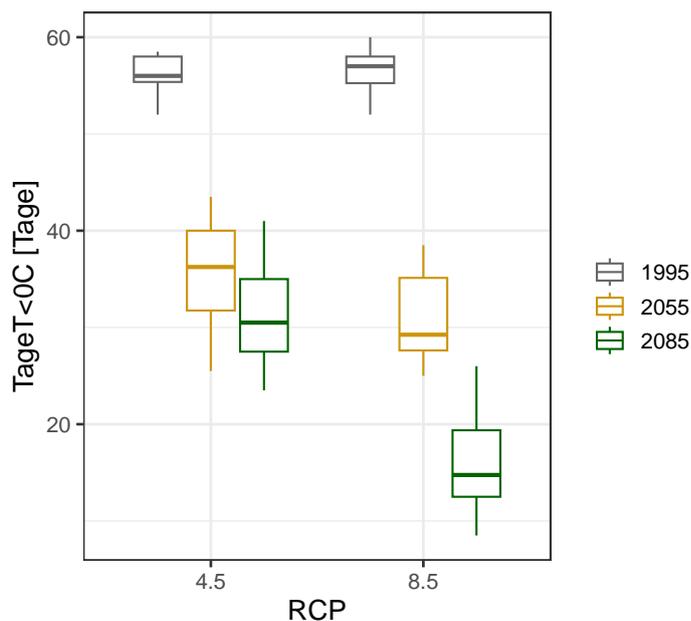


Abb. 2.38: Mittlere Anzahl kalter Tage pro Jahr im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

## 2.4.20 Mittlere Anzahl sehr kalter Tage pro Jahr

### Definition der Kenngrösse

Mittlere Anzahl sehr kalter Tage pro Jahr [d/dt]. Die Beurteilung dieser Kenngrösse wird nur auf Jahresbasis durchgeführt.

Vorgehen: (1) Bestimmung der Anzahl sehr kalter Tage in den Einzeljahren, also Tage mit einer mittleren Lufttemperatur  $< -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . (2) Aus der Verteilung der Anzahl sehr kalter Tage der Einzeljahre wird der Mittelwert gebildet.

### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte TabsD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden.

Tab. 2.4.175: Mittlere Anzahl sehr kalter Tage pro Jahr [d/dt]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	CH2018	9.8	4.5	2.8	6.8	9.8	21.8
Y	TabSD	8.5	4.0	3.0	6.0	9.0	22.0
Y	$\Delta$	1.2	0.5	-0.2	0.8	0.8	-0.2
Y	$\Delta\%$	14.7	12.5	-8.3	12.5	8.3	-1.1

Unter **RCP 4.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte TabsD gut ab. Die Modellgüte variiert relativ stark zwischen den Regionen. So wird die Region PreAlp sehr gut und die Region BasBro nur ausreichend abgebildet.

Tab. 2.4.176: Mittlere Anzahl sehr kalter Tage pro Jahr [d/dt]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	CH2018	10.8	4	2.5	6.8	10.2	22
Y	TabsD	8.5	4	3.0	6.0	9.0	22
Y	$\Delta$	2.2	0	-0.5	0.8	1.2	0
Y	$\Delta\%$	26.5	0	-16.7	12.5	13.9	0

Unter **RCP 8.5** ist die Modellgüte insgesamt nur ausreichend. Auffallend sind die grossen Unterschiede zwischen den einzelnen Regionen.

### Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.177: Absolute und relative Veränderungen der Mittleren Anzahl sehr kalter Tage pro Jahr in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	$\Delta$	-6.5	-3.5	-2.5	-4.5	-6.2	-11.8
Y	$\Delta\%$	-66.3	-77.8	-89.3	-66.2	-63.3	-54.1

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.178: Absolute und relative Veränderungen der Mittleren Anzahl sehr kalter Tage pro Jahr in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	$\Delta$	-7.5	-4	-2.5	-5.8	-7.2	-12
Y	$\Delta\%$	-69.4	-100.0	-100.0	-85.3	-70.6	-54.5

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Bei beiden Szenarien nimmt die mittlere Anzahl der sehr kalten Tage in relativer Sicht in einem sehr grossen Ausmass ab: -66 % unter RCP 4.5 und -69 % unter RCP 8.5 (im Kantonsmittel). Das entspricht 7–8 Tagen. Relativ gesehen sind die Abnahmen in den tieferen Lagen grösser als in der Region PreAlp.

## Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.179: Absolute und relative Veränderungen der Mittleren Anzahl sehr kalter Tage pro Jahr in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	$\Delta$	-7	-4	-2.8	-5.2	-7	-13.5
Y	$\Delta\%$	-71.4	-88.9	-100.0	-76.5	-71.4	-61.9

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.180: Absolute und relative Veränderungen der Mittleren Anzahl sehr kalter Tage pro Jahr in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	$\Delta$	-10.2	-4	-2.5	-6.8	-10	-20
Y	$\Delta\%$	-94.4	-100.0	-100.0	-100.0	-98.0	-90.9

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Unter RCP 4.5 nähern sich die relativen Abnahmen -100 %; d.h., die sehr kalten Tage verschwinden allmählich. Unter RCP 8.5 werden sie kaum noch auftreten.

## Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt behandelt. Die Ergebnisse werden tabellarisch zusammengefasst. Die Tabellen zeigen den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violetttöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode.

## RCP 4.5

Tab. 2.4.181: Synthese der Veränderungen der Mittleren Anzahl sehr kalter Tage pro Jahr basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	4	4	4	4	4	4
2085	Jahr	4	4	4	4	4	4

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

## RCP 8.5

Tab. 2.4.182: Synthese der Veränderungen der Mittleren Anzahl sehr kalter Tage pro Jahr basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	4	4	4	4	4	4
2085	Jahr	4	4	4	4	4	4

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Gesamtbewertung: sehr grosse Abweichung gegenüber der Referenzperiode 1981–2010

### Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgende Abbildung fasst die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigt sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

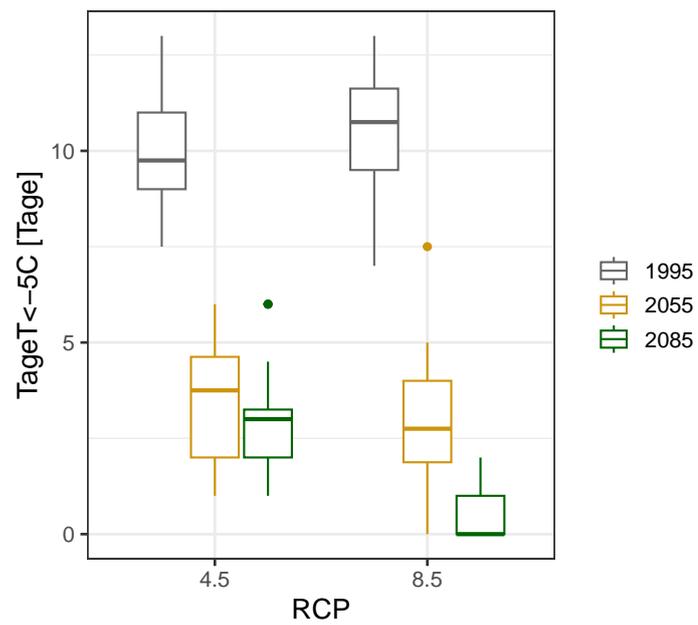


Abb. 2.39: Mittlere Anzahl sehr kalter Tage pro Jahr im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

## 2.4.21 Mittlere Anzahl Tage bis zum Erreichen der Grünlandtemperatursumme von 200 °C

### Definition der Kenngrösse

Mittlere Anzahl Tage bis zum Erreichen der Grünlandtemperatursumme von 200 °C [d/dt]. Man beachte, dass bei dieser Kenngrösse nur ein Wert pro Jahr bestimmt werden kann.

Vorgehen: (1) Berechnung der Grünlandtemperatursumme durch Aufsummierung der positiven Tagesmitteltemperaturen, wobei die Positivtemperaturen im Januar mit dem Faktor 0.5, im Februar mit dem Faktor 0.75 und ab März mit dem Faktor 1 multipliziert werden. (2) Bestimmung des Tages im Jahr, an dem die Temperatursumme von 200 °C erreicht wird. (3) Mittelung dieser Tage, um den charakteristischen Wert für die jeweilige 30-Jahres-Periode zu erhalten.

### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte TabsD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden.

Tab. 2.4.183: Mittlere Anzahl der Tage bis zum Erreichen der Grünlandtemperatursumme von 200 °C [d/dt]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	CH2018	107	92	87	96	105	134
Y	TabsD	107	91	87	96	105	133
Y	$\Delta$	0	1	0	0	0	1
Y	$\Delta\%$	0	1	0	0	0	1

Unter **RCP 4.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte TabsD sehr gut ab.

Tab. 2.4.184: Mittlere Anzahl der Tage bis zum Erreichen der Grünlandtemperatursumme von 200 °C [d/dt]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	CH2018	108	92	87	96	105	134
Y	TabSD	107	91	87	96	105	133
Y	$\Delta$	0	1	0	0	0	2
Y	$\Delta\%$	0	1	0	0	0	1

Unter **RCP 8.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte TabsD erneut sehr gut ab.

### Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.185: Absolute und relative Veränderungen der mittleren Anzahl der Tage bis zum Erreichen der Grünlandtemperatursumme in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	-15	-16	-15	-16	-16	-19

■ -21 ■ -14 ■ -7 ■ 7 ■ 14 ■ 21 ■ [d]

Tab. 2.4.186: Absolute und relative Veränderungen der mittleren Anzahl der Tage bis zum Erreichen der Grünlandtemperatursumme in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	-19	-19	-17	-20	-19	-25

■ -21 ■ -14 ■ -7 ■ 7 ■ 14 ■ 21 ■ [d]

RCP 4.5: Die Grünlandtemperatursumme wird unter diesem Szenario im Kantonsmittel durchschnittlich 15 Tage früher erreicht, in der Region PreAlp gar 19 Tage früher. Es handelt sich demnach durchwegs um grosse Abnahmen.

RCP 8.5: Bei diesem Szenario wird die Grünland Temperatursumme im Mittel 19 Tage früher erreicht als in der Referenzperiode. Die Veränderungen liegen im Übergangsbereich zwischen gross und sehr gross.

## Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.187: Absolute und relative Veränderungen der mittleren Anzahl der Tage bis zum Erreichen der Grünlandtemperatursumme in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	-22	-19	-16	-21	-23	-24

■ -21 
 ■ -14 
 ■ -7 
 ■ 7 
 ■ 14 
 ■ 21 
 ■ [d]

Tab. 2.4.188: Absolute und relative Veränderungen der mittleren Anzahl der Tage bis zum Erreichen der Grünlandtemperatursumme in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	-38	-32	-29	-34	-39	-52

■ -21 
 ■ -14 
 ■ -7 
 ■ 7 
 ■ 14 
 ■ 21 
 ■ [d]

RCP 4.5: Durchschnittlich wird die Grünlandtemperatursumme im Vergleich zur Referenzperiode rund drei Wochen früher erreicht. Das entspricht mehrheitlich sehr grossen Abnahmen.

RCP 8.5: Die Grünlandtemperatursumme wird hier im Vergleich zur Referenzperiode rund fünf Wochen früher erreicht, in der Region PreAlp sogar um sieben bis acht Wochen früher. Es handelt sich also insgesamt um sehr grosse Veränderungen.

## Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt behandelt. Die Ergebnisse werden tabellarisch zusammengefasst. Die Tabellen zeigen den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violetttöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode.

## RCP 4.5

Tab. 2.4.189: Synthese der Veränderung der mittleren Anzahl der Tage bis zum Erreichen der Grünlandtemperatursumme basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	3	3	3	3	3	3
2085	Jahr	4	3	3	4	4	4

■ klein | 
 ■ mittel | 
 ■ gross | 
 ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.190: Synthese der Veränderung der mittleren Anzahl der Tage bis zum Erreichen der Grünlandtemperatursumme basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	3	3	3	3	3	4
2085	Jahr	4	4	4	4	4	4

■ klein | 
 ■ mittel | 
 ■ gross | 
 ■ sehr gross | [-]

### Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgende Abbildung fasst die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigen sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

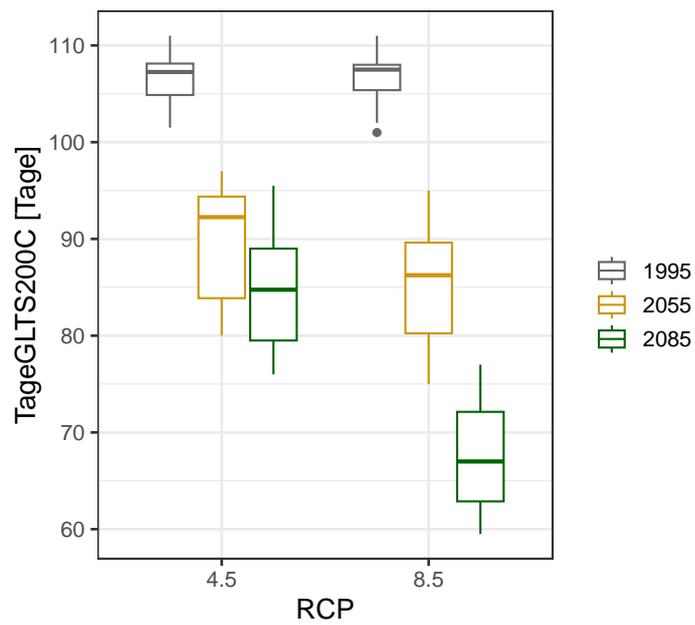


Abb. 2.40: Mittlere jährliche mittlere Anzahl der Tage bis zum Erreichen der Grünlandtemperatursumme von 200 °C im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

#### 2.4.22 Mittlere Anzahl Tage mit Spätfröst

Mittlere Anzahl Tage mit Spätfröst [d/dt]. Spätfrösttage treten nach dem Erreichen einer Grünlandtemperatursumme von 200 °C auf, wenn die Tagesmitteltemperatur < 5 °C beträgt.

Vorgehen: (1) Die Berechnung der Grünlandtemperatursumme durch Aufsummierung der positiven Tagesmitteltemperaturen führt in jedem Jahr zum Tag, der für die folgenden Berechnungen relevant ist. Ab diesem Tag wird geprüft, ob Tage mit Spätfröst auftreten. Handelt es sich um einen Spätfrösttag, wird er aufsummiert und so erhält man die Anzahl Tage mit Spätfröst. (2) Mittelung der einzeljährigen Anzahl der Tage mit Spätfröst, um den charakteristischen Wert für die jeweilige 30-Jahres-Periode zu erhalten.

#### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte TabsD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden.

Bei dieser Kenngrösse sind die Ausgangswerte der Periode 1981–2010 sehr klein. Dies führt dazu, dass bereits kleine absolute Veränderungen grosse relative Veränderungen nach sich ziehen. Deshalb werden hier sowohl die absoluten als auch die relativen Differenzen zwischen den Referenzwerten und den Modellwerten ausgewiesen.

Tab. 2.4.191: Mittlere Anzahl Tage mit Spätfröst [d/dt]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	CH2018	3.5	2.5	2.5	2.2	3.5	0.5
Y	TagsD	4.0	5.0	4.0	5.5	4.0	2.0
Y	Δ	-0.5	-2.5	-1.5	-3.2	-0.5	-1.5
Y	Δ%	-12.5	-50.0	-37.5	-59.1	-12.5	-75.0

Tab. 2.4.192: Mittlere Anzahl Tage mit Spätfrost [d/dt]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	CH2018	3	2	2.2	2.0	3	0.8
Y	TabSD	4	5	4.0	5.5	4	2.0
Y	$\Delta$	-1	-3	-1.8	-3.5	-1	-1.2
Y	$\Delta\%$	-25	-60	-43.8	-63.6	-25	-62.5

Bei beiden Szenarien ist eine objektive Beurteilung der Modellgüte schwierig, weil kleine absolute Veränderungen zu sehr grossen relativen Veränderungen führen, dies aufgrund der sehr kleinen Referenzwerte. Vermutlich kann das Modell aber trotzdem eingesetzt werden, um eine Grössenordnung der Veränderungen der Spätfrosttage aufzuzeigen.

### Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.193: Absolute und relative Veränderungen der mittleren Anzahl Tage mit Spätfrost in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	$\Delta$	1.5	1	1.8	1.8	1.5	2.5
Y	$\Delta\%$	42.9	40.0	72.0	81.8	42.9	500.0

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.194: Absolute und relative Veränderungen der mittleren Anzahl Tage mit Spätfrost in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	$\Delta$	1.2	1.5	1.2	2	1.2	3.2
Y	$\Delta\%$	40.0	75.0	54.5	100.0	40.0	400.0

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Die mittlere Zahl der Tage mit Spätfrost nimmt im Kanton und dessen Regionen unter RCP 4.5 um 1 bis 2.5 Tage zu. Das ist angesichts der kleineren Referenzwerte der Periode 1981–2010 eine sehr grosse Zunahme. Die Zunahmen unter RCP 8.5 liegen in derselben Grössenordnung. Die grösste Zunahme betrifft in beiden

Szenarien die Region PreAlp, wo sich die mittlere Anzahl der Tage mit Spätfrost gegenüber der Referenz mehr als verdoppeln.

### Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.195: Absolute und relative Veränderungen der mittleren Anzahl Tage mit Spätfrost in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	$\Delta$	1.8	0.5	1.2	1	1.8	2.8
Y	$\Delta\%$	51.4	20.0	48.0	45.5	51.4	560.0

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.196: Absolute und relative Veränderungen der mittleren Anzahl Tage mit Spätfrost in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	$\Delta$	4	2	1.5	2.5	3	7.8
Y	$\Delta\%$	133.3	100.0	68.2	125.0	100.0	975.0

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Unter RCP 4.5 nimmt die Anzahl der Spätfrosttage gegenüber der Referenzperiode in derselben Grössenordnung zu. Unter RCP 8.5 ist die Anzahl bedeutend höher, insbesondere in der Region PreAlp. Das hängt damit zusammen, dass die Grünlandtagtemperatursumme bei diesem Szenario sehr viel früher als in der Referenzperiode erreicht wird.

### Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt behandelt. Die Ergebnisse werden tabellarisch zusammengefasst. Die Tabellen zeigen den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violettöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode.

## RCP 4.5

Tab. 2.4.197: Synthese der Veränderungen der mittleren Anzahl Tage mit Spätfrost basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	4	4	4	4	4	4
2085	Jahr	4	4	4	4	4	4

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

## RCP 8.5

Tab. 2.4.198: Synthese der Veränderungen der mittleren Anzahl Tage mit Spätfrost basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	4	4	4	4	4	4
2085	Jahr	4	4	4	4	4	4

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

### Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgende Abbildung fasst die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigt sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50% der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

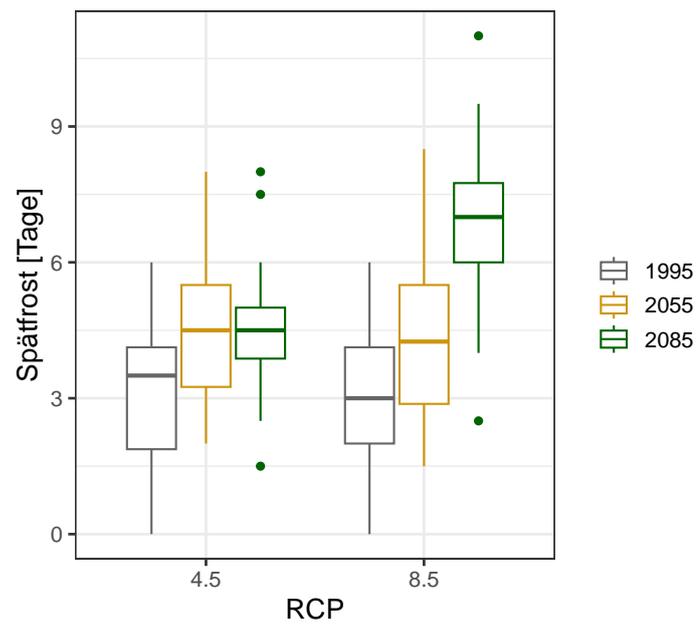


Abb. 2.41: Mittlere jährliche Anzahl Tage mit Spätfrost im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

### 2.4.23 Potenzielle Verdunstung

#### Definition der Kenngrösse

Potenzielle Verdunstung [mm/dt] berechnet nach dem Hamon-Ansatz in der Granularität Jahr und Saison. Der Hamon-Ansatz ist ein vielfach verwendetes Verfahren, um die potenzielle Verdunstung aus der Lufttemperatur zu berechnen.

Vorgehen: (1) Berechnung der potenziellen Verdunstung in jedem Einzeljahr. (2) Mittelung dieser Werte, um den charakteristischen Wert für die jeweilige 30-Jahres-Periode zu erhalten.

#### Ausgangswerte und Evaluation der Modellgüte

Die beiden folgenden Tabellen vergleichen die Referenzwerte TabsD der Periode 1981–2020 mit den modellierten Werten CH2018 derselben Periode, und zwar für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Da jedes Emissionsszenario mit den entsprechenden Modellketten eine eigene Modellwelt darstellt, können sich die modellierten CH2018-Werte geringfügig unterscheiden.

Tab. 2.4.199: Potenzielle Verdunstung [mm/dt]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 4.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	611	673	698	657	621	526
2	Y	TabsD	611	672	700	658	621	525
4	Y	$\Delta\%$	0	0	0	0	0	0
5	DJF	CH2018	30	33	34	32	31	27
6	DJF	TabsD	30	33	33	32	31	28
8	DJF	$\Delta\%$	1	0	2	0	0	-1
9	MAM	CH2018	150	168	174	164	153	127
10	MAM	TabsD	156	173	179	169	159	131
12	MAM	$\Delta\%$	-3	-3	-3	-3	-4	-3
13	JJA	CH2018	318	351	365	342	323	272
14	JJA	TabsD	313	345	359	337	318	267
16	JJA	$\Delta\%$	2	2	2	2	2	2
17	SON	CH2018	111	120	124	117	112	98
18	SON	TabsD	109	118	121	115	111	97
20	SON	$\Delta\%$	2	2	2	2	1	1

Unter **RCP 4.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte TabsD sehr gut ab, und zwar in jeder Konfiguration zwischen Saison und Region.

Tab. 2.4.200: Potenzielle Verdunstung [mm/dt]: Vergleich zwischen den Datensätzen der Klimaszenarien CH2018 und des gegitterten Beobachtungsdatensatzes TabsD in der Periode 1981–2010 unter RCP 8.5.

			KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
1	Y	CH2018	611	673	698	656	621	525
2	Y	TabsD	611	672	700	658	621	525
4	Y	$\Delta\%$	0	0	0	0	0	0
5	DJF	CH2018	30	33	33	32	31	27
6	DJF	TabsD	30	33	33	32	31	28
8	DJF	$\Delta\%$	1	0	1	0	0	-1
9	MAM	CH2018	150	167	174	164	153	127
10	MAM	TabsD	156	173	179	169	159	131
12	MAM	$\Delta\%$	-3	-3	-3	-3	-4	-3
13	JJA	CH2018	319	351	366	343	324	272
14	JJA	TabsD	313	345	359	337	318	267
16	JJA	$\Delta\%$	2	2	2	2	2	2
17	SON	CH2018	111	120	124	117	112	98
18	SON	TabsD	109	118	121	115	111	97
20	SON	$\Delta\%$	2	2	2	1	1	2

Auch unter **RCP 8.5** bilden die modellierten CH2018-Werte die Jahreswerte TabsD durchwegs sehr gut ab.

### Veränderungen um 2055

Tab. 2.4.201: Relative Veränderung der potenziellen Verdunstung in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	11	10	10	10	11	12
DJF	14	13	12	14	14	14
MAM	10	9	8	9	10	12
JJA	11	11	10	10	11	13
SON	11	12	12	11	11	12

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.202: Relative Veränderung der potenziellen Verdunstung in der mittleren Zukunft (2040–2069) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	14	13	13	13	14	16
DJF	16	15	14	16	16	16
MAM	13	12	12	12	13	16
JJA	15	14	14	14	15	18
SON	16	16	17	16	16	17

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Die Veränderungen der jährlichen potentiellen Verdunstung gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 liegen im Bereich von 10 %. Die Unterschiede zwischen den Regionen sind gering. Die relative Zunahme der potentiellen Verdunstung ist im Winter etwas höher als in den restlichen Saisons. Der Grad der Veränderungen ist aber sonst sehr ähnlich.

RCP 8.5: Auch unter diesem Szenario ergibt sich bei den Jahreswerten über das ganze Kantonsgebiet hinweg ein einheitliches Bild. Wie schon unter RCP 4.5 erkennbar, ist die Zunahme in der Region PreAlp am grössten. Saisonal streuen die Werte über alle Jahreszeiten hinweg zwischen 12 und 18 %.

### Veränderungen um 2085

Tab. 2.4.203: Relative Veränderung der potenziellen Verdunstung in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 4.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	15	13	13	13	15	16
DJF	15	16	16	15	15	15
MAM	13	11	11	11	13	14
JJA	14	13	13	13	13	16
SON	15	15	15	15	15	15

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.204: Relative Veränderung der potenziellen Verdunstung in der fernen Zukunft (2070–2099) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010) basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

	KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
Y	28	26	26	26	28	32
DJF	33	32	29	33	35	33
MAM	25	23	23	23	25	31
JJA	30	27	27	27	29	33
SON	30	30	30	30	30	29

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5: Die potentielle Verdunstung verändert sich gegenüber der Referenzperiode regional wie saisonal sehr gleichförmig mit Werten zwischen 11 und 16 %.

RCP 8.5: Bei diesem Szenario nimmt die jährliche potentielle Verdunstung gegenüber der Referenzperiode zwischen 26 und 32 % zu. Am höchsten ist die Zunahme in der Region PreAlp. Saisonal schwanken die Werte zwischen 23 und 33 %. Tendenziell sind die Zunahmen im Frühling (MAM) kleiner als in den übrigen Jahreszeiten.

### Synthese und Gesamtschau

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Kenngrösse zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Das Vorgehen ist in Kap. 2.3.5 erläutert. Die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 werden getrennt behandelt. Die Ergebnisse werden pro Szenario in zwei Tabellen zusammengefasst, die für sich selbst sprechen sollen.

Die erste Tabelle zeigt den Grad der Abweichungen der Werte der Kenngrösse von der Referenzperiode 1981–2010 im ganzen Kanton sowie in den fünf Regionen. Es wird zwischen den Abweichungen auf Jahresbasis und – verdichtet zu einem einzigen Wert – auf saisonaler Basis unterschieden. Diese Abweichungen werden für die mittlere und ferne Zukunft ausgewiesen. Grüntöne stehen für kleine bis mittlere, Violetttöne für grosse bis sehr grosse Abweichungen gegenüber der Referenzperiode. Bei den in der Tabelle ausgewiesenen Abweichungen sind die Vorzeichen, also ob es sich um Zu- oder Abnahmen gegenüber der Referenzperiode handelt, nicht berücksichtigt.

In der zweiten Tabelle werden diese Informationen zu einer finalen Beurteilung der Abweichungen verdichtet (Abw. Y, Abw. Saisons). Diese finale Beurteilung erlaubt es in der Gesamtsynthese in Kapitel 2.5, den Grad der Abweichungen aller klimatischen Kenngrössen direkt zu vergleichen. Zusätzlich werden auch die Vorzeichen der Veränderungen berücksichtigt. Es ergibt sich aus dem Zusammenschau der saisonalen Veränderungen im

Kanton und in den Regionen: + bedeutet eine Zunahme der Werte im Vergleich zur Referenz, - eine Abnahme. ± bedeutet, dass die Vorzeichen der Veränderungen pro Saisons in den fünf Regionen nicht übereinstimmen, also kein einheitliches Bild entsteht. Die Stärke der Veränderungen wird mit der Anzahl der Plus- bzw. Minuszeichen beschrieben:

+/-: kleine Zu-/Abnahme            ++/- -: mittlere Zu-/Abnahme  
 +++/ - - -: grosse Zu-/Abnahme    ++++/- - - -: sehr grosse Zu-/Abnahme

### RCP 4.5

Tab. 2.4.205: Synthese der Veränderungen der potenziellen Verdunstung basierend auf dem Emissionszenario RCP 4.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	3	3	3	3	3	3
2055	Saisons	12	11	11	11	12	12
2085	Jahr	3	3	3	3	3	3
2085	Saisons	12	12	12	12	12	12

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.206: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der potenziellen Verdunstung unter RCP 4.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>gross</b>	+++	<b>gross</b>	+++	++	+++	+++
um 2085	<b>gross</b>	+++	<b>gross</b>	+++	+++	+++	+++

## RCP 8.5

Tab. 2.4.207: Synthese der Veränderungen der potenziellen Verdunstung basierend auf dem Emissionsszenario RCP 8.5.

		KtFR	BasBro	GraMar	PlaNor	PlaSud	PreAlp
2055	Jahr	3	3	3	3	3	3
2055	Saisons	12	12	12	12	12	12
2085	Jahr	4	4	4	4	4	4
2085	Saisons	16	16	16	16	16	16

■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.4.208: Schlussbeurteilung der Abweichungen (Abw.) der potenziellen Verdunstung unter RCP 8.5. Y: Jahr, DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst.

Periode	Abw. Y	Y	Abw. Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
um 2055	<b>gross</b>	+++	<b>gross</b>	+++	+++	+++	+++
um 2085	<b>sehr gross</b>	++++	<b>sehr gross</b>	++++	++++	++++	++++

### Die Veränderungen auf einen Blick

Die folgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse grafisch zusammen. Gegliedert nach den beiden Emissionsszenarien und den drei Zeitperioden zeigen sie mit sogenannten Box-Plots die Streuung der Werte der 16 Modellketten sowie den Medianwert dieser Modellketten. In der eigentlichen Box, die durch das obere und untere Quartil begrenzt wird, liegen die mittleren 50 % der Werte. Werte ausserhalb dieser Box werden mit Linien (Antennen/Whiskers), Ausreisser mit Punkten dargestellt.

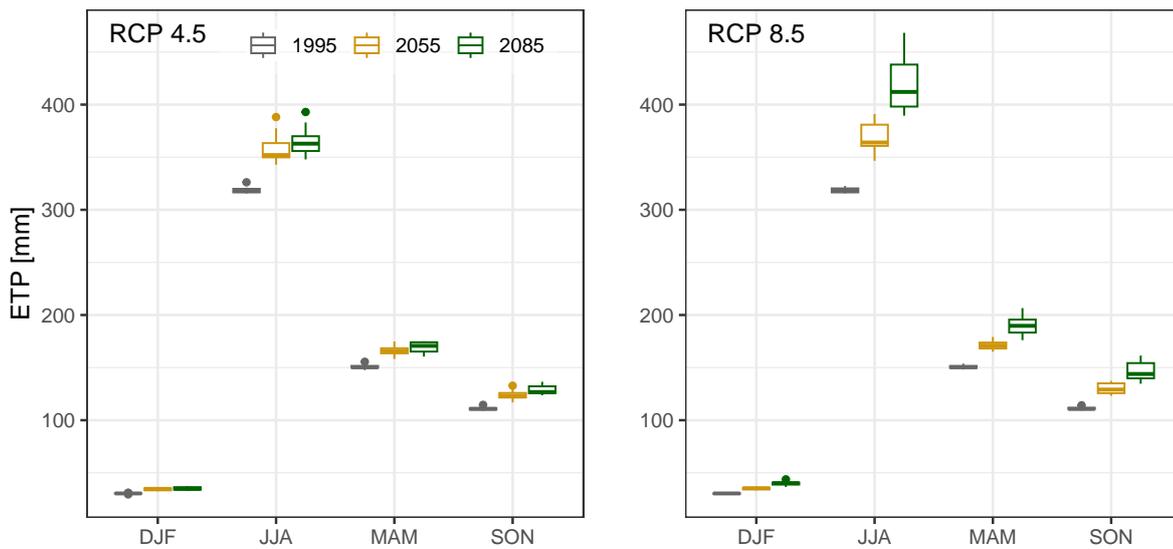


Abb. 2.42: Mittlere saisonale potentielle Verdunstung im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

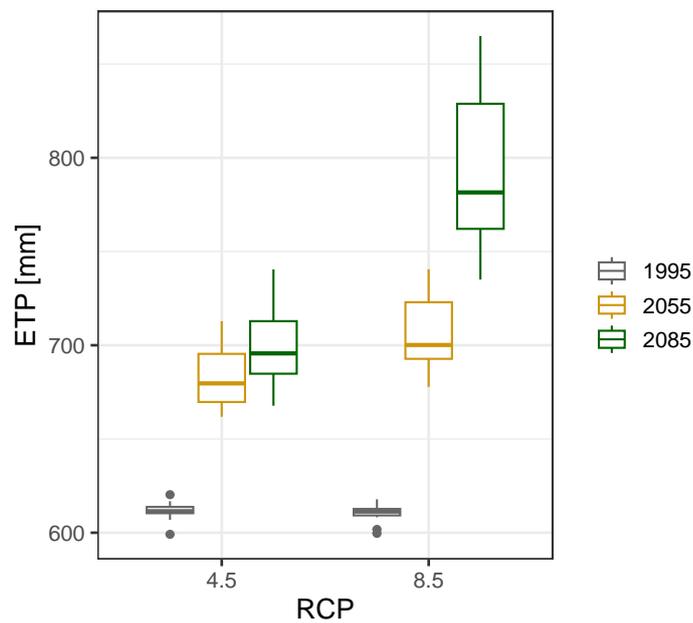


Abb. 2.43: Mittlere jährliche potentielle Verdunstung im Kanton Freiburg: Die Boxplots zeigen die Streuung der Medianwerte von den jeweils 16 verwendeten Modellketten.

## **2.5 Zusammenfassender Überblick über die Veränderungen**

Der vorliegende Bericht dokumentiert – im Sinne eines Nachschlagewerks – die zukünftigen Veränderungen massgeblicher klimatischer Kenngrössen vor dem Hintergrund des Klimawandels. In dieser Gesamtsynthese verdichten wir die Ergebnisse der einzelnen Kenngrössen zu einem Gesamtbild. Letzteres wird in drei Teile gegliedert

1. Übersicht über die Abweichungen gegenüber der Referenzperiode 1981–2010.
2. Übersicht über die jährlichen und saisonalen Veränderungen gegenüber der Referenzperiode.
3. Beschreibung zentraler Aspekte des Wandels.

In diesen drei Teilen werden dieselben Ergebnisse aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet, um der Mehrdimensionalität der Ergebnisse Rechnung zu tragen.

Wir zeigen hier die Art und das Ausmass der Abweichungen und Veränderungen in der mittleren und fernen Zukunft auf. Es soll und kann aber nicht die Frage beantwortet werden, was diese Veränderungen bedeuten, also welche Auswirkungen sie auf Gesellschaft und Wirtschaft, für das Leben im Kanton Freiburg und deren Regionen insgesamt haben. Die Beantwortung dieser Fragen sei Fachspezialisten und Fachspezialistinnen überlassen.

Es muss in diesem Kontext nochmals auf die Unterschiede zwischen «Abweichung» und «Veränderung» hingewiesen werden. Die Abweichung zeigt mit einer einzigen Kennziffer integral, wie stark sich die mittlere bzw. ferne Zukunft von der Referenzperiode 1981–2010 unterscheidet. Veränderung beinhalten auch Information zur Jahreszeit, zum Vorzeichen und zum Ausmass der Abweichung. Je nach gewünschtem Synthesegrad kann auf die eine oder die andere Tabelle zurückgegriffen werden.

### **2.5.1 Abweichungen gegenüber der Referenzperiode 1981–2010**

In den beiden Tabellen dieses Kapitels werden die Abweichungen gegenüber der Referenzperiode aufgezeichnet. Die Tab. 2.5.1 bezieht sich auf die Jahreswerte, die Tab. 2.5.2 auf die zu einer einzigen Kennziffer (Kategorie) zusammengefassten saisonalen Werte. Die Methodik zur Herleitung dieser Kennziffer wird in Kapitel 2.3.5 und dort insbesondere in der Abbildung 2.5 beschrieben.

#### **a) Jahreswerte**

Dieses Kapitel bezieht sich auf die Tab. 2.5.1. In der Tabelle sind in der oberen Hälfte Kenngrössen des Niederschlags und in der unteren Hälfte Kenngrössen der Lufttemperatur aufgeführt.

Die beiden ersten Spalten beschreiben die Güte der Modellierung in der Referenzperiode (vgl. Kap. 2.3.4). Für 2/3 der Kennwerte ist die Modellgüte sehr gut. Bei nur gerade 1/8 der Fälle ist das Modell ausreichend. Im Falle der Kenngrösse Mittlere Jahrestiefstwerte der 3-Wochen Niederschlagssumme führte die ungenügende Modellgüte dazu, dass keine Ergebnisse ausgewiesen werden können.

Tab. 2.5.1: Zusammenfassende Bewertung der klimatischen Veränderungen im Kanton Freiburg und dessen Regionen auf Jahresbasis für die mittlere (2055) und ferne Zukunft (2085) unter RCP4.5 und 8.5. Güte: Beurteilung der Güte des Sets der CH2018-Modellketten M16 aus der Sicht der jeweiligen Kenngrösse.

Kenngrösse	Veränderung um					
	Güte		2055		2085	
	4.5	8.5	4.5	8.5	4.5	8.5
Mittlere Niederschlagsmenge	1	1	1	1	1	1
Mittlere Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags	1	1	1	2	2	2
Seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags	1	2	1	2	1	3
Sehr seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags	1	1	1	2	2	3
Extrem seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags	2	2	2	3	2	4
Mittlere Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags	2	1	1	2	1	2
Seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags	2	2	2	2	2	3
Sehr seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags	2	2	3	2	2	3
Extrem seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags	3	3	2	2	3	3
Mittlere Jahrestiefstwerte der 3-Wochenniederschlagssumme	4	4				
Mittlere Anzahl an Tagen pro Jahr ohne Niederschlag	1	1	1	1	1	1
Mittlere Lufttemperatur	1	1	2	3	3	4
Mittlere Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur	1	1	3	3	4	4
Seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur	1	2	3	4	4	4
Sehr seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur	3	3	3	4	3	4
Extrem seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur	3	3	3	4	3	4
Mittlere Anzahl heisser Tage pro Jahr	1	1	3	4	4	4
Mittlere Anzahl sehr heisser Tage pro Jahr	1	1				
Mittlere Anzahl kalter Tage pro Jahr	1	1	4	4	4	4
Mittlere Anzahl sehr kalter Tage pro Jahr	2	2	4	4	4	4
Mittlere Anzahl extrem kalter Tage pro Jahr	1	1				
Mittlere Anz. Tage bis Grünland-T von 200°C erreicht	1	1	3	3	4	4
Mittlere Anzahl Tage mit Spätfrost	1	1	4	4	4	4
Potenzielle Verdunstung nach Hamon	1	1	3	3	3	4

Modellgüte: ■ sehr gut | ■ gut | ■ ausreichend | ■ ungenügend | [-]

Veränderung: ■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

Tab. 2.5.2: Zusammenfassende Bewertung der klimatischen Veränderungen im Kanton Freiburg und dessen Regionen für die mittlere (2055) und ferne Zukunft (2085) unter RCP 4.5 und 8.5 aus der Sicht der Saisons. Güte: Beurteilung der Güte des Sets der CH2018-Modellketten M16 aus der Sicht der jeweiligen Kenngrösse.

Kenngrösse	Veränderung um					
	Güte		2055		2085	
	4.5	8.5	4.5	8.5	4.5	8.5
Mittlere Niederschlagsmenge	1	1	7	9	9	12
Mittlere Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags	2	1	5	7	7	9
Seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags	2	2	6	9	6	10
Sehr seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags	3	2	6	9	6	12
Extrem seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags	2	2	6	9	7	11
Mittlere Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags	2	2	6	7	5	8
Seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags	3	3	5	8	5	10
Sehr seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags	3	3	6	8	7	10
Extrem seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags	3	3	10	7	10	9
Mittlere Anzahl an Tagen pro Jahr ohne Niederschlag	1	1	5	5	5	8
Mittlere Lufttemperatur	1	2	8	11	11	16
Mittlere Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur	2	3	10	12	12	16
Seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur	2	2	11	14	12	16
Sehr seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur	3	3	10	14	12	16
Extrem seltene Jahreshöchstwerte der Tageslufttemperatur	3	3	10	14	12	16
Potenzielle Verdunstung nach Hamon	1	1	12	12	12	16

Modellgüte: ■ sehr gut | ■ gut | ■ ausreichend | ■ ungenügend | [-]

Abweichung: ■ klein | ■ mittel | ■ gross | ■ sehr gross | [-]

### Kenngrossen des Niederschlags

Diese Gruppe umfasst insgesamt 10 Kenngrössen. Unter RCP 4.5 weichen in der mittleren Zukunft (2055) 50 % der Kenngrössen nur geringfügig (kleine Abweichung) von der Referenzperiode 1981–2010 ab. In der fernen Zukunft (2085) sind es nur noch 3 von 10 Kenngrössen, die sich kaum von der Referenzperiode unterscheiden.

Es besteht ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Klimaszenarien RCP 4.5 (Klimaschutzmassnahmen werden teilweise ergriffen) und RCP 8.5 (ohne Klimaschutzmassnahmen), wie der Vergleich sowohl in der mittleren als auch in der fernen Zukunft verdeutlicht. Die «Freiburger Niederschlagswelt» wird sich Ende des Jahrhunderts unter RCP 4.5 mit typischerweise mittleren Abweichungen von der Referenzperiode anders präsentieren als unter RCP 8.5 mit typischerweise grossen Abweichungen. Hervorzuheben ist allerdings, dass die mittleren Jahresniederschlagsmengen auch unter RCP 8.5 kaum von der Referenzperiode abweichen.

## **Kenngrossen der Lufttemperatur**

Die insgesamt 13 Kenngrossen dieser Gruppe weichen bereits in der mittleren Zukunft unter RCP 4.5 mehrheitlich in grossem bis sehr grossem Ausmass von der Referenzperiode 1981–2010 ab. Das Ausmass der Abweichungen ist unter RCP 8.5 noch grösser. In der fernen Zukunft weichen 10 von 13 Kenngrossen in einem sehr grossen Ausmass von der Referenzperiode ab.

### **b) Saisons**

Dieses Kapitel bezieht sich auf die Tab. 2.5.2. In der Tabelle sind wiederum in der oberen Hälfte Kenngrossen des Niederschlags und in der unteren Hälfte Kenngrossen der Lufttemperatur aufgeführt. Bei einigen Kenngrossen der Lufttemperatur konnten aufgrund der Definition der Kenngrosse (z.B. Mittlere Anzahl heisser Tage pro Jahr) keine saisonalen Werte dargestellt werden.

Betrachten wir als erstes wiederum die Modellgüte. Es ist sofort erkennbar, dass die Modellgüte bei dieser höheren zeitlichen Auflösung schlechter ist als bei den Jahreswerten. Nur gerade 1/4 der Kenngrossen werden sehr gut modelliert.

## **Kenngrossen des Niederschlags**

Im Gegensatz zu den Jahreswerten sind die Abweichungen gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 bei den saisonalen Werten grösser:

RCP 4.5: um 2055 und 2085 typischerweise mittel

RCP 8.5: um 2055 typischerweise mittel und um 2085 mittel bis gross.

Die insgesamt kleinsten Abweichungen bestehen bei der mittleren Anzahl an Tagen ohne Niederschlag.

## **Kenngrossen der Lufttemperatur**

Das Abweichungsbild ist über alle Kenngrossen hinweg ziemlich konsistent:

RCP 4.5: grosse Abweichungen in der mittleren und fernen Zukunft. Zwar fallen die Abweichungen in den beiden Zukunftsperioden in dieselbe Kategorie. Die Summenwerte (zum Beispiel 10–12 bei den Mittleren Jahreshöchstwerten der Tagesmitteltemperatur) belegen allerdings, dass die Abweichungen gegenüber der Referenzperiode in der fernen Zukunft etwas grösser sind.

RCP 8.5: Grosse bis sehr grosse Veränderungen in der mittleren Zukunft und durchwegs sehr grosse Abweichungen in der fernen Zukunft.

## 2.5.2 Veränderungen gegenüber der Referenzperiode

Die Tabellen 2.5.3 und 2.5.4 sind aus dem Zusammenzug der bei den einzelnen Kennwerten eingefügten Tabellen «Schlussbeurteilung der Abweichungen» entstanden. Sie zeigen für jede Kenngrösse die über die Regionen gemittelten jährlichen und saisonalen Veränderungen gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 in der mittleren und fernen Zukunft. Dabei wird nach den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 unterschieden.

### Kenngrossen des Niederschlags

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Tabelle 2.5.3.

Um 2055 fällt vorab der Gegensatz zwischen den Veränderungen unter RCP 4.5 und RCP 8.5 auf. Unter RCP 4.5 sind die Veränderungen gegenüber der Referenzperiode mehrheitlich klein. Es sind aber auch einige grössere Veränderungen (mittel bis gross) erkennbar. Dabei handelt es sich – mit einer Ausnahme (mittlere Niederschlagsmenge im Sommer (JJA)) – um Zunahmen. (Violettöne). Mittlere bis grosse Zunahmen weisen die Seltenen, Sehr seltenen und Extrem seltenen Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags auf, was ein Hinweis dafür ist, dass die seltenen und extremen Dauerregenmengen insgesamt zunehmen. Die Jahreswerte sind in der Regel grösser als die saisonalen Werte, weil sie jedes Jahr den allerhöchsten Wert erfassen, der von Jahr zu Jahr in unterschiedlichen Jahreszeiten auftreten kann.

Die mittlere Sommerniederschlagsmenge nimmt in einem mittleren Ausmass ab und unterscheidet sich somit von der Gesamtentwicklung.

Unter RCP 8.5 präsentiert sich die Situation ziemlich anders: Es dominieren nun die violetten Farben und speziell jener Farbton, der eine mittlere Zunahmen gegenüber der Referenzperiode symbolisiert. Wiederum entspricht die mittlere sommerliche Niederschlagsmenge nicht diesem Gesamtbild. Das aus anderen Regionen der Schweiz hinlänglich bekannte Veränderungsmuster bei den mittleren Niederschlagsmengen – Zunahme im Winter, Abnahme im Sommer – ist auch hier klar erkennbar.

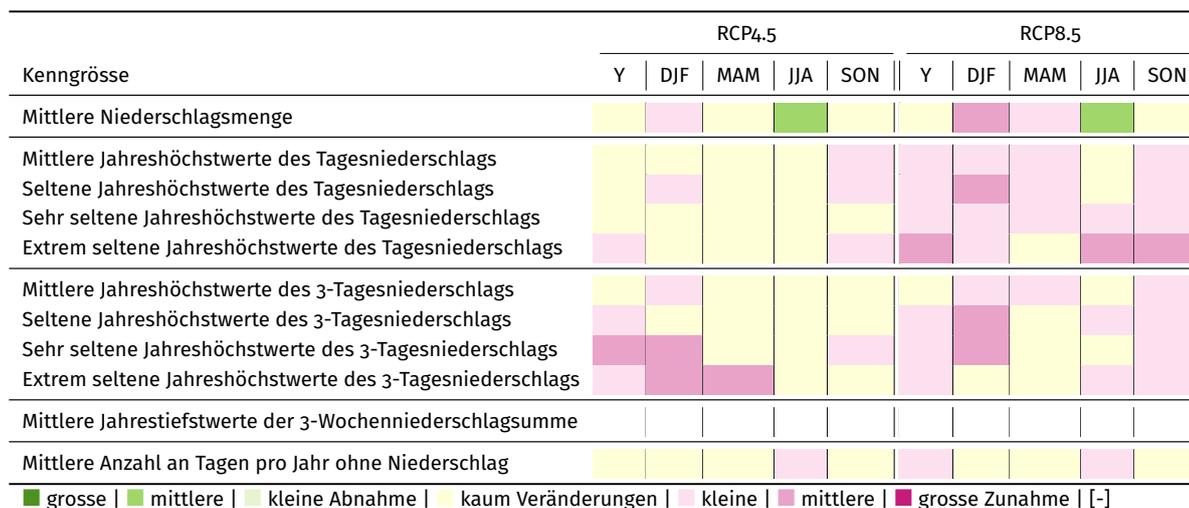
Bei den Jahreshöchstwerten der Tages- und 3-Tagesniederschläge dominieren die mittleren bis grossen Zunahmen im Winter. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass die Ausgangswerte in der Referenzperiode 1981–2010 im Winter tiefer sind als im Sommer, was diese Zunahmen in ihrer Bedeutung relativiert.

Um 2085 ist der Gegensatz zwischen den Szenarien ausgeprägter als um 2055. Liegen die Veränderungen unter RCP 4.5 im Bereich von klein bis mittel, so sind sie unter RCP 8.5 mehrheitlich im mittleren Bereich.

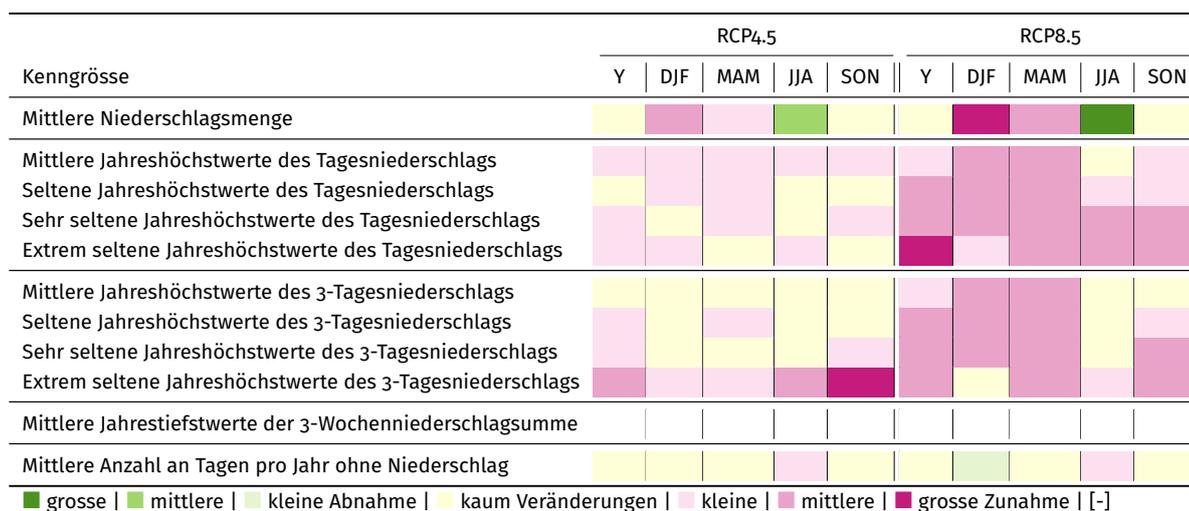
Betrachten wir nun die Veränderungen in der fernen Zukunft unter RCP 8.5 noch etwas detaillierter: Bei den mittleren Niederschlägen ist der Gegensatz zwischen Winter mit grossen Zunahmen und Sommer mit grossen Abnahmen ausgeprägt. Zudem nimmt die mittlere Niederschlagsmenge auch im Frühling im mittleren Umfang zu. Hervorzuheben ist ferner, dass sich die mittleren Jahresniederschläge, also die insgesamt in einem Jahr verfügbare Wassermenge, im Mittel kaum verändert.

Tab. 2.5.3: Vergleich der Veränderungen der Niederschlagskennwerte unter RCP4.5 und RCP8.5 in der mittleren Zukunft 2040–2069 (2055) und in der fernen Zukunft 2070–2099 (2085)

**2055**



**2085**



Die Jahreshöchstwerte des Niederschlags über einen und über drei Tage lassen tendenziell folgende Muster erkennen: Zunahmen auf Jahresbasis und im Winter, Frühling und Herbst. Abnahme im Sommer, insbesondere beim 3-Tagesniederschlag. Auch bei der mittleren Anzahl an Tagen ohne Niederschlag zeichnet sich die sommerliche Austrocknung ab: Die niederschlagsfreien Tage nehmen zu.

## **Kenngrossen der Lufttemperatur**

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Tabellen 2.5.4.

Die Informationen dieser Tabelle sind einfach zusammenfassbar: Die Lufttemperatur und die Werte der mit ihr zusammenhängenden Kenngrossen nehmen alle zu. Das Ausmass dieser Zunahmen hängt vom Emissionsszenario und vom zeitlichen Rahmen, mittlere oder ferne Zukunft, ab.

In der mittleren Zukunft sind die Zunahmen unter RCP 4.5 mehrheitlich mittel und unter RCP 8.5 variieren sie zwischen mittel und gross. In der fernen Zukunft bewegen sich die Zunahmen unter RCP 4.5 im Bereich mittel bis gross und sind schliesslich unter RCP 8.5 ausschliesslich gross.

Die Tabellen 2.5.4 belegen eindrücklich, dass der Klimawandel mit «Klimaerwärmung» noch treffender beschrieben werden kann, auch im Kanton Freiburg,

### **2.5.3 Zentrale Aspekte des Wandels**

In diesem letzten Kapitel werden zentrale Aspekte des Wandels im Kanton Freiburg herausgearbeitet und auf den Punkt gebracht. Beim Aufbau des Kapitels und der Auswahl der Aspekte orientieren wir uns an der NCCS-Broschüre «CH2018–Klimaszenarien für die Schweiz»<sup>4</sup>.

Zur Beschreibung eines Aspekts dienen mehrere thematisch verwandte Kenngrossen. Die Veränderung der Werte dieser Kenngrossen dokumentieren wir aufgrund der drei Raumeinheiten, die sich bezüglich der Höhenverhältnisse ähnlich sind (vgl. Kap. 2.2).

Die Ausführungen zu den einzelnen Aspekten werden bewusst kurz gehalten. Es sollen die Zahlen sprechen. Die Leserinnen und Leser werden Unterschiede zwischen den einzelnen Raumeinheiten erkennen und im Besonderen feststellen, dass sich die klimatischen Bedingungen im Kanton Freiburg in der fernen Zukunft zwischen beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 teilweise sehr stark unterscheiden werden.

### **Immer noch nasse, aber wärmere Jahre**

Das mittlere jährliche Wasserdargebot aus dem Niederschlag ändert sich kaum. Hingegen steigen die mittleren Jahrestemperaturen mindestens nochmals im gleichen Ausmass wie in den letzten 150 Jahren.

---

<sup>4</sup><https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien.html>

Tab. 2.5.5: Veränderungen der Jahreswerte von Niederschlag und Temperatur

**Mittlere Jahresniederschlagsmenge**

	BasBro, GraMar, PlaNor		PlaSud		PreAlp		Einheit
1981-2010	1009 bis 1068		1290		1549		mm
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
2040-2069	-1 bis -3	3 bis 6	-3	1	-3	-1	Δ%
2070-2099	2 bis 4	1 bis 3	1	-1	0	-2	Δ%

**Mittlere Jahrestemperatur**

	BasBro, GraMar, PlaNor		PlaSud		PreAlp		Einheit
1981-2010	9,4 bis 10		8,2		5,8		°C
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
2040-2069	1,5 bis 1,6	2,2 bis 2,3	1,6	2,4	1,7	2,5	Δ°C
2070-2099	2,0	3,9 bis 4,0	2,2	4,2	2,3	4,4	Δ°C

**Trockene Sommer**

Die Sommerniederschläge nehmen ab. Es gibt weniger Regentage. Die mittleren Sommertemperaturen steigen, damit erhöht sich auch die potentielle Verdunstung.

Tab. 2.5.6: Veränderungen im Sommer

**Mittlere Sommerniederschlagsmenge**

	BasBro, GraMar, PlaNor		PlaSud		PreAlp		Einheit
1981-2010	289 bis 324		387		481		mm
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
2040-2069	-11 bis -13	-7 bis -9	-13	-11	-13	-11	Δ%
2070-2099	-8 bis -10	-21 bis -24	-13	-26	-11	-27	Δ%

**Mittlere Sommertemperatur**

	BasBro, GraMar, PlaNor		PlaSud		PreAlp		Einheit
1981-2010	17.2 bis 18.4		16.2		13.3		°C
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
2040-2069	1.8 bis 1.8	2.2	1.8	2.3	1.9	2.6	Δ°C
2070-2099	2.1	4.1 bis 4.2	2.1	4.2	2.3	4.7	Δ°C

**Mittlere Anzahl Tage ohne Niederschlag im Sommer**

	BasBro, GraMar, PlaNor		PlaSud		PreAlp		Einheit
1981-2010	56 bis 58		54		50		d
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
2040-2069	4.0 bis 5.1	4.0 bis 4.6	3.8	4.3	3.5	4.5	Δd
2070-2099	3.4 bis 4.6	8.0 - 9.7	4.9	10.8	3.5	10	Δd

**Potenzielle Verdunstung im Sommer**

	BasBro, GraMar, PlaNor		PlaSud		PreAlp		Einheit
1981-2010	337 bis 359		318		267		mm
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
2040-2069	10 bis 11	14	11	15	13	18	Δ%
2070-2099	13	27	13	29	16	33	Δ%

**Warme und nasse Winter**

Bei gleichzeitig wärmeren Temperaturen regnet es im Winter mehr, und es schneit weniger. Mit der Temperaturerhöhung steigt auch die Nullgradgrenze um 200 m pro ein Grad Celsius Temperaturerhöhung. In der Referenzperiode 1981–2010 lag die Nullgradgrenze auf rund 900 m über Meer. Sie steigt bis in die mittlere Zukunft zwischen 320 und 440 m und in der fernen Zukunft zwischen 420 und 840 m gegenüber der Referenzhöhe 900 m ü.M. an.

Tab. 2.5.7: Veränderungen im Winter

**Mittlere Winterniederschlagsmenge**

	BasBro, GraMar, PlaNor		PlaSud		PreAlp		Einheit
1981-2010	202 bis 220		256		331		mm
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
2040-2069	8 bis 9	12 bis 14	7	11	5	11	Δ%
2070-2099	12 bis 18	23 bis 29	10	17	8	12	Δ%

**Mittlere Wintertemperatur**

	BasBro, GraMar, PlaNor		PlaSud		PreAlp		Einheit
1981-2010	0.9 bis 1.8		0.4		-1.2		°C
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
2040-2069	1.6 bis 2.0	2.0 bis 2.2	1.9	2.2	1.9	2.2	Δ°C
2070-2099	2.1 bis 2.3	3.8 bis 4.1	2.2	4.3	2.1	4.2	Δ°C

**Weniger kalt und immer wärmer**

Die Anzahl heisser Tage mit Tagesmitteltemperaturen grösser 20 °C verdoppelt sich mindestens. Kalte Tage mit Tagesmitteltemperaturen unter 0 °C verschwinden mehr und mehr.

Tab. 2.5.8: Veränderungen der mittleren Anzahl heisser und kalter Tage

**Mittlere Anzahl heisser Tage pro Jahr**

	BasBro, GraMar, PlaNor		PlaSud		PreAlp		Einheit
1981-2010	21.5 bis 32		12.5		1		d
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
2040-2069	21.2 bis 23.5	27.2 bis 32.8	18.5	23.8	9.5	11.5	Δd
2070-2099	26.5 bis 29.8	54 bis 56.5	23.5	48.2	11.5	30.5	Δd

**Mittlere Anzahl kalter Tage pro Jahr**

	BasBro, GraMar, PlaNor		PlaSud		PreAlp		Einheit
1981-2010	34.5 bis 47.5		56		82.5		d
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
2040-2069	-16.8 bis -19.8	-17.8 bis -21.5	-20	-23.5	-24	-33	Δd
2070-2099	-19.5 bis -24.2	-29.2 bis -34.2	-26	-39	-29.8	-52.2	Δd

## Heftigere Niederschläge

Die Intensität von Starkniederschlägen und besonders der extremen Starkniederschläge nimmt signifikant zu.

Tab. 2.5.9: Veränderungen bei den Starkniederschlägen

### Mittlere Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags (Jahr)

	BasBro, GraMar, PlaNor		PlaSud		PreAlp		Einheit
1981-2010	43 bis 46		48		50		mm
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
2040-2069	2 bis 4	8 bis 12	0	7	0	5	Δ%
2070-2099	6	8 bis 16	4	7	2	6	Δ%

### Extrem seltene Jahreshöchstwerte des Tagesniederschlags (Jahr)

	BasBro, GraMar, PlaNor		PlaSud		PreAlp		Einheit
1981-2010	73 bis 79		74		83		mm
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
2040-2069	3 bis 9	10 bis 20	6	16	8	19	Δ%
2070-2099	8 bis 15	15 bis 25	6	19	6	15	Δ%

### Mittlere Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags (Jahr)

	BasBro, GraMar, PlaNor		PlaSud		PreAlp		Einheit
1981-2010	65 bis 70		76		86		mm
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
2040-2069	-4 bis 0	5 bis 8	-1	4	-1	-2	Δ%
2070-2099	2 bis 3	10 bis 12	2	7	-1	5	Δ%

### Extrem seltene Jahreshöchstwerte des 3-Tagesniederschlags (Jahr)

	BasBro, GraMar, PlaNor		PlaSud		PreAlp		Einheit
1981-2010	111-145		114		140		mm
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
2040-2069	14 bis 20	9 bis 18	3	6	9	5	Δ%
2070-2099	9 bis 25	12 bis 22	8	7	12	6	Δ%

## Verlängerte Vegetationsperiode mit Zunahme der Gefahr von Spätfrost

Der Beginn der Vegetationsperiode, hier ausgedrückt durch die Tage bis zum Erreichen der Grünlandtemperatur von 200 °C, beginnt bis zu 40 Tage früher. Gleichzeitig erhöht sich die Gefahr von Spätfrost, der nach dem Erreichen der Grünlandtemperatur auftritt.

Tab. 2.5.10: Veränderungen bei der Vegetationsperiode und beim Spätfrost

Tage bis zum Erreichen der Grünlandtemperatur

	BasBro, GraMar, PlaNor		PlaSud		PreAlp		Einheit
1981-2010	87 bis 96		105		133		d
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
2040-2069	-18 bis -17	-20 bis -21	-15	-18	-14	-19	$\Delta d$
2070-2099	-18 bis -22	-33 bis -35	-22	-37	-18	-39	$\Delta d$

Mittlere Anzahl der Tage mit Spätfrost

	BasBro, GraMar, PlaNor		PlaSud		PreAlp		Einheit
1981-2010	4 bis 5.5		4		2		d
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	
2040-2069	1 bis 1.8	1.5 bis 2	1.5	1.2	2.5	3.2	$\Delta d$
2070-2099	0.5 bis 1.2	1.5 bis 2.5	1.8	3	2.8	7.8	$\Delta d$

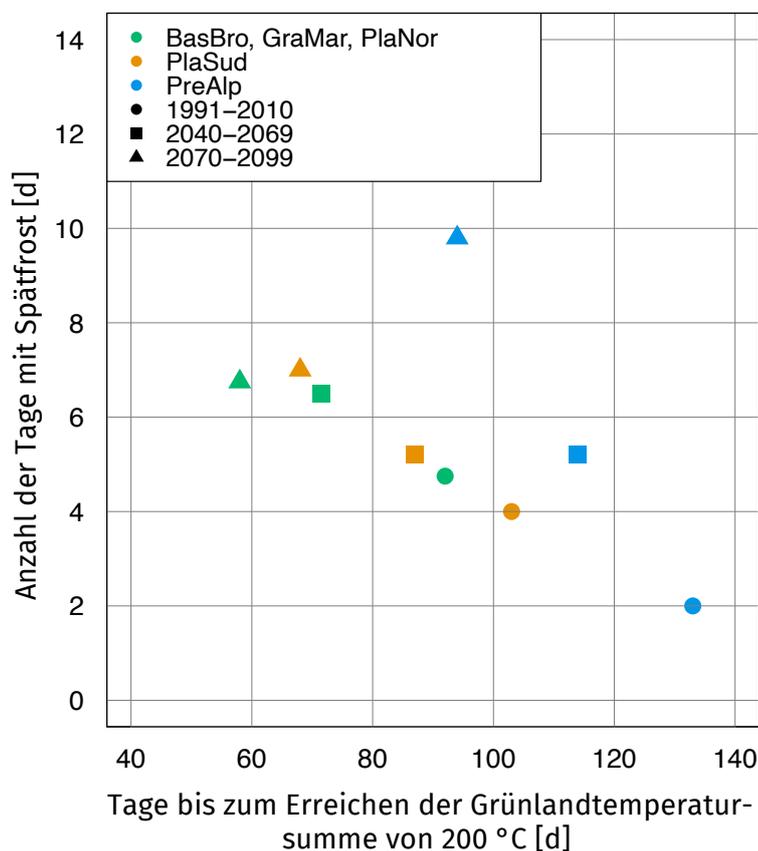
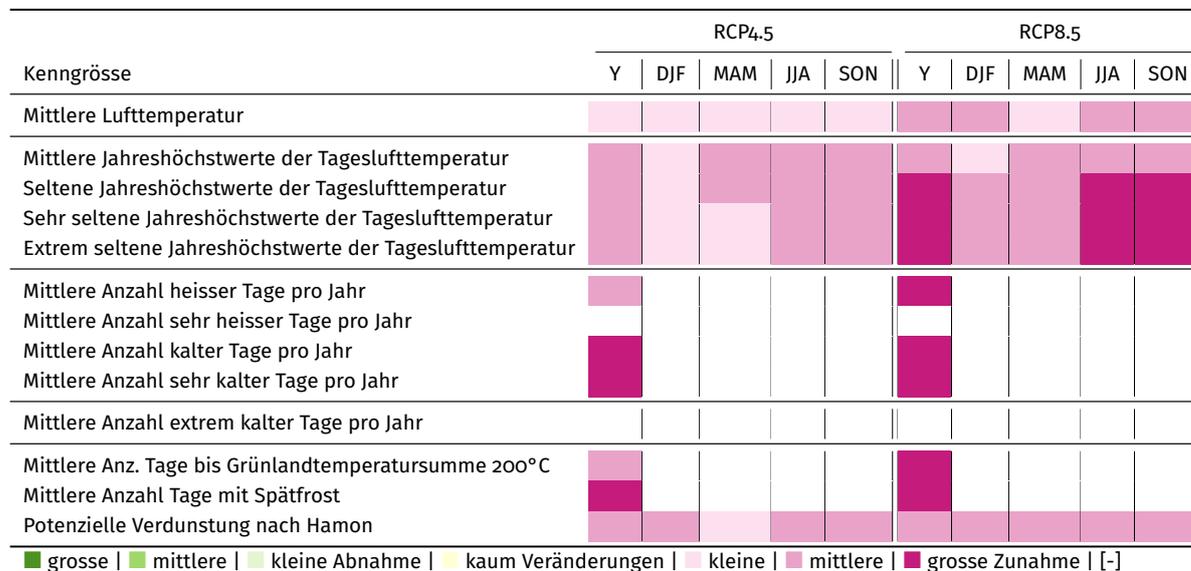


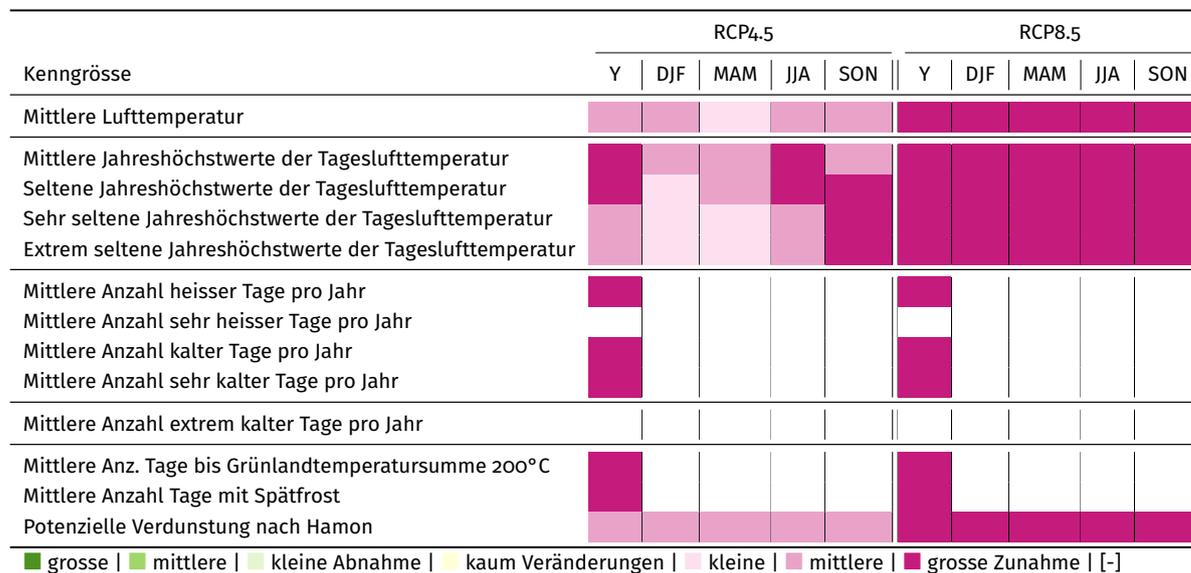
Abb. 2.44: Veränderung des Beginns der Vegetationsperiode (Tage ab 1. Januar bis zum Erreichen der Grünlandtemperatur von 200 °C) und der Tage mit Spätfrost unter RCP 8.5

Tab. 2.5.4: Vergleich der Veränderungen der Kennwerte zur Lufttemperatur unter RCP 4.5 und RCP 8.5 in der mittleren Zukunft 2040–2069 (2055) und in der fernen Zukunft 2070–2099 (2085)

**2055**



**2085**



## **3 Hydrologische Veränderungen in den Regionen und Einzugsgebieten des Kantons Freiburg**

### **3.1 Ausgangslage und Zielsetzung**

Das Klima wird sich wandeln – auch im Kanton Freiburg. Das vorangehende Kapitel hat in aller Deutlichkeit gezeigt, dass sich dieser Wandel auf breiter Front abspielt und viele Facetten aufweist. Nicht nur die Kenngrößen, welche sich auf die Lufttemperatur beziehen, sondern auch jene mit Bezug zum Niederschlag verändern sich. In diesem Kapitel wird nun der Frage nachgegangen, was diese Veränderungen konkret für den Wasserhaushalt und die Abflusssituation im Kanton Freiburg, dessen Regionen und Einzugsgebieten bedeuten.

Um zu diesen Aussagen zu gelangen, wurden umfassende hydrologische Modellierungen durchgeführt. Dazu standen Niederschlag- und Lufttemperaturdaten in täglicher Auflösung als Inputgrößen zur Verfügung. Diese zeitliche Auflösung eignet sich sehr gut für Aussagen zum Wasserhaushalt und dessen Elemente, hier insbesondere auch dem Abfluss. Bei der Analyse von Hochwassern und deren Veränderung genügt indessen die Tagesauflösung nicht, um die auf der Stundenskala ablaufenden Hochwasserereignisse abzubilden.

### **3.2 Einzugsgebiete und Regionen**

Wie schon bei den Untersuchungen der klimatischen Veränderungen stehen auch bei den hydrologischen Veränderungen die fünf Regionen des Kantons Freiburg im Mittelpunkt. Im Gegensatz zu den klimatischen Kenngrößen, die als räumliche Mittelwerte der jeweiligen Region berechnet werden konnten, beziehen sich die hydrologischen Kenngrößen auf Einzugsgebiete, weil die hydrologischen Modelle nur in diesen räumlichen Einheiten kalibriert und validiert werden können. Um dennoch Aussagen zur Region als Ganzes zu machen, wurde pro Region ein repräsentatives Gebiet ausgewählt.

In den folgenden zwei Tabellen werden die untersuchten Einzugsgebiete durch geographische Kenngrößen charakterisiert. In Tabelle 3.2.1 sind die repräsentativen Einzugsgebiete der fünf Regionen enthalten. Die Tabelle 3.2.2 zeigt weitere Einzugsgebiete und deren regionale Zugehörigkeit.

Tab. 3.2.1: Geographische Kennwerte der modellierten repräsentativen Einzugsgebiete und deren Zugehörigkeit zu einer Region

Kennwert	Einheit	BibKer	PGLVil	ArbAve	SioVui	SenTho
EG-Fläche	km <sup>2</sup>	49.0	75.5	71.9	43.4	351.2
mittlere Höhe	m ü.M.	543.0	561.0	596.0	869.0	1070.0
minimale Höhe	m ü.M.	442.0	435.0	434.0	682.0	555.0
maximale Höhe	m ü.M.	670.0	817.0	813.0	1412.0	2184.0
<b>Ausgewählte Landnutzungsklassen</b>						
Ackerbau	%	60.8	79.1	58.3	58.1	31.4
Grünland	%	5.6	0.0	8.7	9.7	27.1
Nadelwald	%	0.0	0.3	1.6	10.9	24.1
Mischwald	%	18.6	8.9	17.9	5.1	8.9
Siedlung	%	9.3	7.6	9.5	15.8	1.6
<b>Repräsentatives Einzugsgebiet für Region</b>						
		GraMar	BasBro	PlaNor	PlaSud	PreAlp

Tab. 3.2.2: Geographische Kennwerte weiterer modellierter Einzugsgebiete und deren Zugehörigkeit zu einer Region

Kennwert	Einheit	GerMar	GlaMat	GlaRom	VevVev	BroPay	SarBro
EG-Fläche	km <sup>2</sup>	70.5	180.1	34.5	64.5	415.9	636.3
mittlere Höhe	m ü.M.	1063.0	786.0	793.0	1098.0	719.0	1497.0
minimale Höhe	m ü.M.	621.0	576.0	686.0	397.0	447.0	683.0
maximale Höhe	m ü.M.	1715.0	1205.0	957.0	2011.0	1512.0	3243.0
<b>Ausgewählte Landnutzungsklassen</b>							
Ackerbau	%	2.1	75.7	81.1	22.7	69.1	4.7
Grünland	%	40.1	1.6	0.0	25.3	1.7	42.5
Nadelwald	%	34.0	8.3	8.6	24.3	6.5	21.1
Mischwald	%	14.5	7.7	5.1	20.4	14.9	7.0
Siedlung	%	6.2	6.3	5.2	6.5	5.6	2.2
<b>Weiteres Einzugsgebiet in der Region</b>							
		PlaSud	PlaSud	PlaSud	—	—	—

Die Gebietsfläche liegt zwischen 30 und 640 km<sup>2</sup>. Die Hälfte der Einzugsgebiete haben eine Fläche zwischen rund 50 und 170 km<sup>2</sup>. Insgesamt handelt es sich also um kleinere Einzugsgebiete, deren Wasserhaushalt und Abfluss durch das lokale bis regionale Prozessgeschehen geprägt sind. Sie weisen also eine hohe räumliche Aussagekraft auf. Die mittlere Gebietshöhe der Gebiete liegt zwischen rund 500 und 1500 m. Die tiefen Einzugsgebiete liegen somit im Bereich pluvialer Abflussregimes, während die höchstgelegenen Gebiete einen

vor-alpin-nivalen Charakter aufweisen.<sup>1</sup> Hinsichtlich der Landnutzung ist interessant, dass der Ackerbau in einem grösseren Teil der Einzugsgebiete mit einem Flächenanteil von mindestens 50 % dominiert. Bei den hydrologischen Modellierungen zukünftiger Veränderungen wird die heutige Landnutzung beibehalten.

### 3.3 Methodik

#### 3.3.1 Das hydrologische Modell GR4J/CemaNeige

##### Struktur des Modells GR4J

Die folgenden Ausführungen zum Modell GR4J basieren im Wesentlichen auf folgender Quelle: <https://wiki.ewater.org.au>, Stichwort GR4J.

GR4J ist ein Wasserhaushaltsmodell, das den Abfluss aus Niederschlag und Evapotranspiration anhand täglicher Daten errechnet. Das Modell enthält zwei Speicher und hat vier kalibrierbare Parameter  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  und  $x_4$ . Es wurde in den 1980er Jahren von Claude Michel am CEMAGREF entwickelt. Die Modellstruktur des GR4J entstand hauptsächlich empirisch. Das Ziel war es, eine Modellstruktur für ein möglichst einfaches, effizientes und robustes Modell zu finden. Das Modell findet weltweit eine grosse Verbreitung und wird dank des grossen Kreises von Anwender/-innen ständig verbessert.

Die Abbildung 3.1 beschreibt den Aufbau des Modells GR4J. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf einen einzelnen Zeitschritt  $dt = 1$  Tag. Es wird dargestellt, wie in diesem Zeitschritt die Inputgrösse Gebietsniederschlag  $P$  durch das Modell prozessiert wird.

---

<sup>1</sup><https://hydrologischeratlas.ch/produkte/druckausgabe/wasserhaushalt/tafel-5-2>

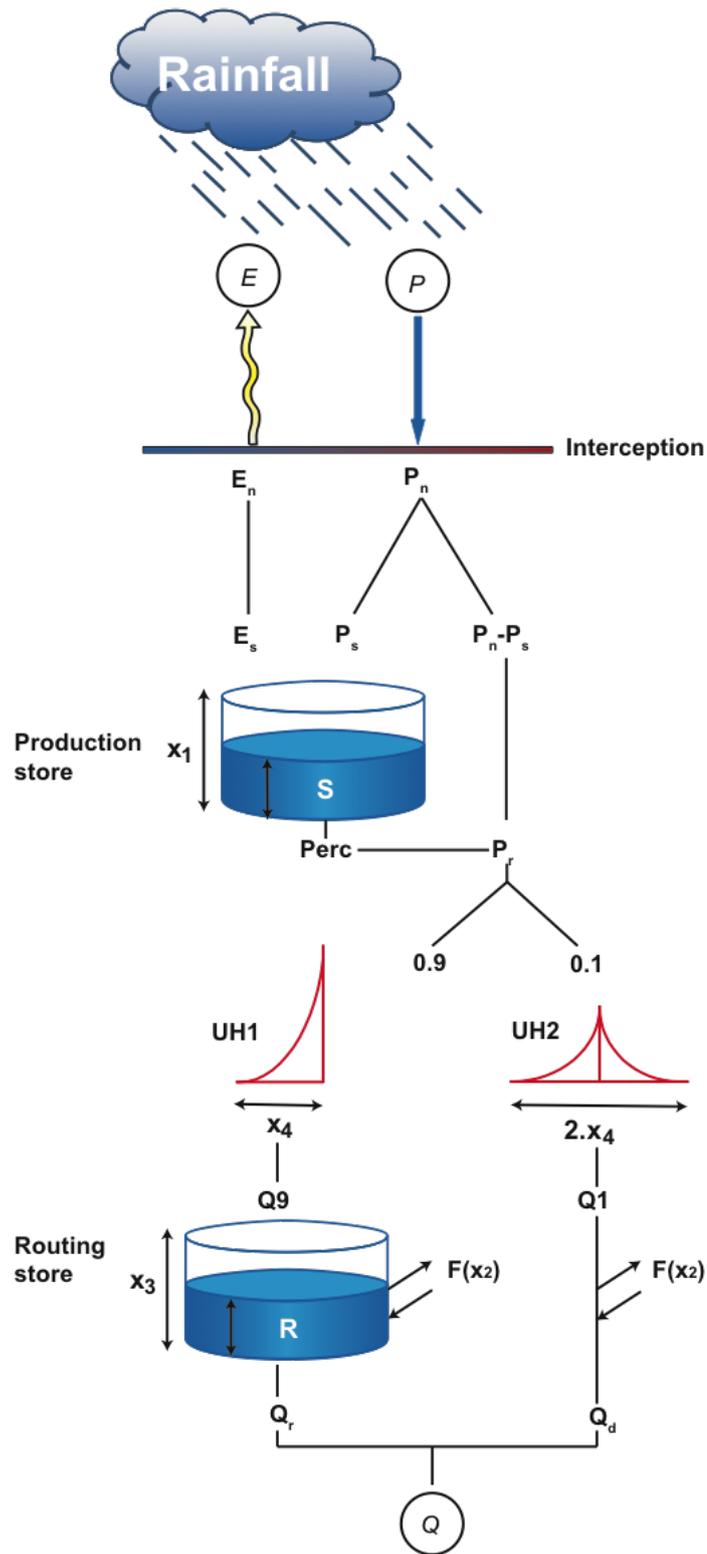


Abb. 3.1: Das Modell GR4j

Neben dem Niederschlag muss dem Modell auch die potentielle Evapotranspiration  $E$  übergeben werden. Die erste Operation resultiert aus dem Vergleich zwischen  $E$  und  $P$ . An einem Tag mit  $P \geq E$  wird die Netto Regenmenge  $P_n = P - E$  berechnet, im anderen Fall ist  $P_n = 0$  und die sogenannte Nettoevapotranspirationskapazität ist dann  $E_n = E - P$ .

Ein Teil von  $P_n$ , nämlich  $P_s$ , fließt in den «Production store», der als Bodenwasserspeicher interpretiert werden kann und dessen Speicherkapazität durch  $x_1$  beschrieben wird. Aus diesem Speicher exfiltriert wiederum Wasser und vereint sich mit dem Abfluss  $P_n - P_s$  zu  $P_r$ , dem sogenannten effektiven, also abflusswirksamen Niederschlag.

$P_r$  wird anschliessend mit einer festen Aufteilung in zwei Abflusskomponenten aufgeteilt: 90 % von  $P_r$  werden mittels der Einheitsganglinie  $UH1$  dem nicht-linearen Speicher «Routing store» zugeleitet. Die restlichen 10 % werden mittels der Einheitsganglinie  $UH2$  direkt weitergeleitet. Mit  $UH1$  und  $UH2$  kann man die zeitliche Verzögerung zwischen dem Niederschlagsereignis und der daraus resultierenden Abflussspitze simulieren. Ihre Ordinaten werden im Modell verwendet, um die effektive Niederschlagsmenge auf mehrere aufeinander folgende Zeitschritte zu verteilen. Beide Einheitsganglinien hängen von demselben in Tagen ausgedrückten Zeitparameter  $x_4$  ab. Allerdings hat  $UH1$  eine Zeitbasis von  $x_4$  Tagen, während  $UH2$  eine Zeitbasis von  $2 \cdot x_4$  Tagen hat.  $x_4$  ist grösser als 0.5 Tage. Es resultieren die beiden Abflusskomponenten  $Q_9$  und  $Q_7$ .

Mit  $F(x_2)$  werden im Modell unter- und oberirdische Flüsse ins Einzugsgebiet oder aus dem Einzugsgebiet simuliert.  $x_2$  ist der sogenannte Wasseraustauschkoeffizient. Der durch  $UH2$  modifizierte Abfluss  $Q_7$  wird durch  $F(x_2)$  erhöht oder vermindert. Es resultiert der Direktabfluss  $Q_d$ .

Die Füllung des «Routing store» wird durch den Zufluss  $Q_9$  von  $UH1$  und die Zu- oder Wegflüsse  $F(x_2)$  gesteuert. Der Parameter  $x_3$  beschreibt die Aufnahmekapazität dieses Speichers. Das aus diesem Speicher auslaufende Wasser wird als  $Q_r$  bezeichnet. Dabei handelt es sich um eine stark verzögerte Abflusskomponente, simuliert doch der «Routing store» auf einfache Art und Weise die Abflussprozesse im Untergrund.  $Q_r$  entspricht demnach dem Basisabfluss.

Aus dem Zusammenfliessen von  $Q_r$  und  $Q_d$  resultiert der Gesamtabfluss  $Q$ .

Insgesamt umfasst als das Modell GR4J vier Kalibrierungsgrössen:

- $x_1$ : Speicherkapazität des «Production store»
- $x_2$ : Wasseraustauschkoeffizient
- $x_3$ : Speicherkapazität des «Routing store»
- $x_4$ : Zeitparameter der beiden Unit Hydrographen

## Struktur des Schneemoduls CemaNeige

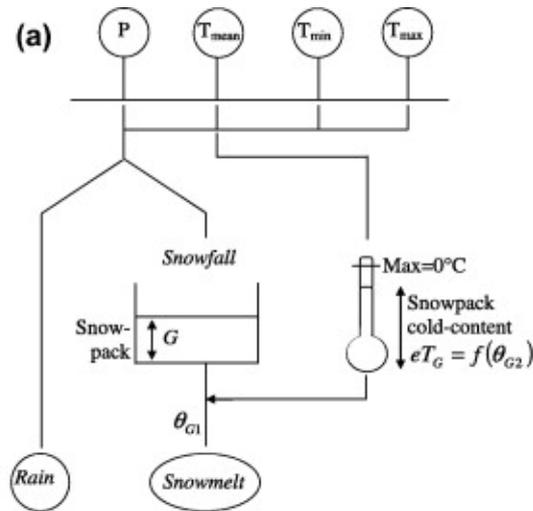


Abb. 3.2: Struktur des Moduls CemaNeige

Für Einzugsgebiete, in denen Schneeakkumulations- und Schmelzprozesse relevant sind, kann GR4J um das Modul CemaNeige erweitert werden. Als Grundlage für diesen Abschnitt diente der wissenschaftliche Artikel von Valéry u.a. (2010)<sup>2</sup>. CemaNeige benötigt als Eingangsgrößen einzig Einzugsgebietsmittelwerte des Niederschlags (P) als Tagessumme und der Lufttemperatur (T) als Tagesmittelwert oder als Tagesminimum und Tagesmaximum. CemaNeige besitzt zwei zu kalibrierende Parameter:

- Gewichtungskoeffizient  $C_{TG}$  für den thermischen Zustand des Schnees mit Werten zwischen 0 und 1
- Gradtagfaktor  $K_f$  (in mm/°C/d) normalerweise mit Werten im Bereich von 2 bis 6 mm/°C/d

Das Einzugsgebiet wird zunächst in fünf Höhenzonen mit gleichem Flächenanteil aufgeteilt und die Eingangsgrößen werden auf die mittlere Höhe dieser fünf Zonen umgerechnet, und zwar auf Basis der folgenden Gradienten:

- ein multiplikativer Höhengradient für den Niederschlag (auf Jahresbasis ermittelt) und
- ein monatlicher additiver Höhengradient für die Lufttemperatur

Mit diesen Eingangsdaten werden dann für jeden Zeitschritt (Tag) und jede der fünf Höhenzonen die folgenden Parameter hergeleitet:

1. **Schneeanteil am Niederschlag:** Übergang von Regen zu Schnee im Temperaturbereich von +3 °C (100 % Regen) bis -1 °C (100 % Schnee).

<sup>2</sup>Valéry, A. u.a. (2010): <https://doi.org/10.1016/j.jhydro1.2014.04.058>

2. **Schneeakkumulation:** Die tägliche Neuschneemenge wird als Schneewasseräquivalent der Schneedecke  $G$  hinzugefügt.
3. **Aktualisierung des Kältegehalts der Schneedecke:** Der Kältegehalt der Schneedecke ergibt sich aus den Lufttemperaturen der vergangenen Tage und dem zu kalibrierenden Gewichtungskoeffizienten  $C_{TG}$ .
4. **Potentielle Schneeschmelze:** Mittels des Grad-Tag-Ansatzes mit dem Gradtagfaktor  $C_{TG}$  als kalibrierbarer Parameter wird die potentielle Schneeschmelze berechnet, wobei Schmelze nur erfolgt, wenn der Kältegehalt der Schneedecke gleich  $0^\circ\text{C}$  ist.
5. **Aktuelle Schneeschmelze:** Die tatsächliche Schneeschmelzmenge wird entsprechend der Restschneemenge in der Schneedecke  $G$  unter Berücksichtigung eines empirischen Schwellenwerts ermittelt.

Interne Modellzustände für die Schneebedeckung  $G$  als Wasseräquivalent und ihr Kältegehalt  $eT_G$  variieren unabhängig in jeder Höhenzone entsprechend den bereitgestellten Eingangswerten. Für jede Höhenzone werden in jedem Zeitschritt drei Resultate berechnet: die Wassermenge aus Regen, jene aus Schneeschmelze und die Summe aus beidem. Zur Schätzung der gesamten Wassermenge aus Regen und Schneeschmelze von CemaNeige auf Ebene des Einzugsgebiets werden die Resultate der fünf Höhenzonen gemittelt (mit gleichem Gewicht, da jedes Band einem Fünftel des Einzugsgebiets entspricht). Diese für das Einzugsgebiet zusammengefasste Wassermenge wird nun als Input für das hydrologische Modell GR4J verwendet.

#### **Niederschlagskorrektur: Erweiterung von GR4J**

Instrumentelle Niederschlagsmessungen sind stets mit einem mehr oder weniger grossem Messfehler verbunden. Es kann davon ausgegangen werden, dass stets weniger Niederschlag registriert wird als tatsächlich am Standort des Messgeräts gefallen ist. Diese Unterschätzung der Niederschlagsmenge ist bei Schneefall und gleichzeitig auftretendem Wind erfahrungsgemäss besonders gross. Da GR4J über keinen Parameter zur Korrektur des Niederschlags verfügt, besteht die Gefahr, dass bei der Kalibrierung die vier freien Parameter von GR4J und die zwei freien Parameter von CemaNeige diesen Fehler kompensieren und deshalb unrealistische Wertebereiche annehmen. Um dies zu vermeiden, wurde für dieses Projekt eine temperaturabhängige Niederschlagskorrektur eingeführt. Für Niederschläge bei Temperaturen grösser bzw. kleiner einer Grenztemperatur wird je ein Niederschlagskorrekturfaktor für Regen und einer für Schnee genutzt. Es wurden die folgenden Wertebereiche für die drei neuen Parameter definiert:

- **Grenztemperatur:** Lufttemperatur zur Unterscheidung zwischen Schnee und Regen, Wertebereich:  $0.5$  bis  $2^\circ\text{C}$
- **Volumen-Korrekturfaktor für Regen:** Wertebereich:  $0.8$  bis  $1.05$
- **Volumen-Korrekturfaktor für Schnee:** Wertebereich:  $0.9$  bis  $1.4$

## Kalibrierung und Validierung

Bei der hydrologischen Modellierung muss zwischen der Kalibrierung und der Validierung eines hydrologischen Modells unterschieden werden. Die Zeitperioden für die Kalibrierung und die Validierung müssen sich unbedingt unterscheiden. Aus diesem Grund können nur Einzugsgebiete berücksichtigt werden, welche über eine genügend lange Messreihe verfügen. Übertragen auf den Kanton Freiburg heisst das, dass insgesamt neun Einzugsgebiete, welche diese Voraussetzungen erfüllen, modelliert werden konnten. Als Kalibrierungszeitraum wurde die Periode 2011–2020 verwendet. Die Periode 1981–2010 diente als Validierungsperiode. Allerdings deckten nicht alle Beobachtungsreihen den ganzen Zeitraum 1981–2010 ab. Es wurden deshalb auch kürzere Perioden zur Validierung verwendet.

Bei der Kalibrierung des Modells wurden in jedem Einzugsgebiet 198 Kalibrierungen (Modellvarianten) mit unterschiedlich korrigierten Niederschlägen durchgeführt. Zur Niederschlagskorrektur dienen die drei oben beschriebenen Parameter mit ihren Wertebereichen. Die Werte der drei Parameter wurden innerhalb der Wertebereiche systematisch variiert und so eine Niederschlagskorrektur durchgeführt. Daraufhin erfolgte eine automatische Kalibrierung der vier freien Parameter von GR4J und der zwei Parameter von CemaNeige und eine Validierung mit dem jeweiligen korrigiertem Niederschlag als Input. Aus diesen 198 Kalibrierungen wählten wir anschliessend die vier besten Modellvarianten aus, also jene, welche die Beobachtungsdaten am besten abbilden. Diese Auswahl erfolgte mit einem Kriterienkatalog, der verschiedenste Masse zur Beurteilung der Modellgüte umfasst. Zusätzlich wurde die Nullvariante (cal001), also der Parametersatz mit unkorrigierten Niederschlägen, für alle folgenden Modellierungen mitgenommen.

Aus den vier besten Modellvarianten wählten wir jene aus, mit der wir schliesslich die Modellierung durchführten und auf welcher die im vorliegenden Bericht vorgestellten Resultate basieren. Im Folgenden wird das Vorgehen zur finalen Modellauswahl kurz skizziert werden.

Bei den hydrologischen Modellierung stehen folgende Abflusskenngrössen im Fokus:

- der mittlere Jahresabfluss (MQ),
- die mittleren saisonalen Abflüsse,
- drei Niedrigwasserkenngrössen ( $Qq01$ ,  $Qq05$ ,  $Qq10$ ),
- drei Hochwasserkenngrössen ( $Qq90$ ,  $Qq95$ ,  $Qq99$ ).

Zur Bestimmung der finalen Modellvariante wurden diese Kenngrössen aus den Beobachtungsdaten berechnet und mit den entsprechenden Kenngrössen der einzelnen Modellvarianten verglichen. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind in den Tabellen 3.3.1 und 3.3.2 dargestellt.

Tab. 3.3.1: Beurteilung der Modellgüte der besten Modellvarianten in den verschiedenen Einzugsgebieten auf der Basis der im Text erwähnten Kenngrößen im jeweils angegebenen Validierungszeitraum. Ausgewiesen und mit Farben unterlegt sind die prozentualen Abweichungen der modellierten von den beobachteten Kenngrößen.

Periode	Quelle	Qq01	Qq05	Qq10	Qq90	Qq95	Qq99	MQ	Einheit
<b>Bibere@Kerzers</b>									
1981-2010	obs	0.4	0.4	0.4	1.7	2.3	4.6	1.0	mm/d
1981-2010	obs	4.2	4.6	5.1	20.0	27.1	53.2	11.7	l/s/km <sup>2</sup>
1981-2010	cal001	-8.3	0.0	4.6	2.3	-4.7	-23.0	-1.0	%
1981-2010	cal138	-8.3	0.0	4.6	2.3	-4.3	-22.8	0.0	%
1981-2010	cal161	-2.8	5.0	9.1	3.5	-3.4	-24.1	2.0	%
1981-2010	cal185	-5.6	2.5	4.6	2.9	-4.3	-23.5	0.0	%
<b>Broye@Payerne</b>									
1981-2010	obs	0.3	0.4	0.4	3.6	5.2	10.0	1.7	mm/d
1981-2010	obs	3.5	4.2	4.9	41.5	60.5	116.1	19.6	l/s/km <sup>2</sup>
1981-2010	cal001	-13.3	-2.8	4.8	6.4	2.1	-4.7	4.1	%
1981-2010	cal143	-16.7	-8.3	0.0	6.7	3.4	-4.6	3.0	%
1981-2010	cal150	-13.3	-5.6	0.0	8.4	3.4	-5.8	4.7	%
1981-2010	cal152	-13.3	-5.6	2.4	9.2	4.4	-5.6	5.3	%
<b>Arbogne@Avenches</b>									
1993-2010	obs	0.2	0.3	0.3	1.7	2.3	4.4	0.9	mm/d
1993-2010	obs	2.9	3.5	4.0	19.8	26.6	51.5	10.7	l/s/km <sup>2</sup>
1993-2010	cal001	-20.0	-16.7	-14.3	8.8	7.8	-2.5	2.2	%
1993-2010	cal019	-24.0	-20.0	-17.1	10.5	8.7	-2.0	2.2	%
1993-2010	cal152	-20.0	-16.7	-14.3	9.4	8.7	-3.8	2.2	%
1993-2010	cal154	-16.0	-10.0	-11.4	9.4	7.8	-5.4	3.3	%
<b>Petite Glâne@Villars-le-Grand</b>									
1993-2010	obs	0.3	0.3	0.4	2.2	3.3	6.7	1.1	mm/d
1993-2010	obs	3.5	3.9	4.4	25.8	37.7	77.2	13.2	l/s/km <sup>2</sup>
1993-2010	cal001	-16.7	-8.8	-2.6	2.2	-4.3	-19.9	1.8	%
<b>Sense@Thörishaus</b>									
1981-2010	obs	0.5	0.6	0.7	4.3	6.0	10.7	2.2	mm/d
1981-2010	obs	6.0	6.8	7.8	50.2	69.6	124.0	25.1	l/s/km <sup>2</sup>
1981-2010	cal001	-13.5	-5.1	-1.5	5.1	1.7	0.1	1.8	%
1981-2010	cal146	-11.5	-3.4	1.5	8.3	5.0	-3.0	4.2	%
1981-2010	cal147	-13.5	-3.4	0.0	9.0	5.3	-3.9	4.2	%
1981-2010	cal150	-11.5	-3.4	1.5	10.1	5.8	-5.4	4.6	%
1981-2010	cal183	-15.4	-6.8	-3.0	6.7	3.8	-1.8	2.3	%

Legende: -20 -10 -5 5 10 20 [%]

Tab. 3.3.2: Beurteilung der Modellgüte der besten Modellvarianten in den verschiedenen Einzugsgebieten auf der Basis der im Text erwähnten Kenngrößen im jeweils angegebenen Validierungszeitraum. Ausgewiesen und mit Farben unterlegt sind die prozentualen Abweichungen der modellierten von den beobachteten Kenngrößen (Fortsetzung.)

Periode	Quelle	Qq01	Qq05	Qq10	Qq90	Qq95	Qq99	MQ	Einheit
<b>Gérine@Marly</b>									
2006-2010	obs	0.5	0.9	1.1	8.4	12.5	25.1	3.7	mm/d
2006-2010	obs	5.6	11.0	12.3	97.6	144.3	290.9	43.2	l/s/km <sup>2</sup>
2006-2010	cal001	-31.2	-54.7	-50.9	-29.8	-31.1	-40.9	-32.2	%
2006-2010	cal085	-22.9	-50.5	-48.1	-24.9	-29.8	-44.0	-31.1	%
2006-2010	cal149	-25.0	-51.6	-49.1	-25.7	-31.1	-44.8	-32.2	%
2006-2010	cal150	-27.1	-52.6	-50.0	-25.6	-31.2	-44.8	-32.2	%
<b>Sarine@Broc</b>									
1981-2010	obs	0.6	0.7	0.8	6.0	7.4	11.3	2.9	mm/d
1981-2010	obs	7.3	8.3	9.5	69.8	85.7	130.7	33.7	l/s/km <sup>2</sup>
1981-2010	cal001	11.1	13.9	17.1	-4.3	-2.8	-4.4	-1.7	%
1981-2010	cal144	17.5	19.4	20.7	0.0	0.9	-4.9	-0.3	%
1981-2010	cal145	17.5	18.1	19.5	-1.5	-0.3	-4.2	-0.7	%
1981-2010	cal147	19.0	20.8	20.7	0.5	1.2	-5.0	0.0	%
1981-2010	cal159	17.5	19.4	19.5	0.7	1.4	-4.7	0.0	%
<b>Sionge@Vuippens</b>									
1981-2010	obs	0.4	0.5	0.5	5.1	7.4	13.6	2.3	mm/d
1981-2010	obs	4.5	5.3	6.2	58.9	86.1	157.4	26.3	l/s/km <sup>2</sup>
1981-2010	cal001	-7.7	4.3	7.4	-1.8	-3.6	-9.7	3.1	%
1981-2010	cal151	-7.7	0.0	3.7	2.5	0.5	-6.8	4.4	%
1981-2010	cal158	-2.6	4.3	7.4	-0.6	-2.3	-8.4	4.0	%
1981-2010	cal160	-7.7	2.2	5.6	0.8	-1.1	-7.4	4.4	%
1981-2010	cal187	-15.4	-4.3	0.0	0.6	0.0	-6.3	3.5	%
<b>Veveyse@Vevey</b>									
1984-2010	obs	0.4	0.4	0.5	6.5	9.2	16.5	2.8	mm/d
1984-2010	obs	4.2	5.2	6.2	75.5	106.7	191.3	32.6	l/s/km <sup>2</sup>
1984-2010	cal001	-13.9	-8.9	-3.7	-4.6	-3.7	-8.9	-4.6	%
1984-2010	cal146	-8.3	-4.4	-1.9	-2.0	-3.6	-11.1	-3.9	%
1984-2010	cal147	-16.7	-11.1	-7.4	-0.8	-2.9	-11.6	-4.3	%
1984-2010	cal183	-25.0	-17.8	-11.1	-2.9	-2.8	-9.4	-4.6	%

Legende: -20 -10 -5 5 10 20 [%]

Die Ergebnisse der Validierung belegen die gute bis sehr gute Modellierung der Abflusskenngrößen. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das Modell GR4J bildet die Abflusskenngrößen im Bereich von sehr gut bis befriedigend ab. Einzig bei der Gérine ist die Modellgüte bei allen Abflusskenngrößen ungenügend.
- Der mittlere Jahresabfluss konnte in allen Einzugsgebieten *sehr gut* modelliert werden.
- Die Hochwasserkennwerte wurden entweder *sehr gut* oder *gut* modelliert.
- Bei den Niedrigwasserkenngrößen sind die Abweichungen zwischen Modell und Beobachtungen am grössten, wobei die Modellgüte im «schlechtesten» Fall immer noch *befriedigend* ist.

Zudem wurde auch die Güte der Modellierung der mittleren aktuellen Verdunstung sowie des Schnees evaluiert.

In der der Abbildung 3.3 werden die mit dem Modell (TRAIN<sup>3</sup>) errechneten aktuellen Verdunstungswerte aus dem Hydrologischen Atlas der Schweiz ([hydromaps.ch](http://hydromaps.ch)) mit den mit GR4J ermittelten verglichen. Die geringen Abweichungen im Bereich von -9 % für GerMar bis +2,5 % für SarBro geben Vertrauen in Ergebnisse der Modellierung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Zeitperioden, auf dem der Vergleich basiert, nicht identisch sind. Gleichzeitig muss aber auch erwähnt werden, dass es sich bei der Verdunstung um eine sehr konservative Grösse handelt.

---

<sup>3</sup>[https://www.geog.uni-heidelberg.de/md/chemgeo/geog/hydro/train-beschreibung\\_dez2011.pdf](https://www.geog.uni-heidelberg.de/md/chemgeo/geog/hydro/train-beschreibung_dez2011.pdf)

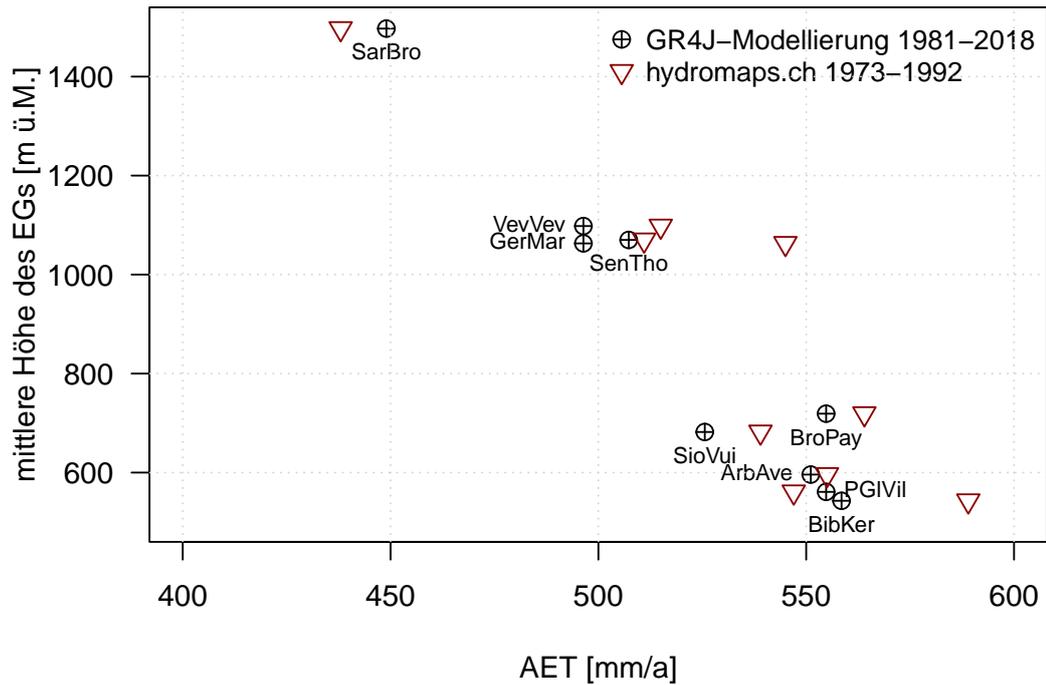


Abb. 3.3: Abhängigkeit der modellierten aktuellen Verdunstung von der mittleren Höhe der Einzugsgebiete. Zum Vergleich aktuelle Verdunstung von hydromaps.ch

Zur Einschätzung Modellgüte beim Schnee (Modell CemaNeige) wurde die Höhenabhängigkeit folgender drei Indikatoren geprüft: Schneeanteil am Gesamtniederschlag, Anteil der Schneesmelze am Gesamtabfluss und die Schmelzrate (s. Abb. 3.4 bis Abb. 3.6).

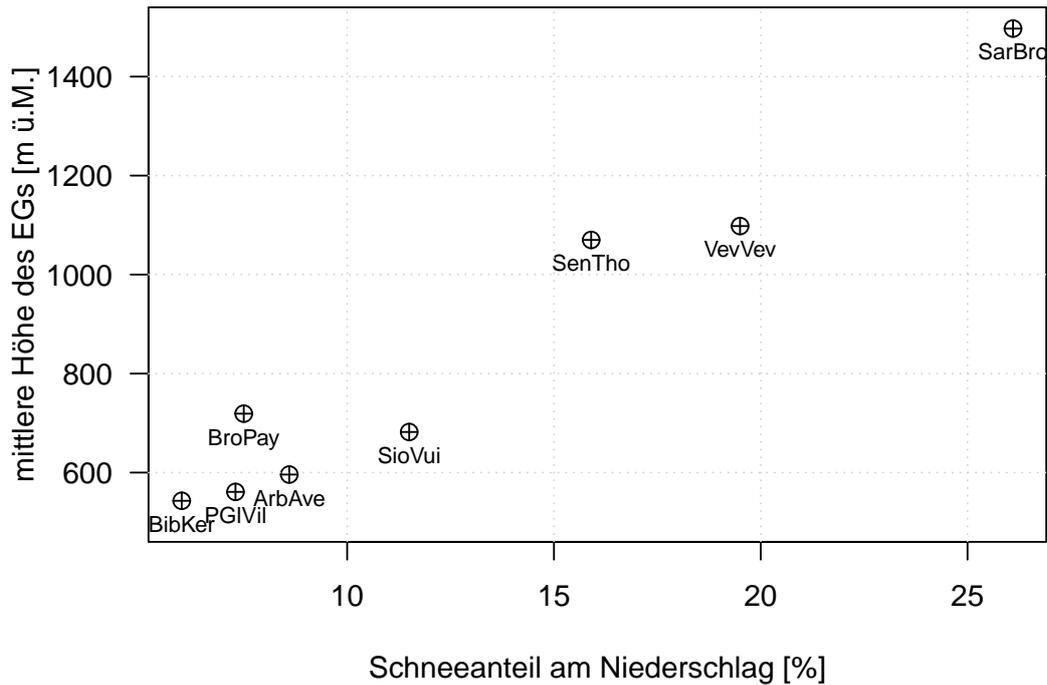


Abb. 3.4: Abhängigkeit des modellierten Schneeanteils am Gesamtniederschlag von der mittleren Höhe der Einzugsgebiete

Für den Schneeanteil am Gesamtniederschlag ergibt sich erwartungsgemäss ein annähernd linearer Zunahme mit der mittleren Höhe der Einzugsgebiete. Hingegen besteht beim Schmelzwasseranteil am Gesamt-abfluss ein unerwartetes diffuses Bild. Es ist keine Abhängigkeit von der mittleren Gebietshöhe zu erkennen. Beim Schmelzanteil fällt die Bibere@Kerzers mit einem Anteil von > 18% auf, was aufgrund der tiefen Höhenlage des Gebietes nicht plausibel ist. Insgesamt ist festzuhalten, dass die Schneemodellierung mit CemaNeige in den tieferen Einzugsgebieten des Kantons Freiburg ungenügend ist.

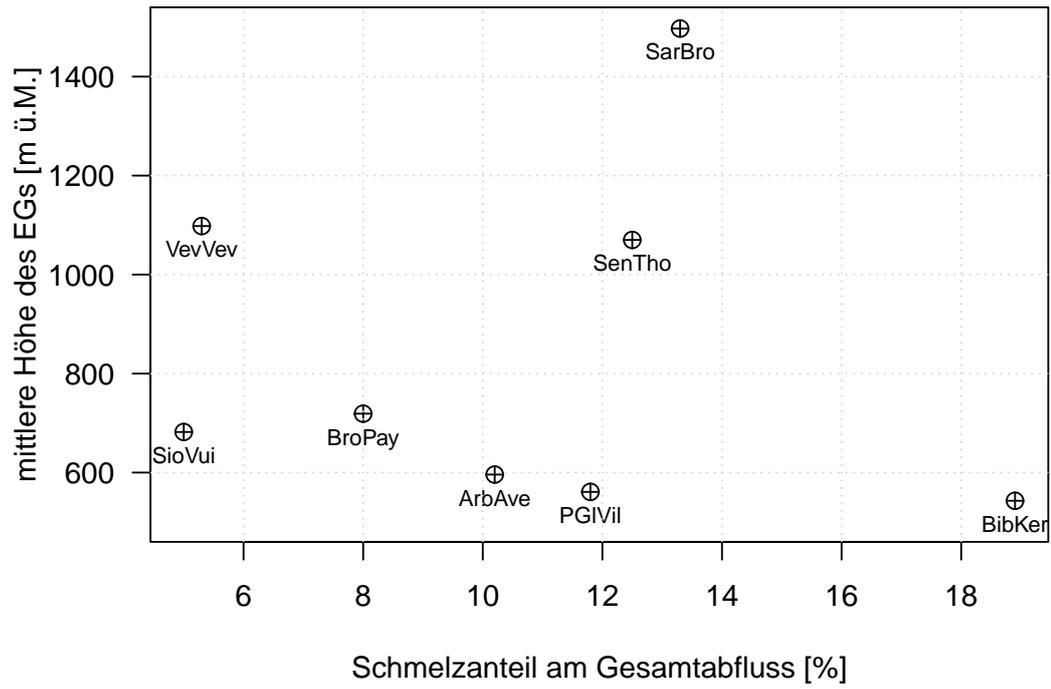


Abb. 3.5: Abhängigkeit des modellierten Schmelzwasseranteils am Gesamtabfluss von der mittleren Höhe der Einzugsgebiete

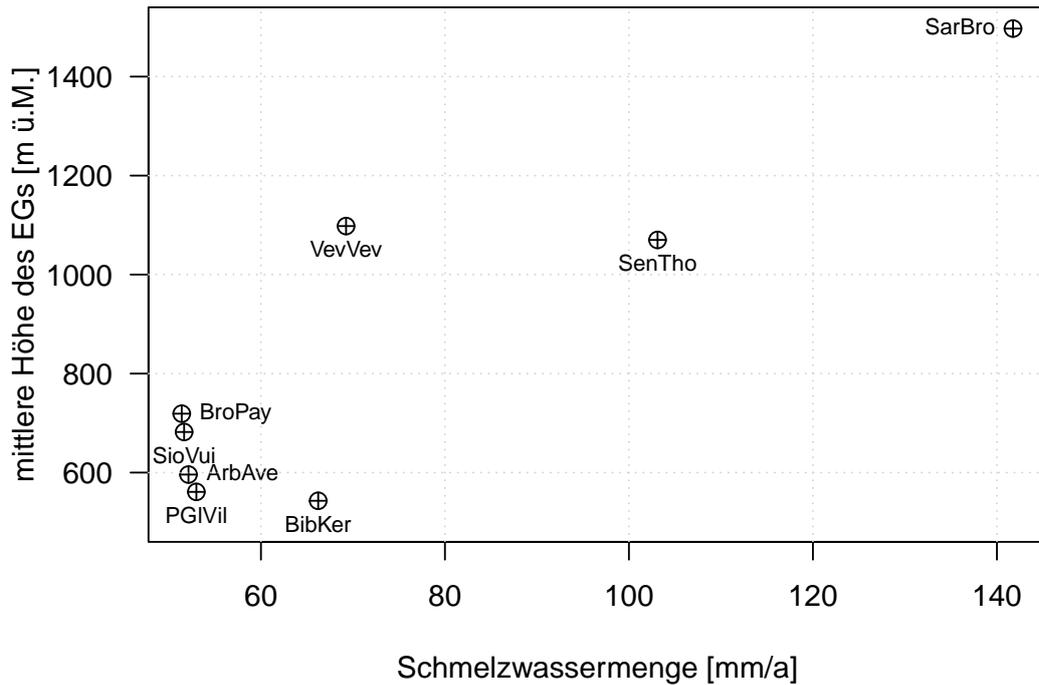


Abb. 3.6: Die mittlere jährliche Schmelzwassermenge aufgetragen gegen die mittlere Höhe der Einzugsgebiete

In einem zweiten Validierungsschritt prüften wir, wie gut das Modell die mittlere langjährige Jahreswasserbilanz abbildet. Dazu musste sie zuerst aus den Beobachtungsdaten berechnet werden. Bei der Jahresbilanz kann man davon ausgehen, dass das Speicherglied  $\Delta S \approx 0$  ist. Bei den Berechnungen zeigte es sich, dass die Wasserbilanz mit der einfachen Bilanzgleichung

$$Niederschlag(N) = Abfluss(A) + Verdunstung(V) \quad (3.1)$$

in sich nicht geschlossen ist. Deshalb musste die Bilanzgleichung mit einem Restglied ( $R_g$ ) ergänzt werden:

$$N = A + V + R_g \quad (3.2)$$

Bei der Darstellung der Ergebnisse kann den Einfluss einer auffälligen Speicheränderung nicht berücksichtigt werden, weil schlicht und einfach die Daten dazu fehlen. Mithilfe hydrogeologischer Karten versuchten wir zu evaluieren, ob im Einzugsgebiet unterirdische Zuflüsse und/oder unterirdische Abflüsse auftreten und passten dann die Bilanzgleichung entsprechend an. Konkret wurde dem Restglied der Bilanzgleichung – berechnet aus Niederschlag - oberirdischer Abfluss - Verdunstung – die aus der hydrogeologischen Karte er-

mittelten unterirdischen Abflusskomponente zugeordnet. Unberücksichtigt blieb dabei, dass auch allfällige Fehler bei den Beobachtungen in diesem Restglied subsumiert sind.

Die Validierung der modellierten Wasserbilanz mittels der Beobachtungen zeigte dann, dass die Modellvariante cal001, welche auf unkorrigierten Niederschlägen basiert, am besten abschneidet, sodass wir sie für die finalen Berechnungen verwendeten. Die mit cal001 modellierten Wasserhaushaltselemente sind auch im räumlichen Kontext des Kantons Freiburg plausibel, wie Abbildung 3.7 unterstreicht. Es sind nicht nur die zu erwartenden Höhengradienten zu erkennen, sondern auch ihre Werte sind plausibel.

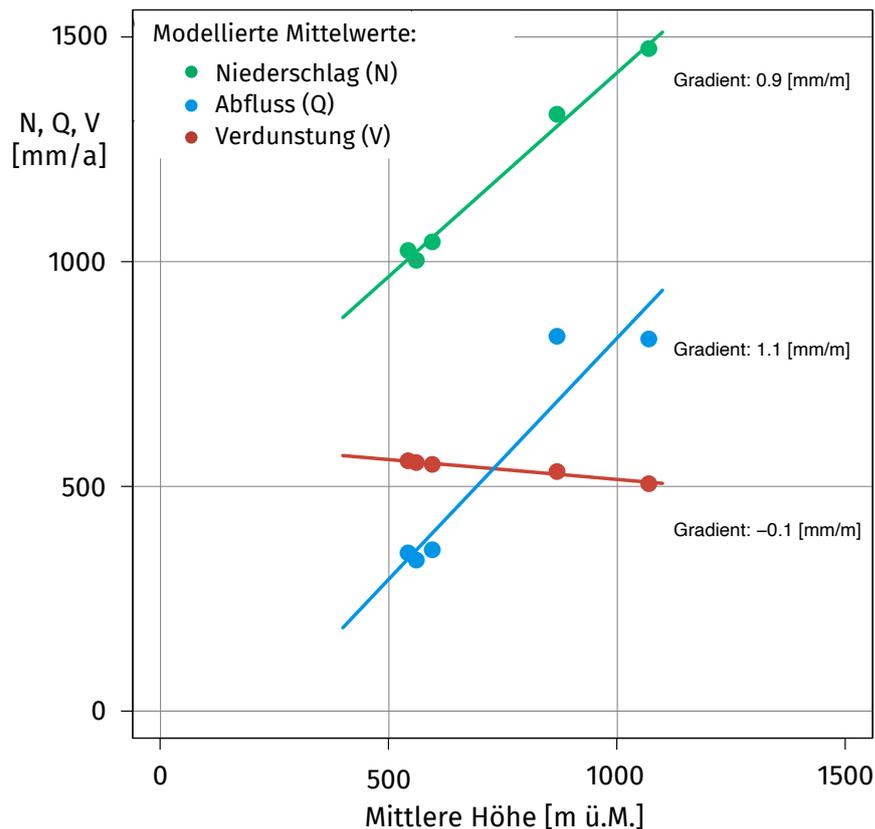


Abb. 3.7: Gradienten der modellierten Wasserhaushaltselemente

Die Modellvariante cal001 ist aus Sicht des Wasserhaushalts die beste. Obwohl andere Modellvarianten bestehen, welche die Abflusskenngrößen (leicht) besser abbilden, stellt die Variante cal001 insgesamt einen guten Kompromiss dar.

Im Resultateteil wird die Modellgüte der repräsentativen Einzugsgebiete im Detail diskutiert.

### 3.3.2 Darstellung der Ergebnisse

Die Regionen stehen im Mittelpunkt der Präsentation der Resultate des hydrologischen Teils. Die Beschreibung der hydrologischen Veränderungen in den Regionen basiert auf dem repräsentativen Einzugsgebiet. Für jede Region wird eine Dokumentation erarbeitet, welche die wesentlichen Ergebnisse mittels Tabellen und Diagrammen visualisiert und in kurzen Texten diskutiert. Wichtige Aspekte zum Aufbau und Gestaltung einzelner Tabellen und Diagramme seien hier erläutert:

- Die Tabellen der Veränderungen der Abflusskenngrößen sind zur besseren Lesbarkeit mit Farben unterlegt.
- Bei den Diagrammen, welche die Abflussveränderungen den Niederschlagsveränderungen gegenüberstellen, sind die Werte der Referenzperiode 1981–2010 in der Mitte des Diagramms (Koordinate (0,0)) geplottet. Die zukünftigen Veränderungen sind als relative Werte dazu eingezeichnet.
- Ein sehr aussagekräftige Grafik zum Wasserhaushalt ist das in Abbildung 3.8 dargestellte Budyko-Diagramm<sup>4</sup>. Es koppelt den Wasserhaushalt mit dem Energiehaushalt. In diesem Diagramm werden die aktuelle Verdunstung (AET) und die potentielle Verdunstung (PET) mit der Niederschlagshöhe (N) normiert. Der Quotient  $PET/N$  (x-Achse) ist ein klimatischer Index. Bei Werten  $> 1$  handelt es sich um ein wasserlimitiertes System und bei Werten  $< 1$  um ein energielimitiertes System. Der Quotient  $AET/N$  (y-Achse) beschreibt den Anteil der aktuellen Verdunstung am Gesamtniederschlag. Bei Werten  $> 0.5$  dominiert die Verdunstung den Wasserhaushalt, bei Werten  $< 0.5$  hingegen dominiert der Abfluss den Wasserhaushalt. Wir beschränken uns bei der Darstellung der Budyko-Kurve auf den Sommer (JJA), weil in dieser Jahreszeit Knappheitssituationen mit Wasserlimitierung mit der grössten Wahrscheinlichkeit auftreten. Dabei müssen wir allerdings den Einfluss einer auffälligen Speicheränderungen aussen vor lassen, weil Daten dazu schlicht und einfach fehlen.

Im Resultateteil werden auch Boxplots zur Visualisierung der Resultate verwendet. Die Boxplots stellen die Streuung der Werte einer Kenngrösse dar. In der Box liegen die mittleren 50 % der Daten. Sie wird durch das obere und das untere Quartil begrenzt. Die Länge der Box entspricht dem Interquartilsabstand. Durch die Antennen werden die ausserhalb der Box liegenden Werte dargestellt. Die folgende Abbildung 3.9<sup>5</sup> zeigt die Definition der Antennen (Whiskers). Statistische Ausreisser sind durch Punkte markiert.

---

<sup>4</sup>Budyko, M. (1976): Climate and Life. New York.

<sup>5</sup>aus: <https://www.r-bloggers.com/2012/06/whisker-of-boxplot/>

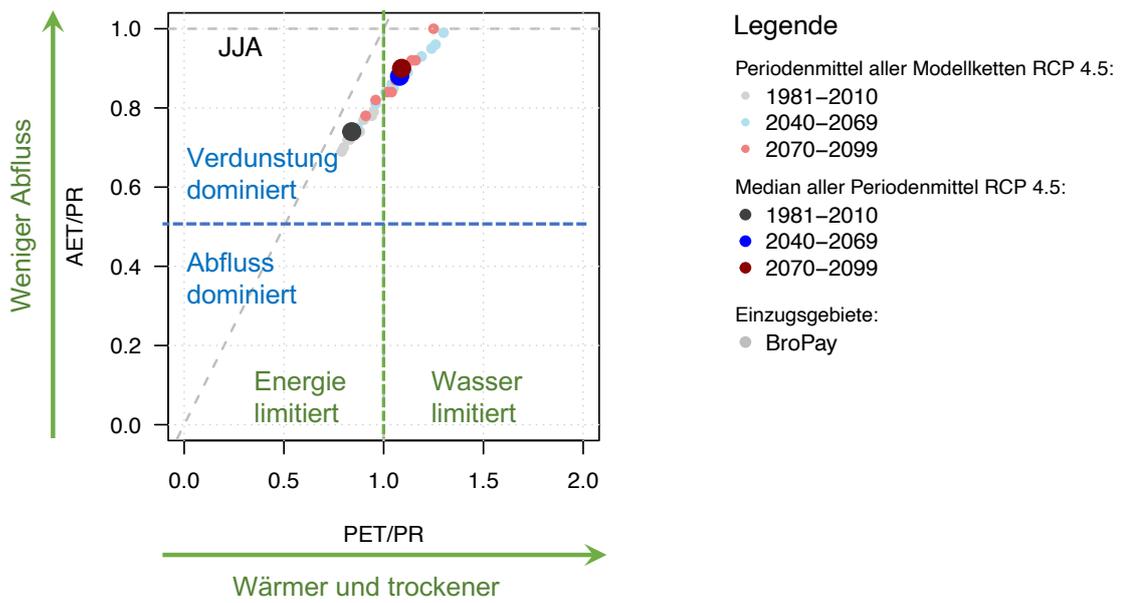


Abb. 3.8: Erläuterung zum Budyko-Diagramm

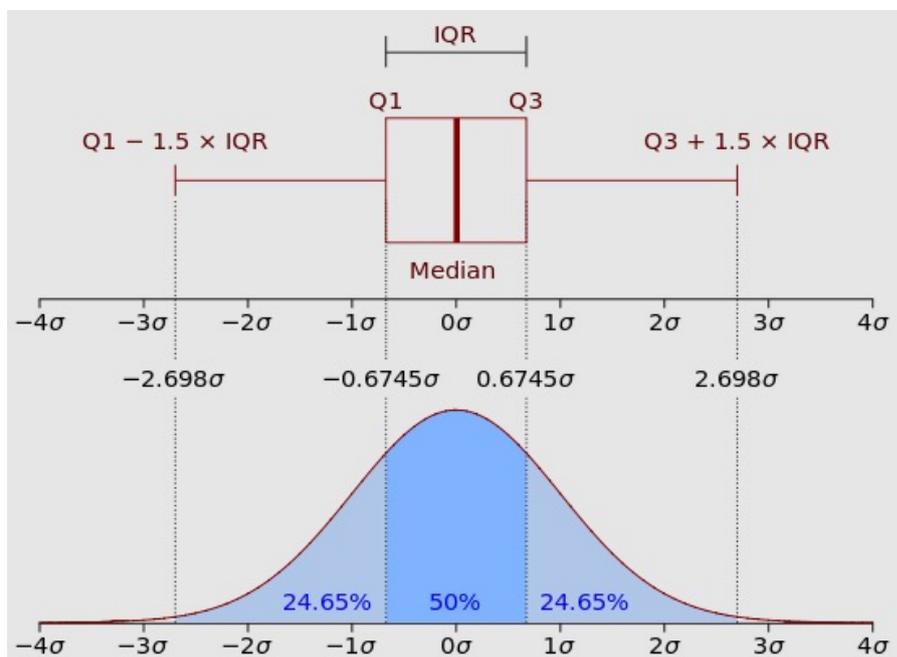


Abb. 3.9: Definition der Boxplots

## 3.4 Resultate

### 3.4.1 Region Seeland-Grosses Moos, Région des 3 Lacs Grand Marais

#### Ausgangslage

Die Region Seeland-Grosses Moos wird durch das Einzugsgebiet der Bibere@Kerzers repräsentiert. Dieses Einzugsgebiet besitzt folgende Charakteristiken:

- Fläche: 49 km<sup>2</sup>
- Höhenverhältnisse:
  - minimale Höhe: 442 m ü.M.
  - mittlere Höhe: 543 m ü.M.
  - maximale Höhe: 670 m ü.M.

Das Einzugsgebiet der Bibere ist das tiefste der in diesem Bericht untersuchten Gebiete. Zwar sind die Unterschiede bei der mittleren Höhe zum Einzugsgebiet der Petite Glâne und der Arbogne relativ klein, aber die maximale Höhe ist bei der Bibere rund 150 m tiefer als bei den beiden anderen Gebieten. Innerhalb des Einzugsgebiets der Bibere beträgt der Höhenunterschied zwischen der maximalen und der minimalen Höhe nur gerade 230 m. Es handelt sich also um ein sehr flaches Einzugsgebiet. Aus der Sicht der Landnutzung dominiert das Ackerland mit einem Flächenanteil von rund 60 %, gefolgt vom Wald mit einem Anteil von rund 20 %. Der Anteil der Siedlung ist mit rund 10 % vergleichsweise hoch.

Die hydrologischen Kennwerte werden in der Regel in der Dimension Millimeter ausgegeben. Bezogen auf das Einzugsgebiet der Bibere gilt: 1 mm  $\hat{=}$  49'000 m<sup>3</sup>.

## Herleitung der Wasserbilanz



Abb. 3.10: Hydrogeologische Situation der Bibere. Ausschnitt aus dem Hydrologischen Atlas der Schweiz

Gemäss der hydrogeologischen Karte im Hydrologischen Atlas der Schweiz<sup>6</sup> bestehen im Einzugsgebiet der Bibere unterirdische Zuflüsse (Abb. 3.10). Aufgrund dieser Situation darf folgende Wasserbilanz erwartet werden:

$$\text{Niederschlag (N)} = \text{oberird. Abfluss (Ao)} - \text{unterird. Zufluss (Zu)} + \text{Verdunstung (V)} \quad (3.3)$$

Aus den Beobachtungsdaten der Periode 1981–2010 kann die effektive Wasserbilanz abgeleitet werden. Sie ist in der Tabelle 3.4.1 (vgl. «obs») zusammengestellt. Beim oberirdischen Abfluss handelt es sich um den Gerinne abfliessenden Abfluss.

<sup>6</sup><https://hydromaps.ch>

Tab. 3.4.1: Vergleich der beobachteten und modellierten Wasserbilanz der Bibere in der Periode 1981–2010. N: Niederschlag, Ao: oberirdischer Abfluss, Au: unterirdischer Abfluss, V: Verdunstung. obs: Beobachtungen. Niederschlag aus RhiresD und Abfluss aus Messungen des BAFU abgeleitet, Verdunstung wird aus Modelldaten übernommen, Au: als Restglied der Wasserbilanz berechnet. mod: modellierte Daten (Modellversion RCP 4.5)

	Periode	mm/a				%			
		N	Ao	Au	V	N	Ao	Au	V
obs	1981–2010	1039	377	105	557	100	36	10	54
mod	1981–2010	1024	353	114	557	100	34	11	55

In der beobachteten Wasserbilanz ist kein unterirdischer Zufluss (Zu) ersichtlich. Vielmehr suggeriert sie einen unterirdischen Abfluss und die Bilanzgleichung lautet somit:

$$N = Ao + (Au + V) \quad (3.4)$$

Der unterirdische Abfluss ist das Restglied der Wasserbilanz:

$$Au = N - Ao - V \quad (3.5)$$

Dabei ist zu berücksichtigen, dass in diesem Restglied auch alle Fehler der Messungen enthalten sind. Bei der beobachteten Wasserbilanz mussten wir für die Bilanzbetrachtungen auf die mit GR4J modellierte Jahresverdunstung von 557 mm zurückgreifen. Der Vergleich mit der im Hydrologischen Atlas ausgewiesenen Verdunstung von 589 mm (Periode 1973–1992) – mit einer absoluten Abweichung von -32 mm und einem relativen Fehler von -5 % – belegt die Tauglichkeit dieses Modellwerts.

Die mittleren beobachteten Jahresniederschläge liegen bei der Bibere etwas über 1000 mm. Rund 30 % dieses Jahresniederschlags fallen im Sommer (JJA), wobei die Unterschiede zu den anderen jahreszeitlichen Niederschlägen unter 100 mm liegen (Abb. 3.11). Aus der Sicht des Abflusses wird dieser Niederschlag durch die ausgeprägte Saisonalität der Verdunstung überprägt, sodass vor allem im Sommer nur noch wenig Abfluss, nämlich durchschnittlich 72 mm, gebildet wird. Bereits heute kann das Gebiet als sommertrocken bezeichnet werden.

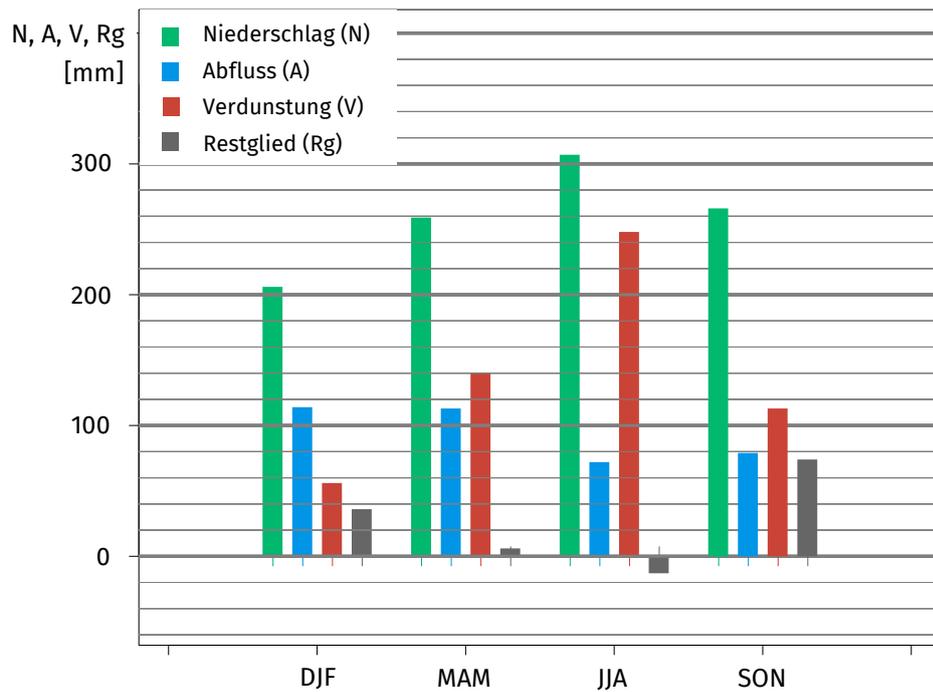


Abb. 3.11: Mittlere saisonale Wasserbilanz der Bibere der Referenzperiode 1981–2012, basierend auf den Beobachtungsdaten

### Beurteilung der Modellgüte

Das hydrologische Modell GR4J reproduziert die beobachtete Jahreswasserbilanz als Ganzes sehr gut. Die folgende Tabelle 3.4.2 verdeutlicht, dass das Modell GR4J den Niederschlag (P) und den oberirdischen Abfluss (MQ) der Referenzperiode insgesamt gut abbildet. Aus der Sicht der mittleren Jahreswerte ist die Modellgüte beim Niederschlag ausgezeichnet und beim Abfluss gut. Auch saisonal werden die Winterniederschläge unter beiden Emissionsszenarien sehr gut modelliert. Hingegen bestehen bei der Modellgüte des saisonalen Abflusses Unterschiede: einer sehr guten Modellierung im Herbst stehen eine befriedigende Modellierung im Frühling und Sommer und eine knapp ungenügende Modellierung im Winter gegenüber.

Tab. 3.4.2: Vergleich der beobachteten und modellierten saisonalen Werte des Niederschlags und des oberirdischen Abflusses der Bibere in der Periode 1981–2010 für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

		RCP 4.5		RCP 8.5	
		P	MQ	P	MQ
Y	CH2018	1027	356	1027	355
Y	OBS	1023	377	1023	377
Y	$\Delta$ mm	4	-21	4	-22
Y	$\Delta$ %	0	-6	0	-6
DJF	CH2018	218	91	215	91
DJF	OBS	217	114	217	114
DJF	$\Delta$ mm	1	-23	-2	-23
DJF	$\Delta$ %	0	-20	-1	-20
MAM	CH2018	253	99	253	99
MAM	OBS	253	113	253	113
MAM	$\Delta$ mm	0	-14	0	-14
MAM	$\Delta$ %	0	-12	0	-12
JJA	CH2018	295	85	294	85
JJA	OBS	289	72	289	72
JJA	$\Delta$ mm	6	13	5	13
JJA	$\Delta$ %	2	18	2	18
SON	CH2018	264	80	265	80
SON	OBS	264	79	264	79
SON	$\Delta$ mm	0	1	1	1
SON	$\Delta$ %	0	1	0	1

**Fazit:** Das hydrologische Modell kann die beobachteten Niederschläge durchwegs sehr gut reproduzieren, stösst aber bei den Abflüssen im Winter an seine Grenzen.

### Veränderungen des mittleren Niederschlags

Die Tabellen 3.4.3 und 3.4.4 beschreiben die relativen Veränderungen der mittleren Niederschläge, während die beiden Abbildungen 3.12 und 3.13 einerseits die absoluten Veränderungen aufzeigen und andererseits auf die Streuung der Modellketten und damit auf die Modellunsicherheiten hinweisen.

Die Veränderungen der mittleren Jahresniederschläge sind bei der Bibere klein; der Absolutwert der Veränderungen liegt unter 4 mm. Im Winter (DJF) sind die Zunahmen der mittleren Niederschläge unter RCP 4.5 mittel bis gross und unter RCP 8.5 gross bis sehr gross. Die maximale Zunahme beträgt 25 %. Auch im Frühling (MAM) nehmen die Niederschläge durchwegs zu, unter RCP 4.5 in einem kleineren Ausmass als unter RCP 8.5.

Im Sommer nimmt der mittlere Niederschlag in allen Kombinationen zwischen den Zeitperioden und den Emissionsszenarien ab, unter RCP 4.5 bis -12 % und unter RCP 8.5 bis -23 %. Auffällig ist die im Vergleich zur Referenzperiode grössere Abnahme des Niederschlags in der mittleren Zukunft als in der fernen Zukunft. Dies gilt für das Szenario RCP 4.5. Hingegen wird das Defizit unter RCP 8.5 je grösser, je weiter man sich von der Referenzperiode entfernt. Im Herbst sind die Veränderungen – alles Zunahmen – mehrheitlich klein.

Tab. 3.4.3: Mittlere jährliche und saisonale Niederschläge der Bibere@Kerzers (BibKer). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 4.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	1025.7	217.2	252.8	293.8	263.7	mm
2040-2069	-1.8	5.9	1.4	-12.4	2.1	%
2070-2099	2.8	10.9	8.7	-6.8	5.5	%

Legende: -20 -10 -5 5 10 20 [%]

Tab. 3.4.4: Mittlere jährliche und saisonale Niederschläge der Bibere@Kerzers (BibKer). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 8.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	1025.7	215.3	252.8	293.8	264.6	mm
2040-2069	3.9	15.7	12.3	-7.1	3.8	%
2070-2099	1.4	25.0	15.2	-23.0	0.7	%

Legende: -20 -10 -5 5 10 20 [%]

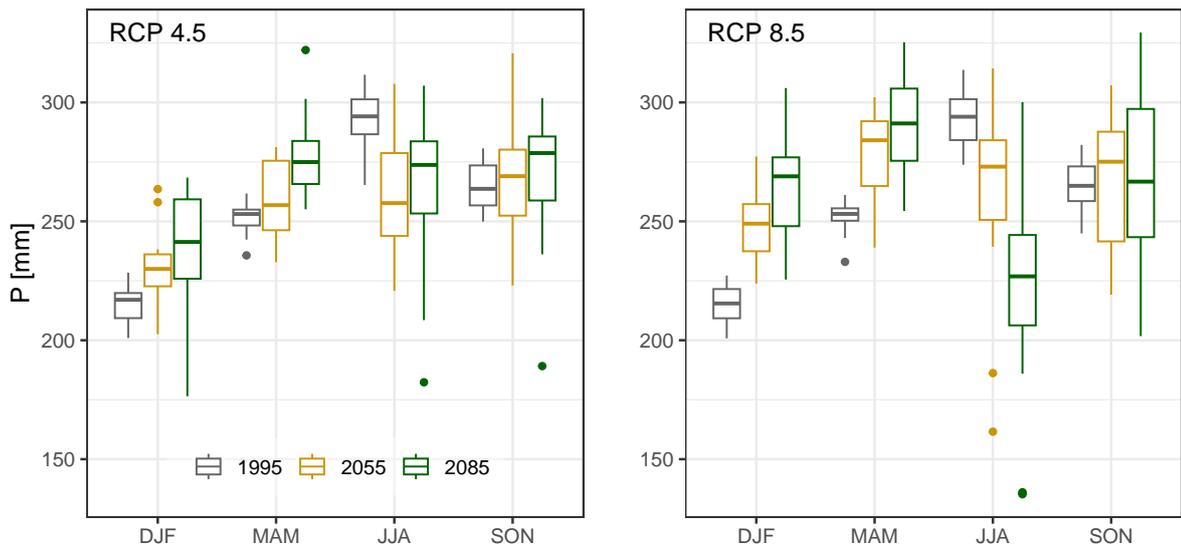


Abb. 3.12: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren saisonalen Niederschlagssummen für das Einzugsgebiet der Bibere in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

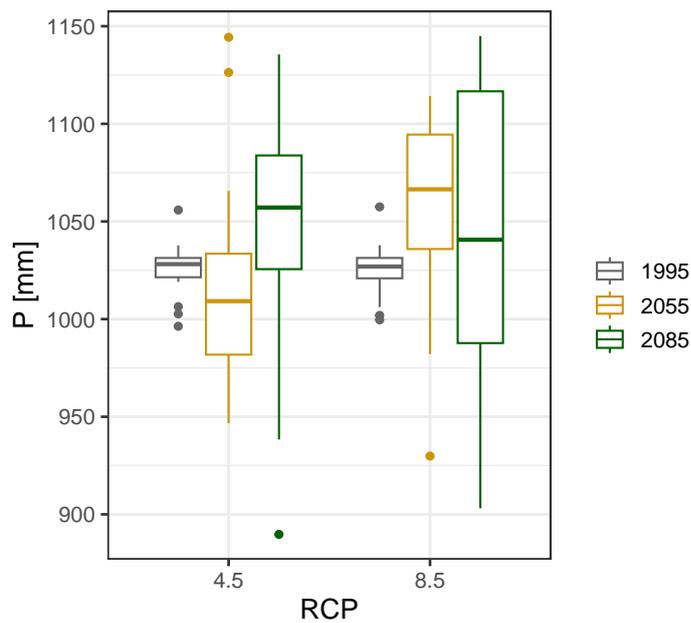


Abb. 3.13: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren Jahresniederschlags für das Einzugsgebiet der Bibere in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

## Veränderungen des mittleren Abflusses

Unter RCP4.5 zeichnet sich beim Jahresabfluss ein interessantes Muster ab. Nach einer anfänglich grossen Abnahme gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 in der mittleren Zukunft, nähert sich der mittlere Jahresabfluss in der fernen Zukunft wieder jenem der Referenzperiode an. Unter RCP8.5 hingegen entfernt sich der mittlere Jahresabfluss in der fernen Zukunft mit einer Abnahme von rund -21 % weiter vom Jahresabfluss der Referenzperiode (vgl. Tab. 3.4.5 und 3.4.6 sowie Abb. 3.14 und 3.15):

Bei den saisonalen Abflüssen sind unter RCP4.5 in allen Kombinationen zwischen Emissionsszenarien und Zukunftsperioden Abnahmen vorhanden. Gross sind die Abnahmen im Sommer (JJA) und Herbst (SON). Mit Ausnahme der mittleren Zukunft im Winter und Frühling gilt dies auch für das Szenario RCP8.5, bei dem auch das Ausmass der Abnahmen in der fernen Zukunft wesentlich grösser ist als unter RCP4.5. Im Sommer und Herbst liegen die Abnahmen zwischen -30 und -40 %. Die Bibere ist das einzige Einzugsgebiet, bei dem die mittleren winterlichen Abflüsse abnehmen (Ausnahme: RCP 8.5, mittlere Zukunft). In allen anderen Gebieten nehmen Sie in zum Teil grossen Ausmass zu.

Tab. 3.4.5: Mittlere jährliche und saisonale Abflüsse der Bibere@Kerzers (BibKer). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP4.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	354.0	90.3	99.5	84.9	79.4	mm
2040-2069	-12.4	-2.0	-8.3	-19.4	-14.9	%
2070-2099	-6.2	-2.0	-0.9	-10.8	-12.6	%

Legende: ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 3.4.6: Mittlere jährliche und saisonale Abflüsse der Bibere@Kerzers (BibKer). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP8.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	354.0	91.2	98.6	84.9	80.3	mm
2040-2069	-5.2	5.0	3.7	-11.8	-18.2	%
2070-2099	-20.6	-13.0	-6.5	-31.2	-39.8	%

Legende: ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

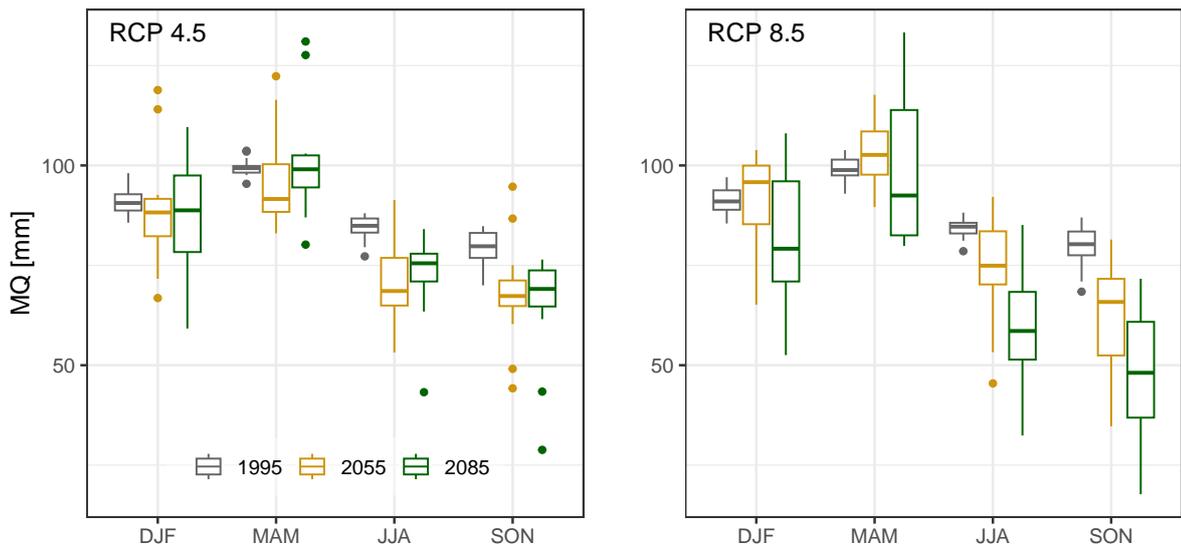


Abb. 3.14: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren saisonalen Abflüsse der Bibere in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

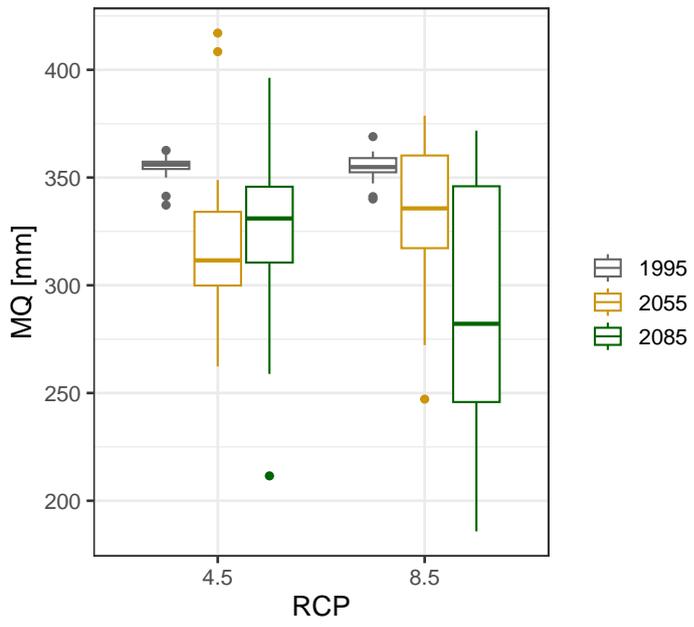


Abb. 3.15: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren Jahresabflüsse der Bibere in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

Die Abbildung 3.16 ordnet die modellierten relativen Veränderungen in den Kontext der Beobachtungen der Referenzperiode 1981–2010 ein. Sie visualisiert einerseits die Abweichungen zwischen den Medianwerten und positioniert andererseits die zukünftigen Medianwerte im Streubereich der einzeljährlichen Werte der Referenzperiode 1981–2010.

Im Winter (DJF) streuen die zukünftigen Mediane eng um den Median der Referenzperiode, sind aber mehrheitlich kleiner als dieser Median. Auffallend ist die Abnahme unter RCP 8.5 in der fernen Zukunft. Der Median liegt am unteren Rand der Box. Er wird in rund 75 % der Abflüsse in den Einzeljahren zwischen 1981 und 2010 überschritten. Wie bereits oben erwähnt, ist die Abnahme der mittleren winterlichen Abflüsse im Vergleich mit den anderen untersuchten Einzugsgebieten nicht typisch. Im Frühling streuen die zukünftigen Mediane eng und der Medianwert der Referenzperiode. Im Sommer und Herbst befinden sich die Mehrheit der Abnahmen innerhalb der Box. In der fernen Zukunft unter RCP 8.5 sprengt dann die Abnahme diesen Rahmen, was das sehr grosse Ausmass dieser Veränderungen unterstreicht.

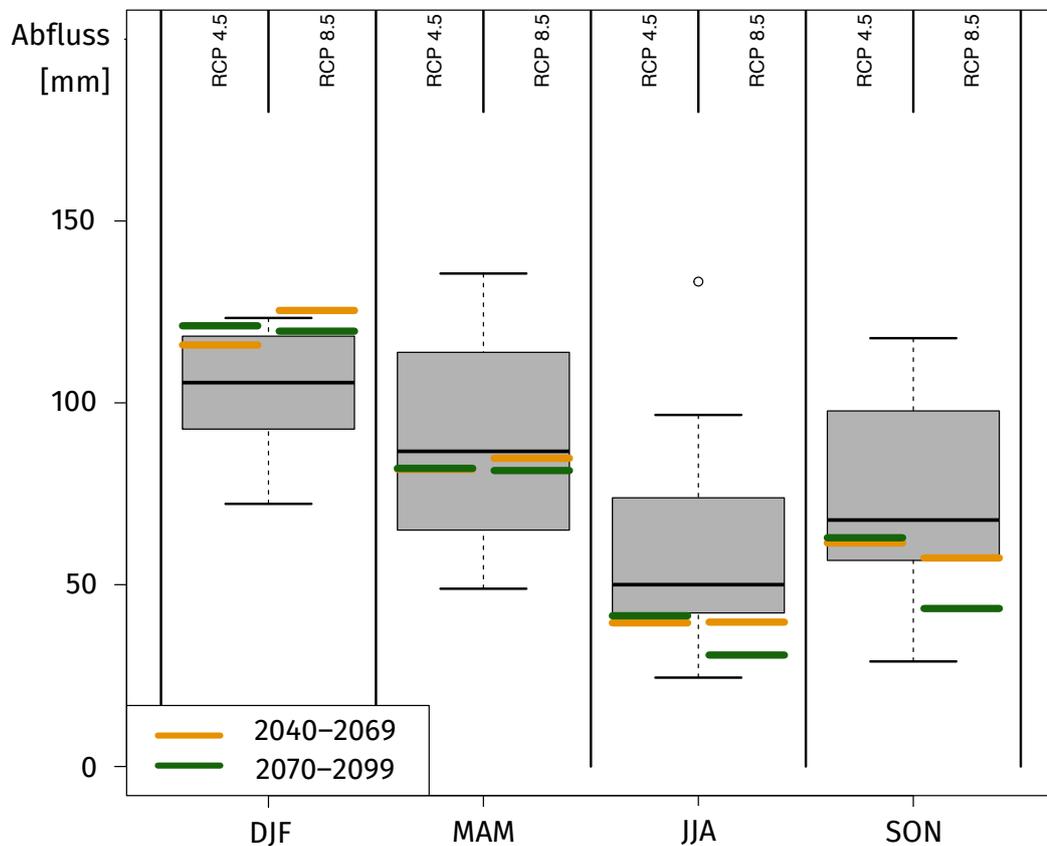


Abb. 3.16: Verteilung der saisonalen Abflüsse der Bibere in der Periode 1981–2010, abgeleitet aus den Beobachtungen des BAFU und des Kantons Freiburg im Vergleich zu den medianen Abflüssen in der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

## Veränderungen der aktuellen Verdunstung

Die mittlere aktuelle Jahresverdunstung nimmt in Abhängigkeit der Zukunftsperiode und des Emissionsszenarios um rund 5 bis 20 % zu.

Auf saisonaler Basis liegen die Veränderungen unter RCP 4.5 zwischen 6 und 15 % und unter RCP 8.5 zwischen 10 und 26 %. Unter RCP 4.5 sind die Zunahmen im Winter und Frühling grösser als in den übrigen Jahreszeiten. Zudem sind die Zunahmen im Vergleich mit der Referenzperiode in der fernen Zukunft grösser als in der mittleren Zukunft.

Unter RCP 8.5 streuen die Zunahmen in der mittleren Zukunft im Bereich von 10 %, während sie in der fernen Zukunft zwischen 17 und 26 % liegen. Der Wert von 26 % im Winter darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass die absoluten Zunahmen aufgrund des tiefen Ausgangswerts in der Referenzperiode (55.7 mm) eher klein sind.

Tab. 3.4.7: Aktuelle Verdunstung im Einzugsgebiet der Bibere@Kerzers (BibKer) und relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 4.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	558.5	55.7	138.7	247.3	115.0	mm
2040-2069	6.5	11.5	7.2	5.9	5.6	%
2070-2099	9.8	14.8	10.5	9.2	8.7	%

Legende: ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 3.4.8: Aktuelle Verdunstung im Einzugsgebiet der Bibere@Kerzers (BibKer) und relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 8.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	558.5	55.7	138.7	247.3	114.1	mm
2040-2069	11.1	14.8	11.2	10.3	10.4	%
2070-2099	19.0	26.2	19.7	17.3	16.8	%

Legende: ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

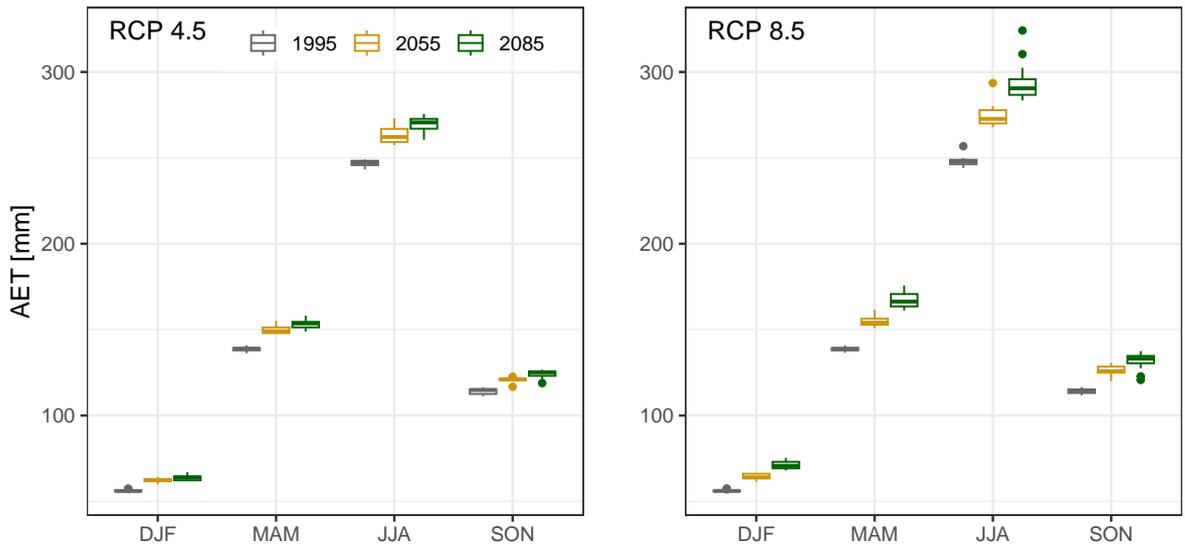


Abb. 3.17: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren saisonalen Verdunstung für das Einzugsgebiet der Bibere in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

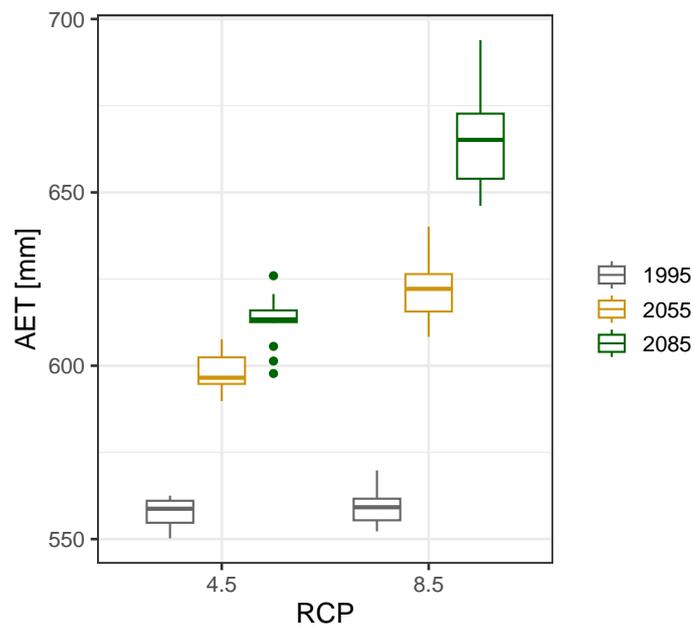


Abb. 3.18: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren Jahresverdunstung für das Einzugsgebiet der Bibere in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

## Veränderungen des Schnees

Der Einfluss des Schnees auf das Abflussverhalten ist in diesem Einzugsgebiet aufgrund dessen tiefen Höhenlage gering. Das dürfte mit ein Grund sein, wieso es dem Modell GR4J in Kombination mit dem Schneemodul CemaNeige nicht gelungen ist, den Schneeanteil am Gesamtniederschlag plausibel zu modellieren. Deshalb verzichten wir hier auf eine Darstellung der Ergebnisse.

## Wasserhaushaltliche Betrachtungen zu den Veränderungen

In diesem Kapitel betrachten wir die Veränderungen der Wasserhaushaltselemente in deren Zusammenspiel. Dazu werden die in den obigen Tabellen ausgewiesenen relativen Veränderungen von Niederschlag (N), Abfluss (A) und aktueller Verdunstung (V) den Beobachtungen der Referenzperiode 1981–2010 (siehe Tab. 3.4.2) aufgeprägt. Das Hauptziel ist es, die Veränderungen des Abflusses im Kontext der Veränderungen der anderen Wasserhaushaltselemente zu verstehen. Bei dieser Betrachtungsweise gilt:

$$\Delta A = \Delta N - \Delta V - \Delta Rg \quad (3.6)$$

Bei der Anwendung dieser Gleichung sind unbedingt die Vorzeichen zu beachten. So gilt beim Jahresabfluss unter RCP 4.5 in der mittleren Zukunft (um 2055, s. Abb. 3.19) folgende Beziehung:

$$-47 = -19 - 36 - (-8) [mm] \quad (3.7)$$

Die Gleichung belegt, dass die Abnahme des Jahresabflusses (-47 mm) entscheidend durch die Zunahme der Jahresverdunstung (36 mm) geprägt ist und dass aber die Abnahme des Jahresniederschlags (-19 mm) auch eine Rolle spielt. In der fernen Zukunft unter RCP 4.5 nimmt der mittlere Jahresniederschlag gegenüber der Referenzperiode zu, trotzdem nimmt der mittlere Jahresabfluss nicht entsprechend zu, weil der Effekt eines grösseren mittleren Jahresniederschlags durch die mittlere aktuelle Verdunstung kompensiert wird. Dasselbe Muster ist unter RCP 8.5 in der mittleren Zukunft erkennbar. Ganz anders die Bedingungen in der fernen Zukunft (RCP 8.5): Da der Jahresniederschlag in dieser Periode wieder ähnlich ist wie in der Referenzperiode, führt die starke Zunahme der Verdunstung dazu, dass der Abfluss nun stark abnimmt.

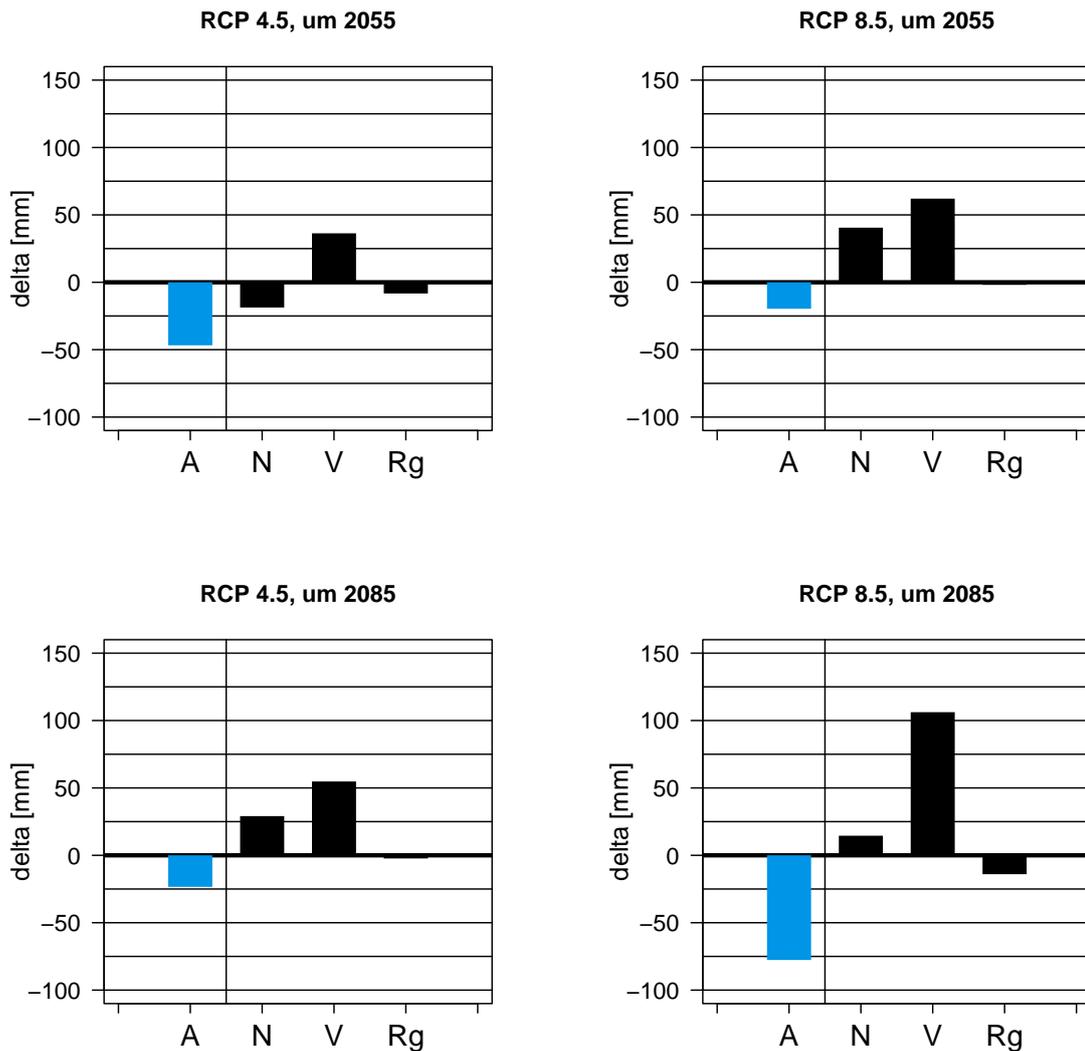


Abb. 3.19: Vergleich der Veränderungen der Jahresbilanz im Einzugsgebiet der Bibere@Kerzers. Die Säulen zeigen das Ausmass und das Vorzeichen der Veränderungen (Zu- oder Abnahmen) in mm/a. Die Grafik beschreibt zudem, welchen Beitrag die Veränderungen von Niederschlag (N), Verdunstung (V) sowie des Restglieds (Rg) zur Veränderung des Abflusses (A, blaue Säule) leisten. Es gilt  $dA = dN - dV - dRg$  (d: Veränderung in mm)

Die Abflussabnahmen im Sommer sind durch das Wechselspiel zwischen der Abnahme des Niederschlags unter Zunahme der Verdunstung geprägt. Unter RCP4.5 in der mittleren Zukunft und unter RCP8.5 in der fernen Zukunft ist der Effekt der Abnahme des mittleren Jahresniederschlags grösser als jener der Zunahme der Verdunstung. In den beiden anderen Kombinationen halten sich die Effekte der Veränderung von Niederschlag und Verdunstung die Waage.

Der grosse negative Wert des Restglieds unter RCP 8.5, ferne Zukunft, suggeriert, dass zusätzliches Wasser im System vorhanden ist, vermutlich durch das Entleeren des Grundwasserspeichers. Als Folge davon fällt das Abflussdefizit weniger stark aus. Dies ist nicht nur ein Hinweis auf die Bedeutung der Speicher, sondern zeigt auch auf, dass das Abflussdefizit bedeutend grösser ausfallen würde, falls kein Wasser aus dem Grundwasserspeicher zufließen würde.

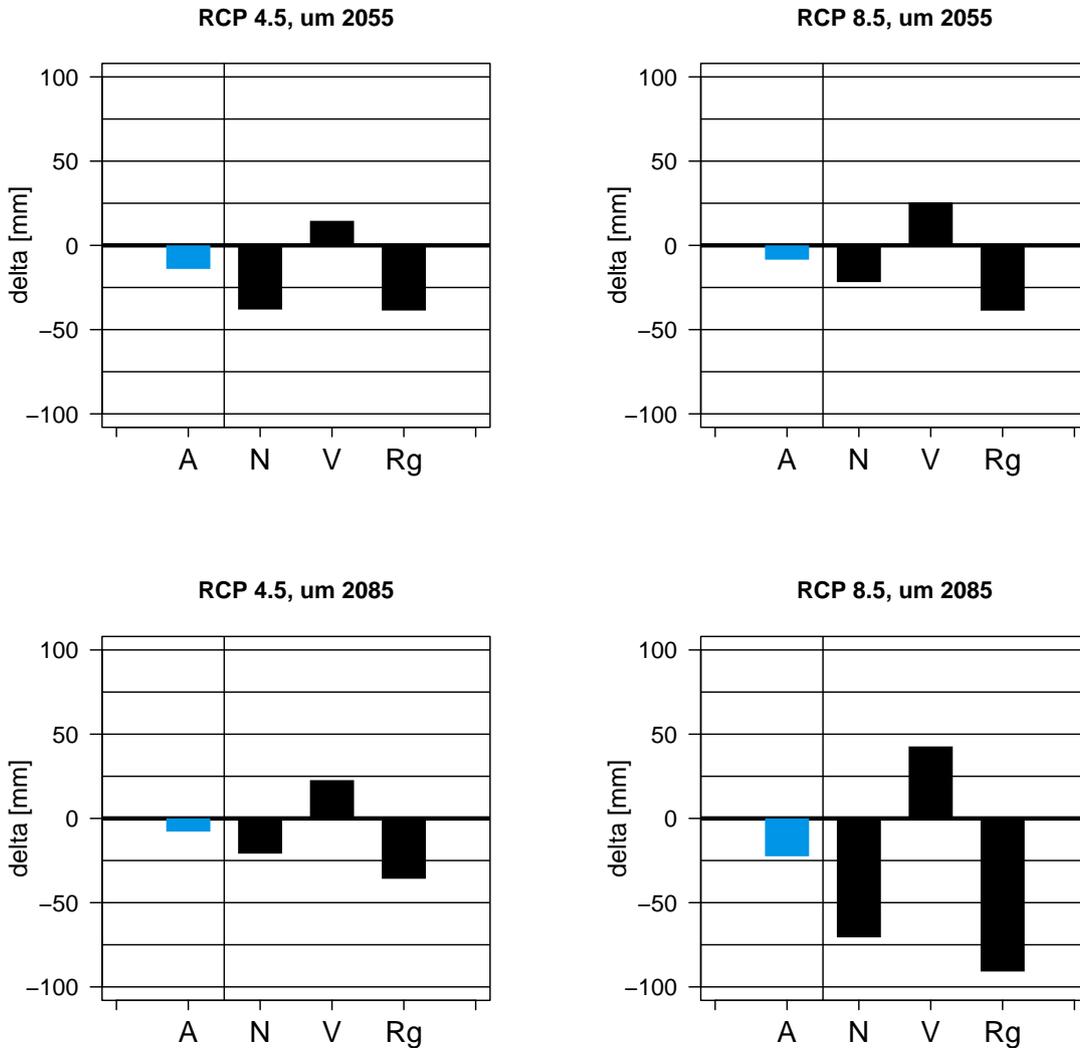


Abb. 3.20: Vergleich der Veränderungen der Wasserbilanz im Sommer (JJA) im Einzugsgebiet der Bi-bere@Kerzers. Die Säulen zeigen das Ausmass und das Vorzeichen der Veränderungen (Zu- oder Abnahmen) in mm/a. Die Grafik beschreibt zudem, welchen Beitrag die Veränderungen von Niederschlag (N), Verdunstung (V) sowie des Restglieds (Rg) zur Veränderung des Abflusses (A, blaue Säule) leisten. Es gilt  $dA = dN - dV - dRg$  (d: Veränderung in mm)

Die Abbildungen 3.21 und 3.22 (Grafiken oben rechts, JJA) werfen einen etwas anderen Blick auf das Wechselspiel zwischen der Abnahme des Niederschlags und der Zunahme der Verdunstung, welches zu einer Abnahme des Abflusses im Sommer führt. Wäre die Abflussabnahme allein durch die Niederschlagsabnahme gesteuert, läge der Medianwert der Veränderungen auf der Winkelhalbierenden. In der Grafik liegen sie aber unterhalb der Winkelhalbierenden, was den Einfluss der aktuellen Verdunstung belegt.

Betrachten wir nun die Abflussveränderungen im Winter (Grafiken oben links): Obwohl die mittleren Niederschläge zunehmen, nehmen die mittleren Abflüsse kaum zu oder sogar ab. Aufgrund der Wasserbilanz müsste der mittlere Abfluss im Winter zunehmen, weil die Verdunstungszunahme kleiner ist als die Zunahme des Niederschlags. Das ist aber nicht der Fall. Hier muss man den Abflusskoeffizienten ins Spiel bringen. Er beschreibt den Anteil des Niederschlags, der zum Abfluss gelangt. Der mittlere Abflusskoeffizient im Winter beträgt in der Referenzperiode 0.51 (Beobachtungsdaten) und nimmt auf 0.35 unter RCP 8.5, ferne Zukunft, ab. Das bedeutet, dass die Abflusseffizienz des zunehmenden Niederschlags durch den kleineren Abflusskoeffizienten verkleinert bzw. sogar kompensiert wird. Dies in Kombination mit der zunehmenden mittleren Verdunstung könnte zu einer Abnahme des mittleren winterlichen Abflusses führen.

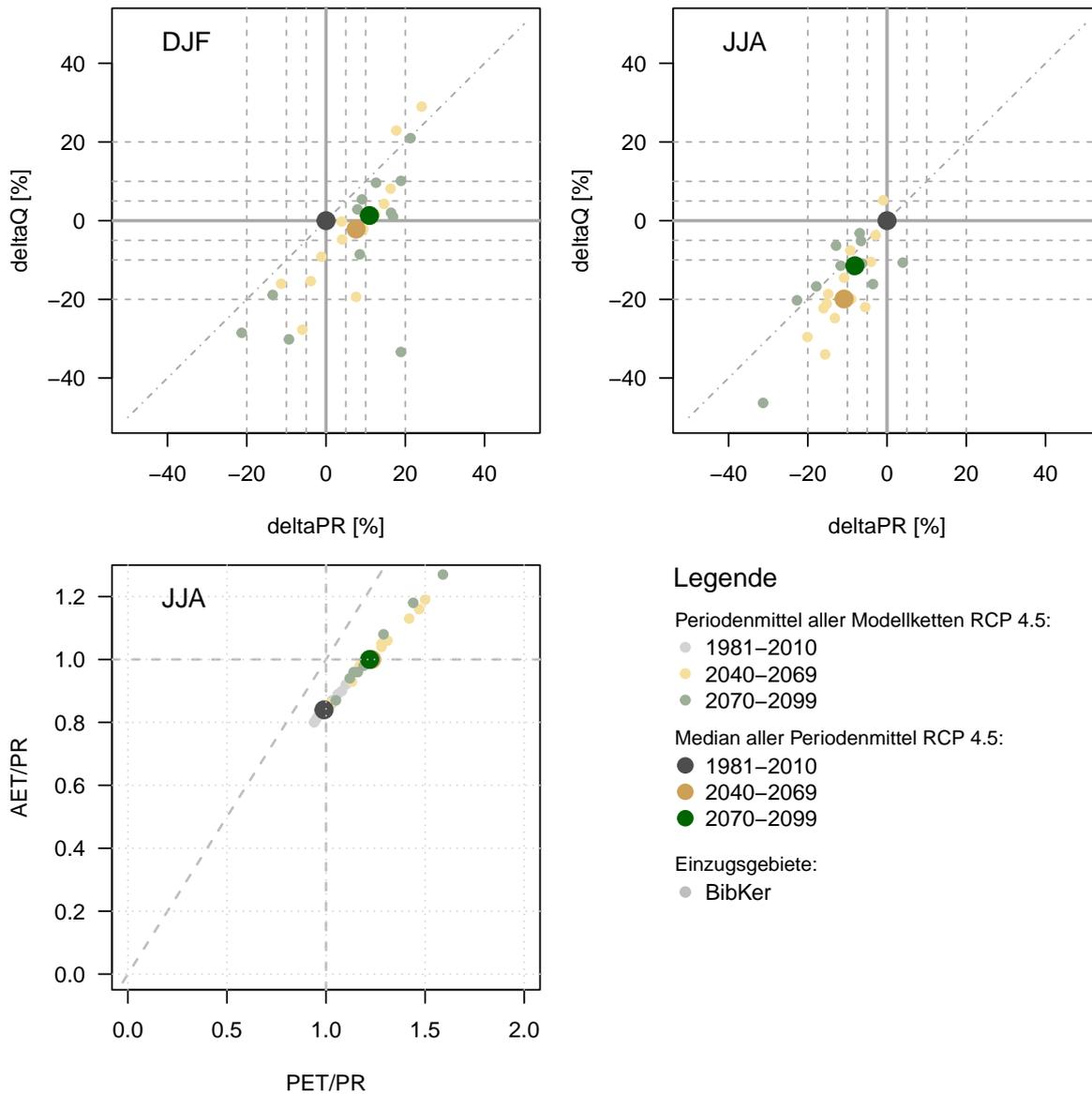


Abb. 3.21: Diagramme zum Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Bibere@Kerzers im Winter (DJF) und Sommer (JJA) unter RCP 4.5. Die oberen zwei Diagramme zeigen die relative Veränderung von Niederschlag (deltaPR) und Abfluss (deltaQ). Das Budyko-Diagramm wird im Methodenteil eingeführt und beschrieben. Die drei Diagramme zeigen die Streuung der Periodenmittel aller verwendeten Modellketten sowie den Medianwert dieser Periodenmittel.

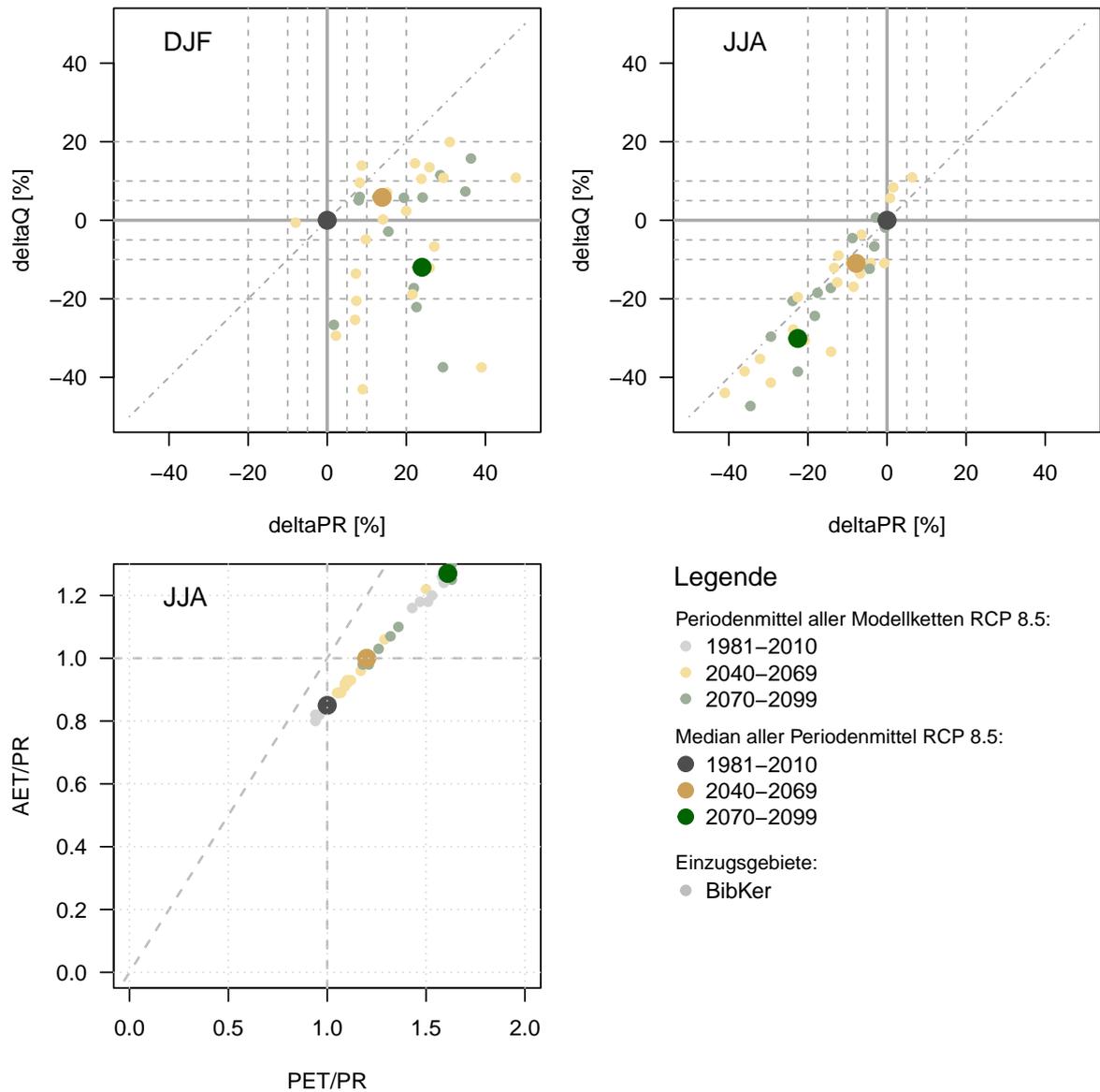


Abb. 3.22: Diagramme zum Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Bibere@Kerzers unter RCP 8.5

Die Streuung der Werte der einzelnen Modellketten um den Median zeigen in den Abbildungen , 3.21 und 3.22 wie gut die einzelnen Modellketten den Medianwert repräsentieren. Nehmen wir dazu das Beispiel der Modellierung unter RCP 4.5. Im Sommer sind sich die Modellketten weitestgehend über das Vorzeichen der Veränderungen einig, führen aber zu unterschiedlichen Aussagen bezüglich des Ausmasses der Veränderungen. Im Winter ist die Situation nicht derart eindeutig. So gehen einzelne Modellketten von einer Zunahme des Niederschlags und des Abflusses aus, andere von einer Abnahme. Trotzdem scharen sich die meisten Modellketten relativ nahe um die Medianwerte. Bei Unsicherheitsüberlegungen sind diese Streuungen der

Modellketten miteinzubeziehen. In der vorliegenden Arbeit werden sie durch die Diagramme mit den Box-plots dargestellt.

Gemäss den beiden Budyko-Diagrammen in den Abbildungen 3.21 und 3.22 liegt die Bibere in der Referenzperiode bereits im Übergangsbereich von der Energielimitierung zur Wasserlimitierung; mit anderen Worten, die Wasserknappheit ist bereits in einem mittleren Jahr der Referenzperiode ein Problem. Im Zuge der Klimaerwärmung wird diese Wasserlimitierung weiter zunehmen, wesentlich stärker unter RCP 8.5. Die Sommertrockenheit wird im Einzugsgebiet der Bibere zu einer grossen Herausforderung!

### Veränderungen der kleinsten und grössten Tagesabflüsse

Es muss nochmals deutlich darauf hingewiesen werden, dass wir hier sehr kleine und sehr grosse Tagesabflüsse analysieren. Bei den sehr grossen Tagesabflüssen handelt es sich nicht um Hochwasser bzw. Hochwasserspitzen im engeren Sinne des Wortes. Solche Hochwasser laufen im Stundenbereich ab und sind mit den hier verwendeten Tageswerten nicht erfassbar. Hingegen werden die kleinsten Abflüsse in der Tagesauf- lösung gut erfasst, weil die Schwankungen im Niedrigwasserbereich sehr träge ablaufen. Die kleinsten und grössten Tagesabflüsse werden durch sogenannte Quantile (q) beschrieben. Das Abflussquantil (Qq10) bei- spielsweise gibt jenen Abfluss (Q) an, der im Mittel an 10 % der Tage – also an 37 Tagen des Jahres – erreicht oder unterschritten wird.

Tab. 3.4.9: Kleinste und grösste Abflüsse der Bibere@Kerzers (BibKer). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 4.5

	Qq01	Qq05	Qq10	Qq90	Qq95	Qq99	
1981-2010	0.3	0.4	0.4	1.7	2.2	3.6	mm/d
1981-2010	0.2	0.2	0.2	1.0	1.2	2.1	m <sup>3</sup> /s
1981-2010	3.8	4.4	5.0	19.6	25.0	41.2	l/s/km <sup>2</sup>
2040-2069	-27.3	-23.7	-20.9	-9.5	-9.3	-7.0	%
2070-2099	-21.2	-18.0	-15.9	-2.4	-2.8	-1.7	%

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 3.4.10: Kleinste und grösste Abflüsse der Bibere@Kerzers (BibKer). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 8.5

	Qq01	Qq05	Qq10	Qq90	Qq95	Qq99	
1981-2010	0.3	0.4	0.4	1.7	2.2	3.6	mm/d
1981-2010	0.2	0.2	0.2	1.0	1.3	2.1	m <sup>3</sup> /s
1981-2010	3.7	4.3	4.9	19.4	25.2	42.0	l/s/km <sup>2</sup>
2040-2069	-21.0	-17.9	-15.8	0.1	-0.7	3.3	%
2070-2099	-41.4	-40.3	-38.2	-14.2	-12.8	-7.9	%

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 [%]

Bei den seltenen Tagesabflüssen dominieren im Vergleich zur Referenzperiode die Abnahmen. Letztere fallen bei den kleinsten Tagesabflüssen grösser aus als bei den grössten.

Bei den kleinsten Tagesabflüssen gilt: je kleiner sie sind, desto grösser sind die Abnahmen. Unter RCP 8.5 können die Abnahmen in der fernen Zukunft bis zu -40 % betragen.

Bei den grössten Tagesabflüssen zeichnet sich eine deutliche Differenz zwischen den beiden Emissionsszenarien ab. Unter RCP 4.5 sind sie klein bis mittel; sie liegen alle im Bereich zwischen 0 und -10 %. Die Abweichungen in der mittleren Zukunft sind grösser als in der fernen Zukunft. Mit anderen Worten: Die grössten Tagesabflüssen der fernen Zukunft nähern sich wieder den Werten der Referenzperiode an. Unter RCP 8.5 verstärken sich hingegen die Abnahmen gegenüber der Referenzperiode von der mittleren in die ferne Zukunft.

### 3.4.2 Region Untere Broye, région Basse Broye

#### Ausgangslage

Die Region Untere Broye wird durch das Einzugsgebiet der Petite Glâne@Villars-le-Grand repräsentiert. Dieses Einzugsgebiet besitzt folgende Charakteristiken:

- Fläche: 75.5 km<sup>2</sup>
- Höhenverhältnisse:
  - minimale Höhe: 435 m ü.M.
  - mittlere Höhe: 561 m ü.M.
  - maximale Höhe: 817 m ü.M.

Bei der Landnutzung dominiert das Ackerland mit einem Flächenanteil von rund 80 %.

Die hydrologischen Kennwerte werden in der Regel in der Dimension Millimeter ausgegeben. Bezogen auf das Einzugsgebiet der Petite Glâne gilt: 1 mm  $\hat{=}$  75'500 m<sup>3</sup>.

#### Herleitung der Wasserbilanz

In der hydrogeologischen Karte im Hydrologischen Atlas der Schweiz<sup>7</sup> gibt es keine Hinweise auf unterirdische Zu- oder Abflüsse. Es kann von der hydrologischen Geschlossenheit des Gebiets ausgegangen werden. Aus diesem Grund sollte sich die jährliche Wasserbilanz für das Einzugsgebiet der Petite Glâne mit der folgenden Gleichung abbilden lassen, bei der wir davon ausgehen, dass der Füllungsgrad der Speicher (S), also in diesem Fall des Grundwassers, im langjährigen Mittel ausgeglichen ist, sodass  $\Delta S = 0$  ist.

$$\text{Niederschlag (N)} = \text{Abfluss (A)} + \text{Verdunstung (V)} \quad (3.8)$$

---

<sup>7</sup><https://hydromaps.ch>

Tab. 3.4.11: Vergleich der beobachteten und modellierten Jahreswasserbilanz der Petite Glâne in der Periode 1993–2010. N: Niederschlag, Ao: oberirdischer Abfluss, Au: unterirdischer Abfluss, V: Verdunstung. obs: Beobachtungen. Niederschlag aus RhiresD und Abfluss aus Messungen des BAFU abgeleitet, Verdunstung wird aus Modelldaten übernommen, Au: als Restglied der Wasserbilanz berechnet. mod: modellierten Daten (Modellversion RCP4.5)

	Periode	mm/a				%			
		N	Ao	Au	V	N	Ao	Au	V
obs	1993–2010	998	416	29	553	100	42	3	55
mod	1993–2010	999	443	3	553	100	44	0	56

Für die Bilanzbetrachtungen mussten wir auf den modellierten Verdunstungswert von 553 mm zurückgreifen. Der Vergleich mit dem im Hydrologischen Atlas der Schweiz ausgewiesenen Wert von 547 mm (Periode 1973–1992) belegt, dass die modellierte Jahresverdunstung sehr vertrauenswürdig ist.

Die Annahme der hydrogeologischen Geschlossenheit des Einzugsgebietes wird sowohl durch die beobachtete als auch die modellierte Wasserbilanz bestätigt (vgl. Tab. 3.4.11).

Die mittleren beobachteten Jahresniederschläge liegen bei der Petite Glâne unter 1000 mm. Rund 30 % des Jahresniederschlags fallen im Sommer (JJA), wobei die Unterschiede zu den anderen jahreszeitlichen Niederschlägen unter 100 mm liegen (Abb. 3.23). Aus der Sicht des Abflusses wird dieser Niederschlag durch die ausgeprägte Saisonalität der Verdunstung überprägt, sodass vor allem im Sommer nur noch wenig Abfluss, nämlich durchschnittlich 55 mm, gebildet wird. Bereits heute kann das Gebiet als sommertrocken bezeichnet werden.

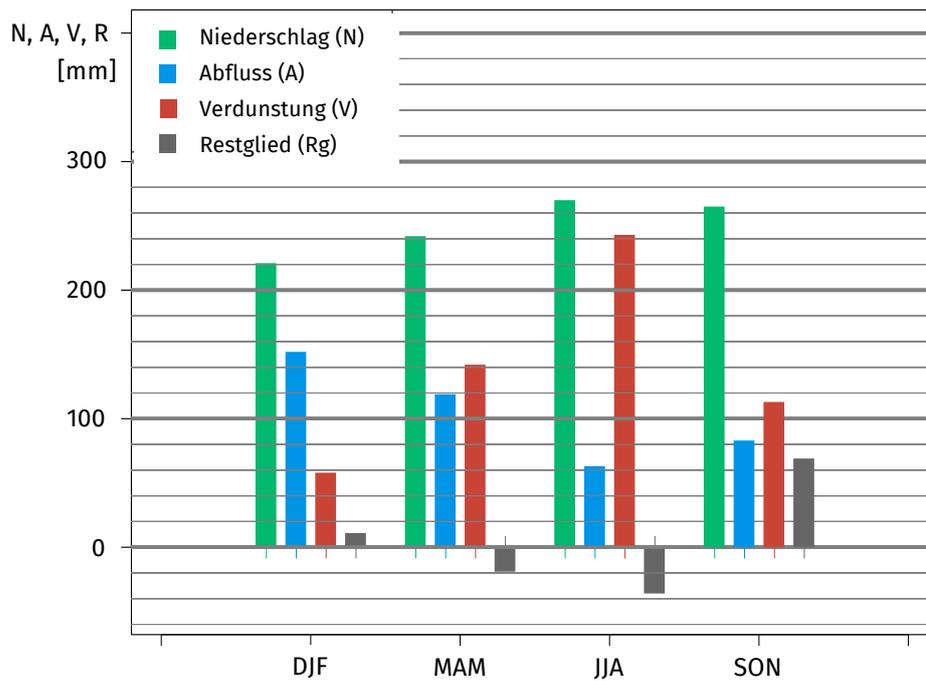


Abb. 3.23: Mittlere saisonale Wasserbilanz der Petite Glâne der Periode 1993–2010, basierend auf den Beobachtungsdaten

### Beurteilung der Güte der Modellierungen

Das Modell reproduziert die beobachtete Jahreswasserbilanz als Ganzes sehr gut, wie der Vergleich mit der beobachteten Wasserbilanz belegt (vgl. Tab. 3.4.11).

Die folgende Tabelle stellt dar, wie gut das Modell GR4J den Niederschlag und den oberirdischen Abfluss der Messperiode 1993–2010 abbilden. Der mittlere jährliche und saisonale Niederschlag (P) mit durchwegs sehr gut modelliert. Ausser im Sommer ist die Modellgüte beim Abfluss (Q) gut bis sogar sehr gut. Im Sommer ist die Modellgüte mit einer Abweichung zwischen dem beobachteten und dem modellierten Wert von 40 % ungenügend. Das Modell überschätzt grundsätzlich die sommerlichen Abflüsse, in der Messperiode um 14 mm. Dies ist bei der Interpretation der Modellierungsergebnisse zu berücksichtigen. Die «wahren» Werte der zukünftigen Perioden dürften kleiner sein als die modellierten.

Tab. 3.4.12: Vergleich der beobachteten und modellierten saisonalen Werte des Niederschlags und des oberirdischen Abflusses der Petite Glâne in der Periode 1993–2010 für die beiden Emissionsszenarien RCP4.5 und RCP8.5

		RCP 4.5		RCP 8.5	
		P	MQ	P	MQ
Y	CH2o18	1001	443	1002	445
Y	OBS	998	416	998	416
Y	$\Delta$ mm	3	27	4	29
Y	$\Delta\%$	0	6	0	7
DJF	CH2o18	223	120	221	121
DJF	OBS	222	152	222	152
DJF	$\Delta$ mm	1	-32	-1	-31
DJF	$\Delta\%$	0	-21	0	-20
MAM	CH2o18	241	140	243	137
MAM	OBS	242	119	242	119
MAM	$\Delta$ mm	-1	21	1	18
MAM	$\Delta\%$	0	18	0	15
JJA	CH2o18	274	88	274	88
JJA	OBS	272	63	272	63
JJA	$\Delta$ mm	2	25	2	25
JJA	$\Delta\%$	1	40	1	40
SON	CH2o18	265	95	268	97
SON	OBS	264	83	264	83
SON	$\Delta$ mm	1	12	4	14
SON	$\Delta\%$	0	14	2	17

**Fazit:** Das hydrologische Modell kann die beobachteten Niederschläge durchwegs sehr gut reproduzieren, stösst aber bei den Abflüssen im Sommer an seine Grenzen.

### Veränderungen des mittleren Niederschlags

Die Tabellen 3.4.13 und 3.4.14 beschreiben die relativen Veränderungen der mittleren Niederschläge, während die beiden Abbildungen 3.24 und 3.25 einerseits die absoluten Veränderungen aufzeigen und andererseits auf die Streuung der Modellketten und damit auf die Modellunsicherheiten hinweisen.

Die Jahresniederschläge verändern sich insgesamt nur geringfügig, bis maximal 5.8% in der mittleren Zukunft unter RCP8.5. Das Veränderungsmuster ist diffus.

Die Zunahme der mittleren Winterniederschläge ist unter RCP 8.5 deutlich grösser als unter RCP 4.5. Sie erreicht beinahe die 30 % Marke. Bei den Niederschlägen im Frühling zeigen sich dieselben Unterschiede wie im Winter, nur sind die Zunahmen insgesamt kleiner. Im Sommer weichen die mittleren Niederschläge bis maximal -20.7% ab. Auffallend sind die unterschiedlichen zeitlichen Entwicklungen dieser Abnahmen im Vergleich der beiden Emissionsszenarien. Unter RCP 4.5 ist die Abnahme gegenüber der Referenzperiode in der fernen Zukunft kleiner als in der mittleren Zukunft, unter RCP 8.5 hingegen vergrössern sich diese Abnahmen im Laufe des Jahrhunderts. Die kleinsten saisonalen Veränderungen – meist Zunahmen – stellen wir im Herbst fest.

Tab. 3.4.13: Mittlere jährliche und saisonale Niederschläge der Petite Glâne@Villars-le-Grand (PGLVil). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 4.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	1000.1	220.8	241.8	272.8	264.6	mm
2040-2069	-0.7	7.9	2.3	-12.7	4.1	%
2070-2099	4.4	14.0	10.9	-8.0	7.2	%

Legende: ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 3.4.14: Mittlere jährliche und saisonale Niederschläge der Petite Glâne@Villars-le-Grand (PGLVil). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 8.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	1000.1	220.8	242.7	273.8	267.4	mm
2040-2069	5.8	15.3	13.2	-8.7	6.5	%
2070-2099	1.5	28.9	16.5	-20.7	-0.3	%

Legende: ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

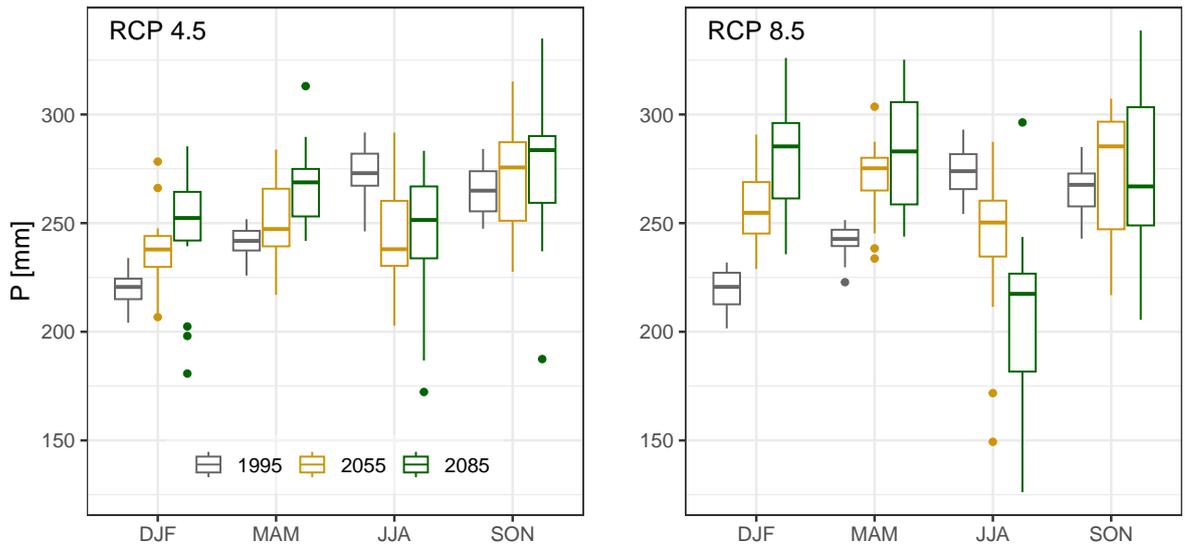


Abb. 3.24: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren saisonalen Niederschlagssummen für das Einzugsgebiet der Petite Glâne in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

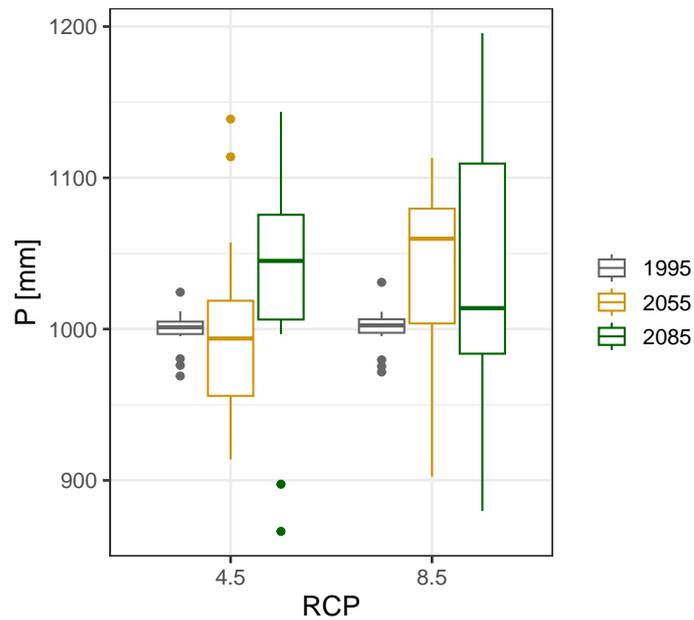


Abb. 3.25: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren Jahresniederschlags für das Einzugsgebiet der Petite Glâne in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

## Veränderungen der mittleren Abflüsse

Der mittlere Jahresabfluss verändert sich gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 besonders stark in der fernen Zukunft unter RCP 8.5. Er nimmt um rund 18 % ab. Unter RCP 4.5 sind die Abnahmen klein bis mittel.

Aus saisonaler Sicht ergeben sich die zwei gegensätzlichen Paare Winter/Frühling und Sommer/Herbst.

Im Winter nehmen alle Abflüsse in den verschiedenen Kombinationen zwischen den Emissionsszenarien und den Zukunftsperioden zu. Auffallend sind die Veränderungen unter RCP 8.5: Während der Winterabfluss in der mittleren Zukunft um 17 % zunimmt, verändert er sich in der fernen Zukunft gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 kaum. Im Frühling sind die Veränderungen mittel bis klein und schwanken um den Wert der Referenzperiode; es treten sowohl Zu- wie auch Abnahmen auf.

Beim saisonalen Paar Sommer/Herbst besteht ein klares Muster. Die mittleren saisonalen Abflüsse nehmen durchwegs ab, unter RCP 4.5 zwischen -11 und -20 %. Unter RCP 8.5 sind die Abnahmen in der mittleren Zukunft gross und in der fernen Zukunft mit Veränderungen von bis zu rund -50 % sogar sehr gross.

Tab. 3.4.15: Mittlere jährliche und saisonale Abflüsse der Petite Glâne@Villars-le-Grand (PGLVil). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 4.5

	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	
1981-2010	441.6	120.4	139.6	88.5	95.8	mm
2040-2069	-6.4	11.6	-7.8	-20.8	-13.0	%
2070-2099	-2.3	18.2	-0.9	-14.6	-10.5	%

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 3.4.16: Mittlere jährliche und saisonale Abflüsse der Petite Glâne@Villars-le-Grand (PGLVil). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 8.5

	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	
1981-2010	445.3	121.4	137.8	88.5	96.7	mm
2040-2069	1.0	17.8	5.7	-15.0	-16.4	%
2070-2099	-15.5	18.9	6.8	-35.9	-44.0	%

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

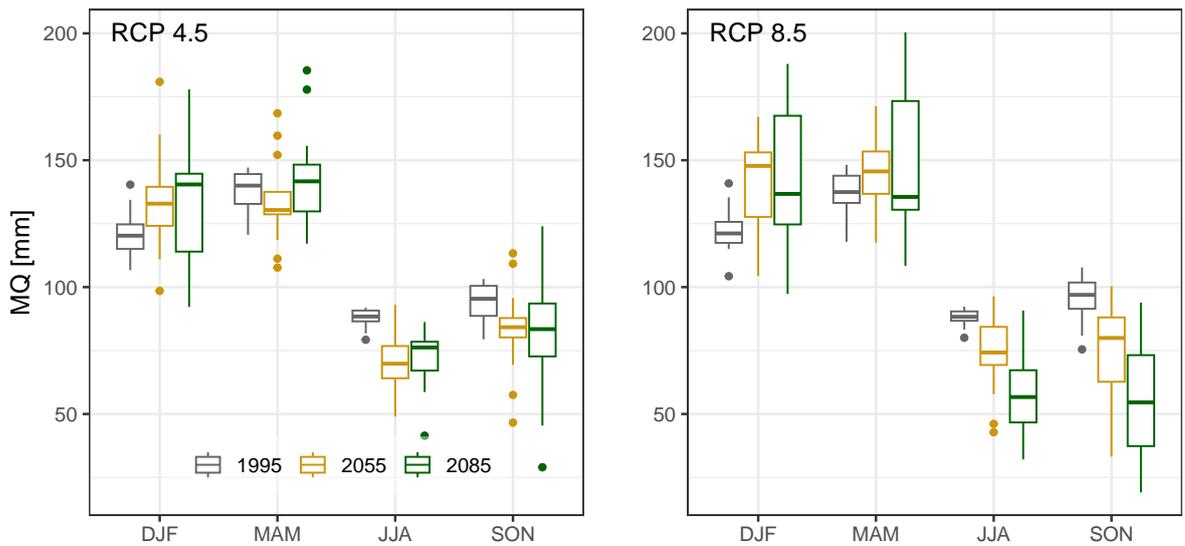


Abb. 3.26: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren saisonalen Abflüsse der Petite Glâne in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

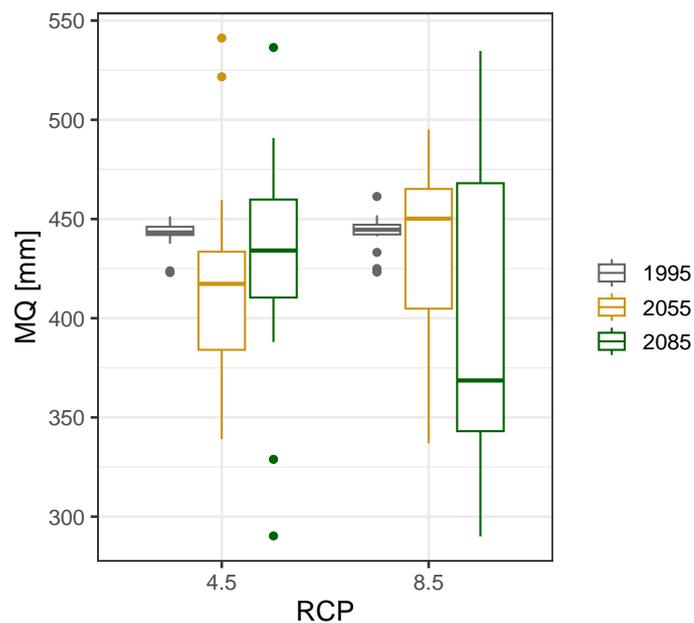


Abb. 3.27: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren Jahresabflüsse der Petite Glâne in der Periode 1993–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

Die Abbildung 3.28 ordnet die modellierten relativen Veränderungen in den Kontext der Beobachtungen der Periode 1993–2010<sup>8</sup> ein. Sie visualisiert einerseits die Abweichungen zwischen den Medianwerten und positioniert andererseits die zukünftigen Medianwerte im Streubereich der einzeljährigen Werte der Messperiode.

Im Winter (DJF) liegen die zukünftigen Mediane – mit Ausnahme der mittleren Zukunft unter RCP 8.5 – innerhalb der Box. Die zukünftigen Mediane liegen also mehrheitlich im engeren Schwankungsbereich der Einzeljahre der Periode 1993–2010. Im Frühling (MAM) bestehen nur geringe Abweichungen zwischen der Referenzperiode und den zukünftigen Perioden. Dies im Gegensatz zum Sommer (JJA), wo mehr als 75 % der einzeljährlicher Abflüsse der Referenzperiode grösser sind als die zukünftigen Mediane. Der Medianwert in der fernen Zukunft unter RCP 8.5 nähert sich sogar dem kleinsten in einem Einzeljahr der Messperiode beobachteten Abfluss. Die Veränderungen im Sommer sind demnach ausgeprägt. Dabei ist auch zu bedenken, dass die Abflusswerte der Einzeljahre zukünftiger Perioden wiederum um den ausgewiesenen Median streuen, sodass in einzelnen Jahren nur noch sehr kleine Abflüsse auftreten werden. Die Veränderungen im Herbst gleichen jenen im Sommer.

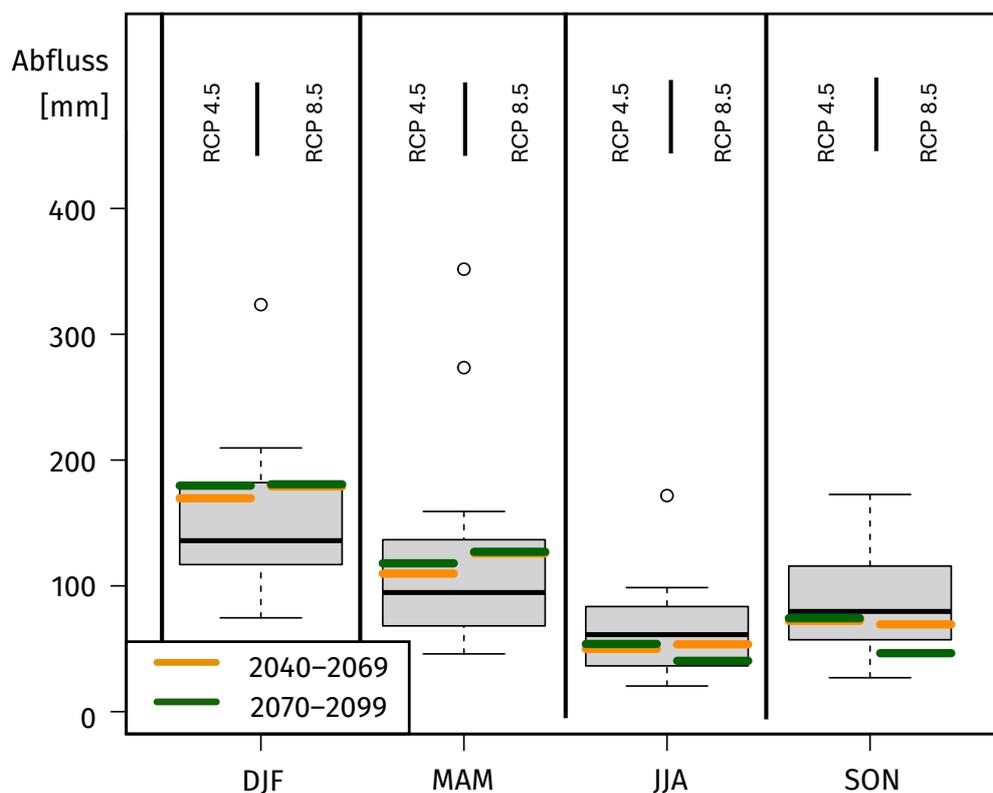


Abb. 3.28: Verteilung der saisonalen Abflüsse der Petite Glâne in der Periode 1993–2010, abgeleitet aus den Beobachtungen des BAFU und des Kantons Freiburg im Vergleich zu den medianen Abflüssen in der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

<sup>8</sup>Die Abflussmessungen starteten erst 1993, sodass nicht die ganze Referenzperiode 1981–2010 abgedeckt werden kann

## Veränderungen der mittleren aktuellen Verdunstung

Die aktuelle Jahresverdunstung nimmt in Abhängigkeit der Zukunftsperiode und des Emissionsszenarios um 5 bis 16 % zu.

Auf saisonaler Basis liegen die Veränderungen unter RCP 4.5 zwischen 3 und 14 % und unter RCP 8.5 zwischen 8 und 27 %. Wie auch bei den anderen Einzugsgebieten beobachtet, sind die Zunahmen der Verdunstung im Winter (DJF) und Frühling (MAM) grösser als im Sommer (JJA) und Herbst (SON). Die grösste Zunahme zeigt die Modellierung in der fernen Zukunft im Winter unter RCP 8.5. Die Zunahme beträgt hier 27 %. Dabei ist allerdings zu bedenken, dass der winterliche Ausgangswert in der Referenzperiode im Vergleich mit den Verdunstungswerten der anderen Jahreszeiten sehr klein ist (vgl. Abb. 3.23).

Tab. 3.4.17: Aktuelle Verdunstung im Einzugsgebiet der Petite Glâne@Villars-le-Grand (PGLVil) und relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 4.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	554.8	57.5	142.3	241.8	113.2	mm
2040-2069	5.3	12.7	7.1	3.4	2.4	%
2070-2099	9.2	15.9	10.3	7.2	6.5	%

Legende: -20 -10 -5 5 10 20 [%]

Tab. 3.4.18: Aktuelle Verdunstung im Einzugsgebiet der Petite Glâne@Villars-le-Grand (PGLVil) und relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 8.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	554.8	57.5	142.3	240.9	113.2	mm
2040-2069	9.9	15.9	10.9	8.3	7.3	%
2070-2099	14.5	28.6	19.9	10.2	7.3	%

Legende: -20 -10 -5 5 10 20 [%]

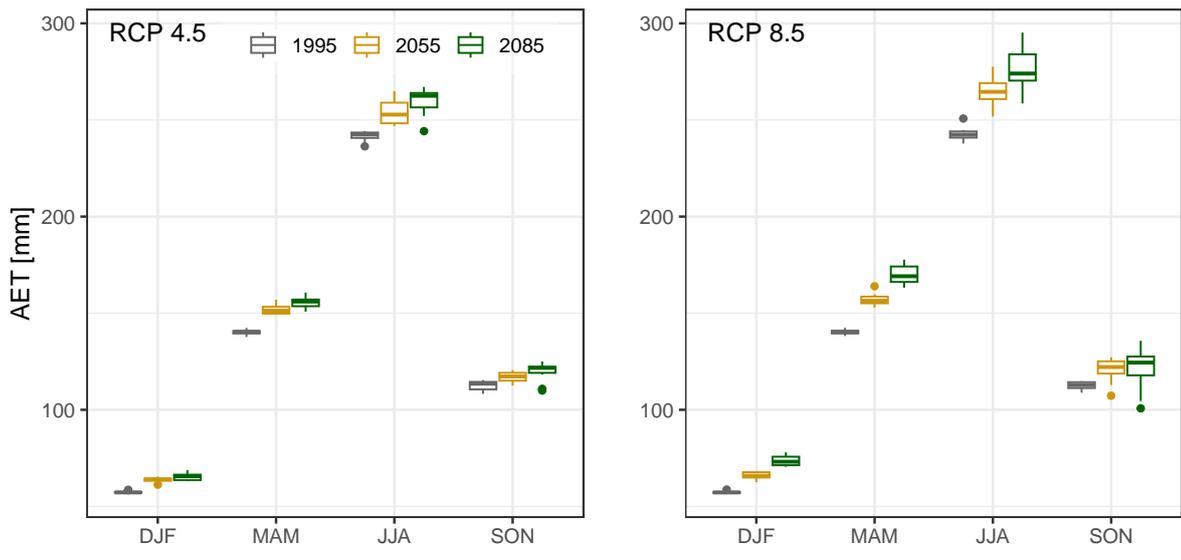


Abb. 3.29: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren saisonalen Niederschlagssummen für das Einzugsgebiet der Petite Glâne in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP4.5 und RCP8.5

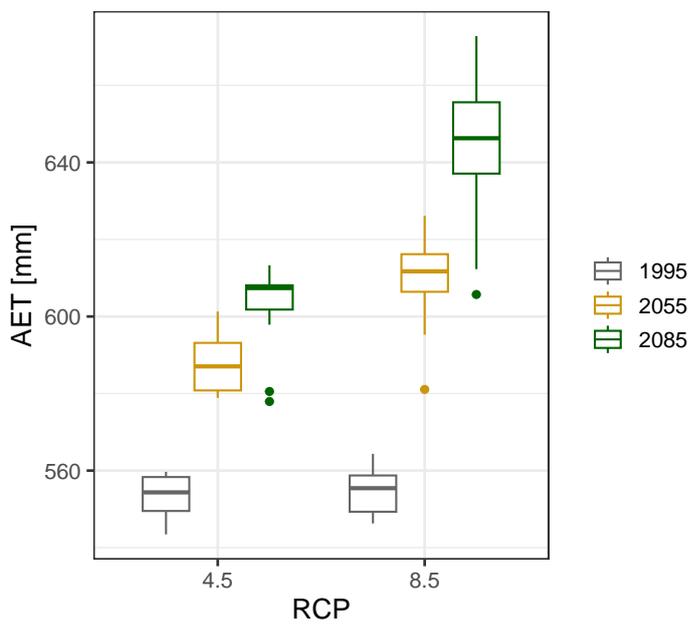


Abb. 3.30: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren Jahresverdunstung für das Einzugsgebiet der Petite Glâne in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP4.5 und RCP8.5.

## Veränderungen des Schnees

Die Bedeutung des Schnees ist in diesem Einzugsgebiet relativ gering. Trotzdem ist es nicht gelungen, mit dem Modell GR4J in Kombination mit dem Schneemodul CemaNeige den Schneeanteil am Gesamtniederschlag plausibel zu modellieren. Daher verzichten wir auf eine Darstellung der Ergebnisse.

## Wasserhaushaltliche Betrachtungen zu den Veränderungen

In diesem Kapitel betrachten wir die Veränderungen der Wasserhaushaltselemente in deren Zusammenspiel. Dazu werden die in den obigen Tabellen ausgewiesenen relativen Veränderungen von Niederschlag (N), Abfluss (A) und aktueller Verdunstung (V) den Beobachtungen der Referenzperiode 1981–2010 (siehe Abb. 3.31) aufgeprägt. Das Hauptziel ist es, die Veränderungen des Abflusses im Kontext der Veränderungen der anderen Wasserhaushaltselemente zu verstehen. Bei dieser Betrachtungsweise gilt:

$$\Delta A = \Delta N - \Delta V - \Delta Rg \quad (3.9)$$

Bei der Anwendung dieser Gleichung sind unbedingt die Vorzeichen zu beachten. So gilt beim Jahresabfluss unter RCP 4.5 in der mittleren Zukunft (um 2055, s. Abb. 3.31) folgende Beziehung;

$$-28 = -7 - 29 - (-8) [mm] \quad (3.10)$$

Die Gleichung belegt, dass die Veränderung des Jahresabflusses (-28 mm) durch die Zunahme der Jahresverdunstung (29 mm) geprägt ist.

In der fernen Zukunft unter RCP 4.5 nimmt der mittlere Jahresniederschlag gegenüber Referenzperiode zu, trotzdem verändert sich der mittlere Jahresabfluss kaum, weil der nun grössere Jahresniederschlag direkt von der aktuellen Verdunstung aufgebraucht wird. Dasselbe Muster ist unter RCP 8.5 in der mittleren Zukunft erkennbar. Ganz anders die Bedingungen in der fernen Zukunft (RCP 8.5): Da der Jahresniederschlag in dieser Periode wieder ähnlich ist wie in der Referenzperiode, führt die starke Zunahme der Verdunstung dazu, dass der Abfluss nun stark abnimmt.

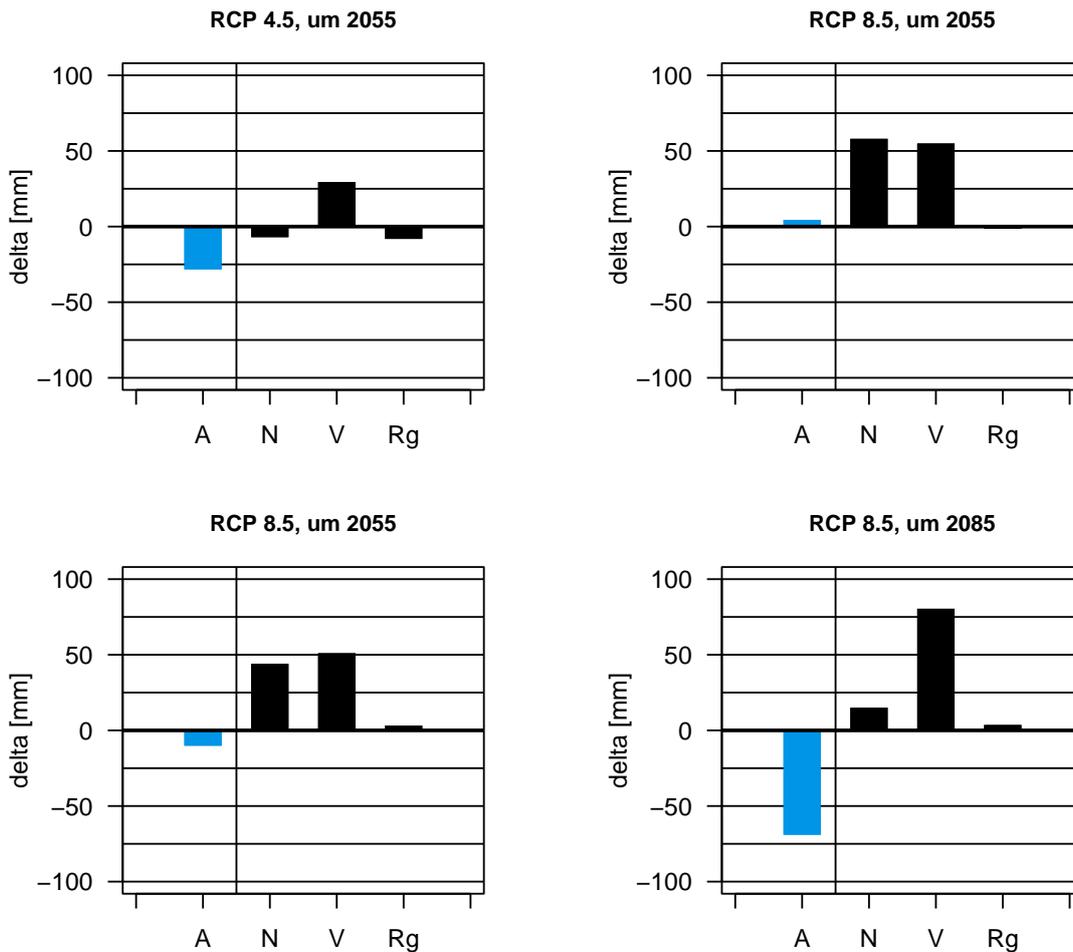


Abb. 3.31: Vergleich der Veränderungen der Jahresbilanz im Einzugsgebiet der Petite Glâne@Villars-le-Grand. Die Säulen zeigen das Ausmass und das Vorzeichen der Veränderungen (Zu- oder Abnahmen) in mm/a. Die Grafik beschreibt zudem, welchen Beitrag die Veränderungen von Niederschlag (N), Verdunstung (V) sowie des Restglieds (Rg) zur Veränderung des Abflusses (A, blaue Säule) leisten. Es gilt  $dA = dN - dV - dRg$  (d: Veränderung in mm)

Betrachten wir nun die Abflussveränderungen und deren Ursache im Sommer (Abb. 3.32). In dieser Jahreszeit sind die relativen Abnahmen des Abflusses gross bis sehr gross und aufgrund der bereits recht kleinen Ausgangswerte von 63 mm besonders relevant.

Die Abflussabnahmen sind primär durch die Abnahme der Niederschläge verursacht. Die Zunahme der Verdunstung wirkt verstärkend. Man darf dem Restglied bei den saisonalen Betrachtungen aufgrund der Unsicherheiten zwar keine allzu grosse Bedeutung beimessen, aber der grosse negative Wert des Restglieds in der fernen Zukunft unter RCP8.5 fällt dennoch auf. Der negative Wert des Restglieds suggeriert, dass zusätzliches Wasser im System vorhanden ist, vermutlich durch das Entleeren des Grundwasserspeichers.

Als Folge davon fällt das Abflussdefizit weniger stark aus. Dies ist nicht nur ein Hinweis auf die Bedeutung der Speicher, sondern zeigt auch auf, dass das Abflussdefizit bedeutend grösser ausfallen würde, falls kein Wasser aus dem Grundwasserspeicher zufließen würde.

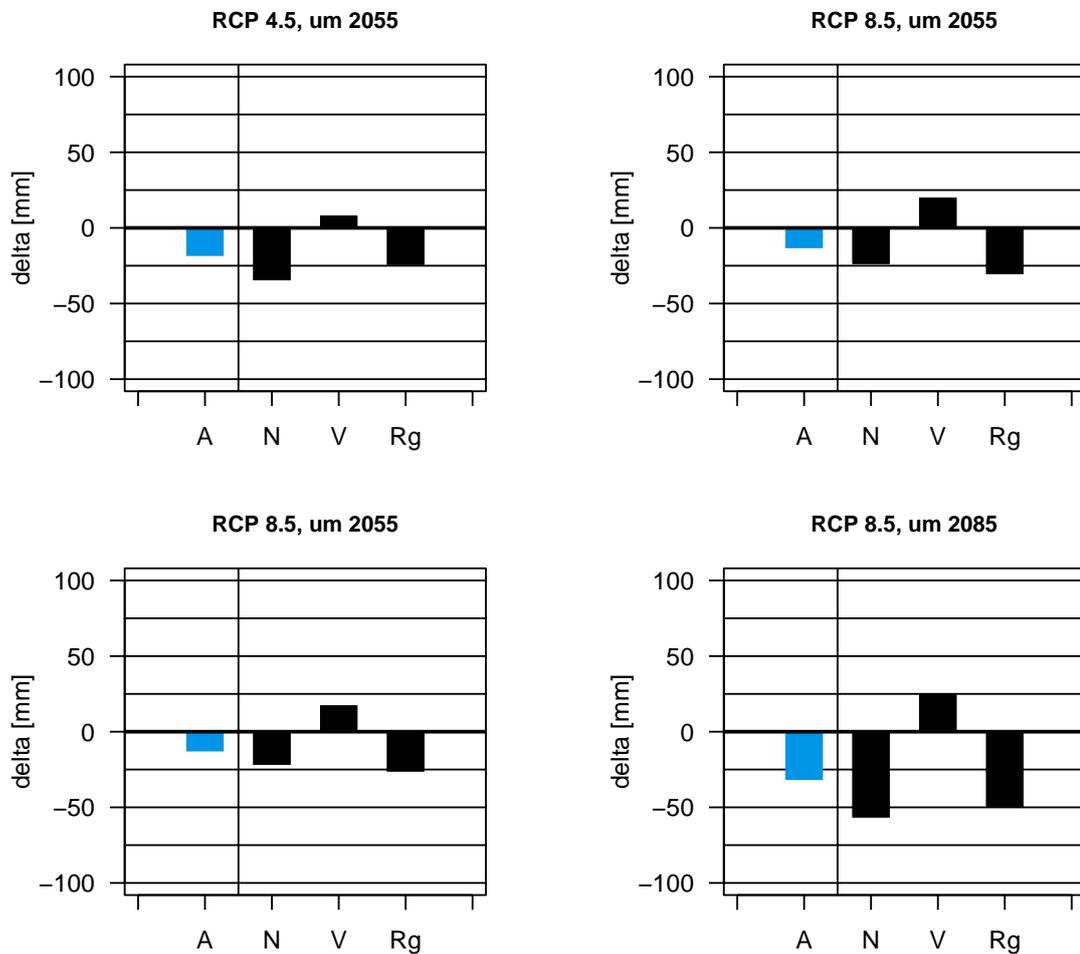


Abb. 3.32: Vergleich der Veränderungen der Wasserbilanz im Sommer (JJA) im Einzugsgebiet der Petite Glâne@Villars-le-Grand. Die Säulen zeigen das Ausmass und das Vorzeichen der Veränderungen (Zu- oder Abnahmen) in mm/a. Die Grafik beschreibt zudem, welchen Beitrag die Veränderungen von Niederschlag (N), Verdunstung (V) sowie des Restglieds (Rg) zur Veränderung des Abflusses (A, blaue Säule) leisten. Es gilt  $dA = dN - dV - dRg$  (d: Veränderung in mm)

Die Abbildungen 3.33 und 3.34 (Grafik oben rechts) beleuchten dieses Zusammenspiel zwischen Niederschlag und Verdunstung in einem etwas anderen Blickwinkel. Die zukünftige Mediane liegen alle mehr oder weniger unter der Winkelhalbierenden, woraus der Einfluss der aktuellen Verdunstung auf die Abflussabnahme abgeleitet werden kann.

Die Grafik oben links veranschaulicht die Situation im Winter: Unter RCP 4.5 ist die starke Abhängigkeit der Abflusszunahme von der Niederschlagszunahme ersichtlich. Da die Mediane aber leicht unterhalb der Winkelhalbierenden liegen, ist auch ein Einfluss der zunehmenden Verdunstung erkennbar. Unter RCP 8.5 fällt die Situation Ende des Jahrhunderts (ferne Zukunft) auf. Der mittlere winterliche Abfluss reagiert nur schwach auf die starke Zunahme des mittleren winterlichen Niederschlags. Dies kann nicht allein mit der Zunahme der Verdunstung im Winter erklärt werden, die zwar relativ gesehen auch sehr gross ist, aber absolut gesehen nur rund ein Viertel der Zunahme der Niederschläge ausmacht. Vermutlich hängt dieses Ungleichgewicht in den Zunahmen des Niederschlags und des Abflusses mit einer Veränderung des Abflusskoeffizienten zusammen. Der Abflusskoeffizient beschreibt den Anteil des Niederschlags der zum Abfluss gelangt.

Tab. 3.4.19: Mittlere saisonale Abflusskoeffizienten der Petite Glâne in der Referenzperiode basierend auf Beobachtungen (obs) und in der fernen Zukunft unter RCP 8.5 basierend auf modellierten Daten

	Y	DJF	MAM	JJA	SON
obs	0.42	0.68	0.49	0.23	0.31
RCP 8.5, um 2085	0.35	0.63	0.45	0.19	0.17

Der winterliche mittlere Abflusskoeffizient nimmt in der fernen Zukunft unter RCP 8.5 gegenüber dem Wert der Referenzperiode ab (vgl. Tabelle 3.4.19). Das könnte mit der Abnahme des Sättigungsgrads der Böden zusammenhängen. Die Umsetzung des Niederschlags in den Abfluss ist in ferner Zukunft weniger effizient als in der Referenzperiode. Dies könnte die unterproportionale Zunahme des Abflusses gegenüber dem Niederschlag erklären

Die Streuung der Werte der einzelnen Modellketten um den Median zeigen, wie gut die einzelnen Modellketten den Medianwert repräsentieren. Nehmen wir dazu das Beispiel der Modellierung unter RCP 4.5. Im Sommer sind sich die Modellketten weitestgehend über das Vorzeichen der Veränderungen einig, führen aber zu unterschiedlichen Aussagen bezüglich des Ausmasses der Veränderungen. Im Winter ist die Situation nicht derart eindeutig. So gehen einzelne Modellketten von einer Zunahme des Niederschlags und des Abflusses aus, andere von einer Abnahme. Eine Modellkette beschreibt sogar eine Zunahme des Niederschlags bei gleichzeitiger Abnahme des Abflusses. Dies ist natürlich nicht sehr plausibel. Trotzdem scharen sich die meisten Modellketten relativ nahe um die Medianwerte. Bei Unsicherheitsüberlegungen sind diese Streuungen der Modellketten miteinzubeziehen. In der vorliegenden Arbeit werden sie durch die Diagramme mit den Boxplots dargestellt.

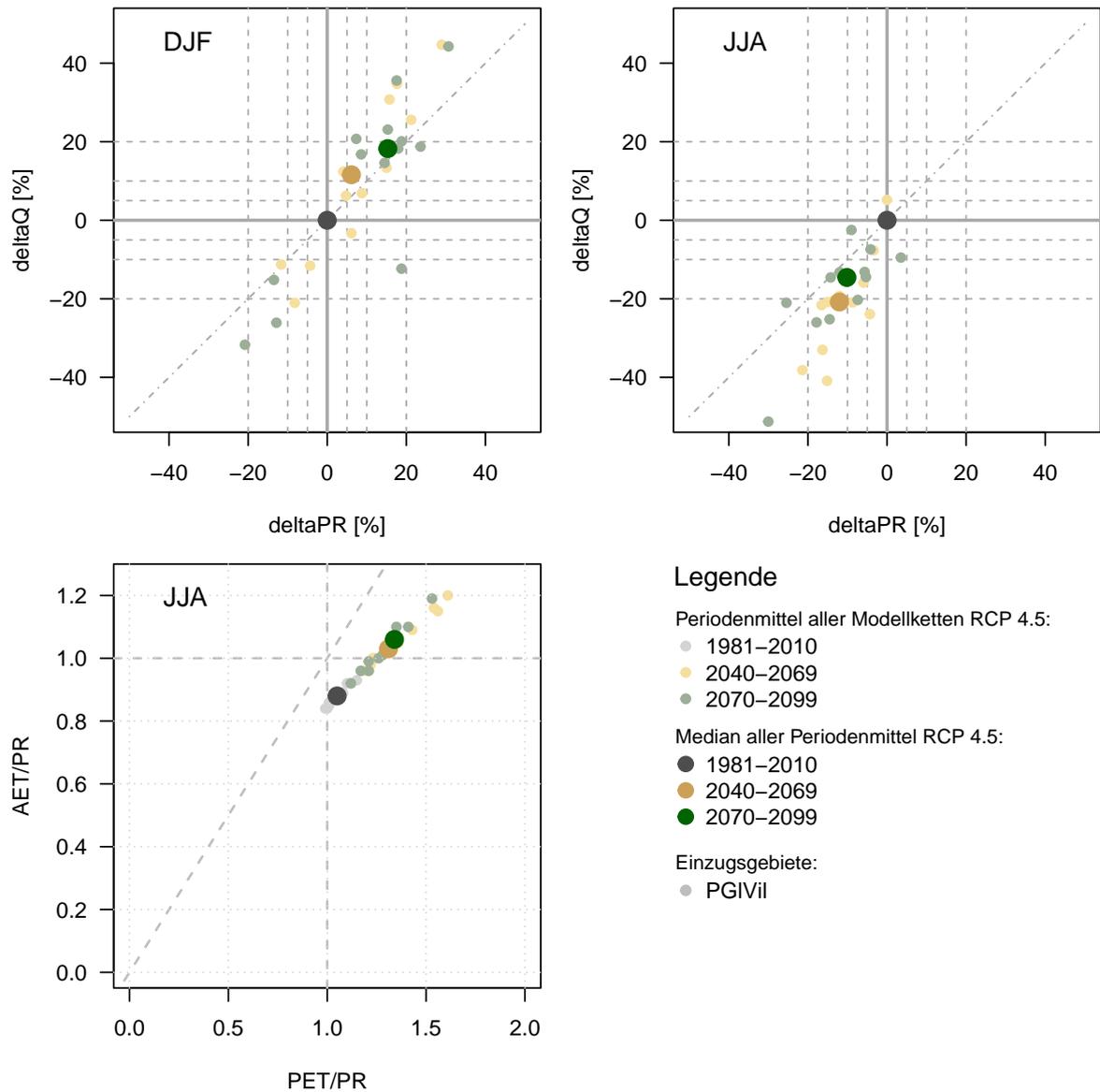


Abb. 3.33: Diagramme zum Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Petite Glâne@Villars-le-Grand im Winter (DJF) und Sommer (JJA) unter RCP4.5. Die oberen zwei Diagramme zeigen die relative Veränderung von Niederschlag ( $\Delta PR$ ) und Abfluss ( $\Delta Q$ ). Das Budyko-Diagramm wird im Methodenteil eingeführt und beschrieben. Die drei Diagramme zeigen die Streuung der Periodenmittel aller verwendeten Modellketten sowie den Medianwert dieser Periodenmittel.

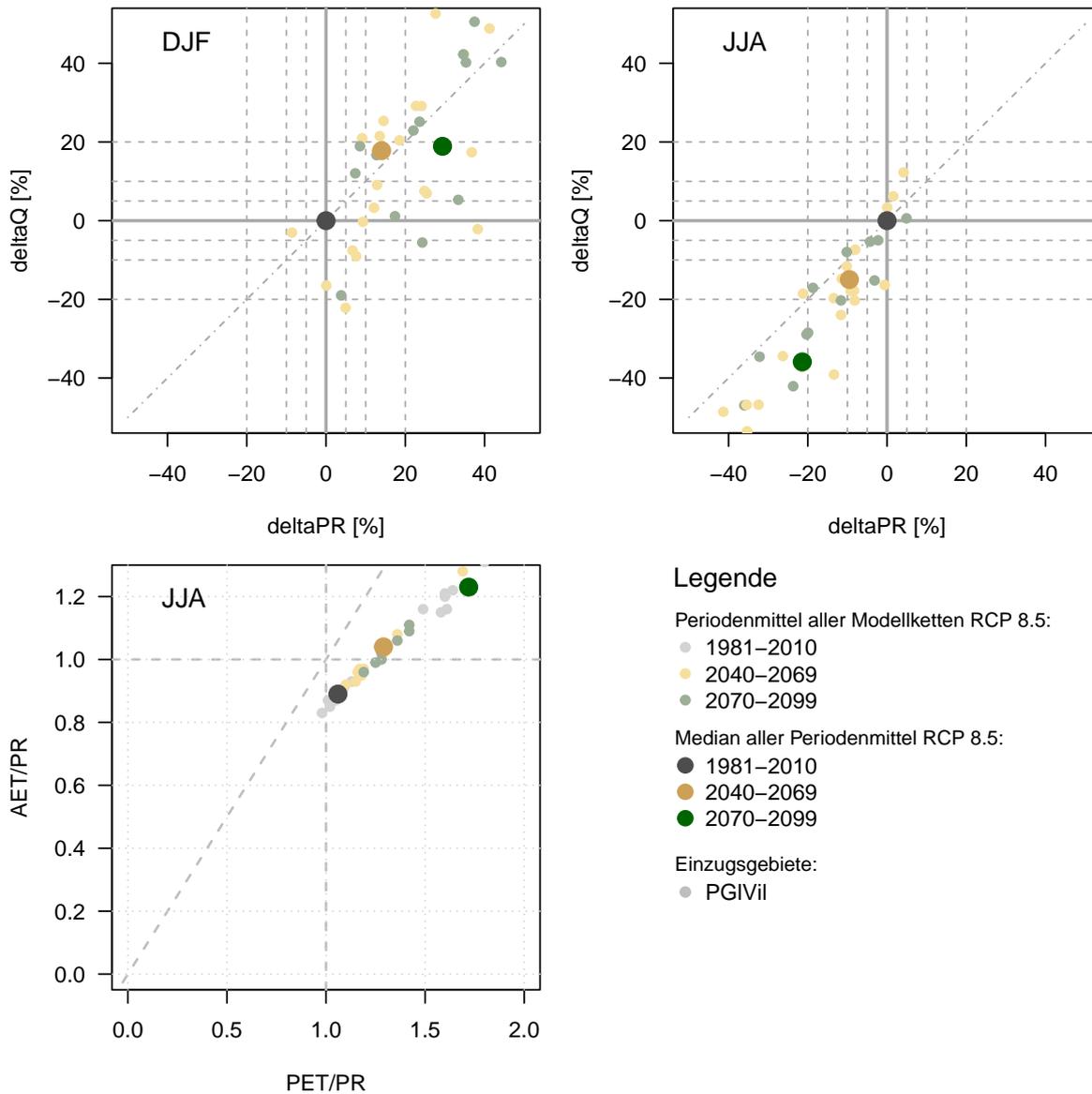


Abb. 3.34: Diagramme zum Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Petite Glâne@Villars-le-Grand unter RCP 8.5

Das Budyko-Diagramm unten links weist schliesslich darauf hin, dass im Einzugsgebiet der Petite Glâne im Sommer schon in der Referenzperiode 1981–2010 Wasserstresssituationen auftreten. In einem mittleren Jahr ist das System bereits heute wasserlimitiert. Die Verdunstung dominiert die Wasserbilanz mit einem Anteil von rund 90 % am Niederschlag. In der Zukunft wird diese Wasserlimitierung weiter zunehmen. Sie ist unter RCP 8.5 grösser als unter RCP 4.5.

## Zukünftige Veränderungen der kleinsten und grössten Tagesabflüsse

Es muss nochmals deutlich darauf hingewiesen werden, dass wir hier sehr kleine und sehr grosse Tagesabflüsse analysieren. Bei den sehr grossen Tagesabflüssen handelt es sich nicht um Hochwasser bzw. Hochwasserspitzen im engeren Sinne des Wortes. Solche Hochwasser laufen im Stundenbereich ab und sind mit den hier verwendeten Tageswerten nicht erfassbar. Hingegen werden die kleinsten Abflüsse in der Tagesauflösung gut erfasst, weil die Schwankungen im Niedrigwasserbereich sehr träge ablaufen. Die kleinsten und grössten Tagesabflüsse werden durch sogenannte Quantile (q) beschrieben. Das Abflussquantil (Qq10) beispielsweise gibt jenen Abfluss (Q) an, der im Mittel an 10 % der Tage – also an 37 Tagen des Jahres – erreicht oder unterschritten wird.

Tab. 3.4.20: Kleinste und grösste Abflüsse der Petite Glâne@Villars-le-Grand (PGLVil). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 4.5. Qq01, Qq05, Qq10, ... : Quantile (q) des Abflusses (Q): 1 %, 5 %, 10 %, 90 %, 95 % und 99 %

	Qq01	Qq05	Qq10	Qq90	Qq95	Qq99	
1981-2010	0.2	0.2	0.3	2.2	3.1	5.9	mm/d
1981-2010	0.2	0.2	0.2	1.9	2.7	5.2	m <sup>3</sup> /s
1981-2010	2.1	2.8	3.4	25.5	35.8	68.8	l/s/km <sup>2</sup>
2040-2069	-30.0	-26.9	-24.1	0.0	-0.3	2.0	%
2070-2099	-27.8	-25.9	-24.1	5.0	6.6	3.8	%

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 3.4.21: Kleinste und grösste Abflüsse der Petite Glâne@Villars-le-Grand (PGLVil). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 8.5. Qq01, Qq05, Qq10, ... : Quantile (q) des Abflusses (Q): 1 %, 5 %, 10 %, 90 %, 95 % und 99 %

	Qq01	Qq05	Qq10	Qq90	Qq95	Qq99	
1981-2010	0.2	0.2	0.3	2.2	3.1	6.1	mm/d
1981-2010	0.1	0.2	0.2	1.9	2.7	5.3	m <sup>3</sup> /s
1981-2010	2.0	2.5	3.1	25.2	35.9	70.8	l/s/km <sup>2</sup>
2040-2069	-31.2	-29.3	-28.0	6.5	8.1	9.7	%
2070-2099	-51.3	-53.3	-52.5	-4.9	0.0	1.2	%

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Beim Betrachten der beiden Tabellen fällt der deutliche Unterschied zwischen den grössten und den kleinsten Tagesabflüssen auf. Die kleinsten Tagesabflüssen nehmen in einem sehr grossen Ausmass ab, unter RCP 4.5 zwischen -24 und -30 % und unter RCP 8.5 zwischen -28 und -31 % in der mittleren Zukunft und bis zu ca. -50 % in der fernen Zukunft.

Die grössten Tagesabflüsse hingegen verändern sich gegenüber der Referenzperiode kaum. Die Veränderungen sind also mehrheitlich klein, und es entsteht kein eindeutiges Veränderungsmuster. Einzelne Veränderungen sind leicht positiv, andere leicht negativ

### 3.4.3 Region Nördliches Mittelland, région Plateau Nord

#### Ausgangslage

Die Region Nördliches Mittelland wird durch das Einzugsgebiet der Arbogne@Avenches repräsentiert. Dieses Einzugsgebiet besitzt folgende Charakteristiken:

- Fläche: 71.9 km<sup>2</sup>
- Höhenverhältnisse:
  - minimale Höhe: 434 m ü.M.
  - mittlere Höhe: 596 m ü.M.
  - maximale Höhe: 813 m ü.M.

Bei der Landnutzung beträgt der Flächenanteil des Ackerlands rund 60 %. Der Wald – hier vor allem Mischwald – besitzt einen Flächenanteil von rund 20 %. Der Siedlungsanteil liegt bei 10 %.

Die hydrologischen Kennwerte werden in der Regel in der Dimension Millimeter ausgegeben. Bezogen auf das Einzugsgebiet der Arbogne gilt: 1 mm  $\hat{=}$  71'900 m<sup>3</sup>.

#### Herleitung der Wasserbilanz

Gemäss der hydrogeologischen Karte im Hydrologischen Atlas der Schweiz<sup>9</sup> ist das Einzugsgebiet aus hydrologischer Sicht nicht geschlossen. Im südwestlichen Teil des Einzugsgebietes treten unterirdische Abflüsse auf (s. Abb. 3.35). Somit ist folgende Wasserbilanz zu erwarten:

$$\text{Niederschlag (N)} = \text{oberird. Abfluss (Ao)} + \text{unterird. Abfluss (Au)} + \text{Verdunstung (V)} \quad (3.11)$$

---

<sup>9</sup><https://hydromaps.ch>

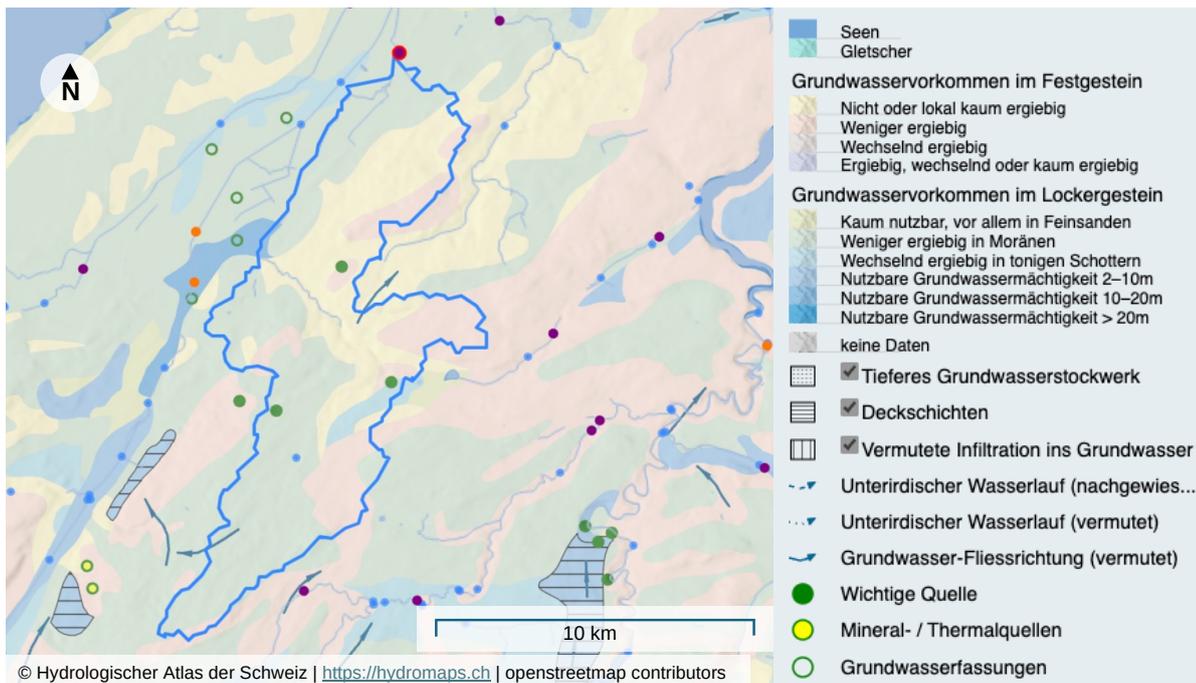


Abb. 3.35: Hydrogeologische Situation im Einzugsgebiet der Arbogne. Ausschnitt aus dem Hydrologischen Atlas der Schweiz

Die beobachtete mittlere Jahreswasserbilanz in Tabelle 3.4.22 bestätigt die Annahme eines unterirdischen Abflusses. Er ist mit 145 mm im Vergleich zum oberirdischen Abfluss von 338 mm sehr gross. Für die Bilanzbetrachtungen mussten wir auf einen modellierten Verdunstungswert zurückgreifen. Ein Vergleich der mit GR4J errechneten Jahresverdunstung von 549 mm mit jener aus dem Hydrologischen Atlas von 555 mm (Periode 1973–1992) zeigt, dass dieser Wert sehr vertrauenswürdig ist.

Betrachten wir nun die mittleren Wasserbilanzen auf saisonaler Basis, und zwar wiederum auf der Grundlage der Beobachtungen. Die mittleren saisonalen Niederschläge sind nicht gleich verteilt. Der Unterschied zwischen den sommerlichen und den winterlichen Niederschlägen beträgt etwas mehr als 100 mm. Dazwischen liegen die Niederschläge im Frühling und Herbst mit ähnlichen Niederschlagshöhen.

Durch die ausgesprochene Saisonalität der aktuellen Verdunstung besteht kein direkter linearer Zusammenhang zwischen Niederschlag und Abfluss. So ist der mittlere Abfluss im Sommer trotz der saisonal grössten Niederschlagsmengen wegen der grossen Verdunstung im saisonalen Vergleich mit nur noch rund 58 mm der kleinste. Durch den Einfluss der Verdunstung sind auch die mittleren Abflüsse im Winter und Frühling sehr ähnlich, obschon sich die beiden Saisons aus der Sicht der mittleren Niederschlagsmengen deutlich unterscheiden.

Wie das Restglied der Wasserbilanz vermuten lässt, treten in allen Saisons auch unterirdische Abflüsse aus dem Einzugsgebiet auf. Dabei ist plausibel, dass diese unterirdischen Abflüsse im Sommer eher klein aus-

fallen. Die Schwankungen in den übrigen Saisons hingegen sind schwierig zu interpretieren sind. Wie zum Beispiel lässt sich der relativ grosse unterirdische Abfluss im Herbst erklären? Dies verdeutlicht, dass im Restglied der Wasserbilanz sämtliche Unsicherheiten der Beobachtungen subsumiert sind. Zudem wird das Speicherglied  $\Delta S$  hier nicht explizit berücksichtigt, obwohl in den Saisons mit Speicheränderungen vor allem des Grundwassers zu rechnen ist.

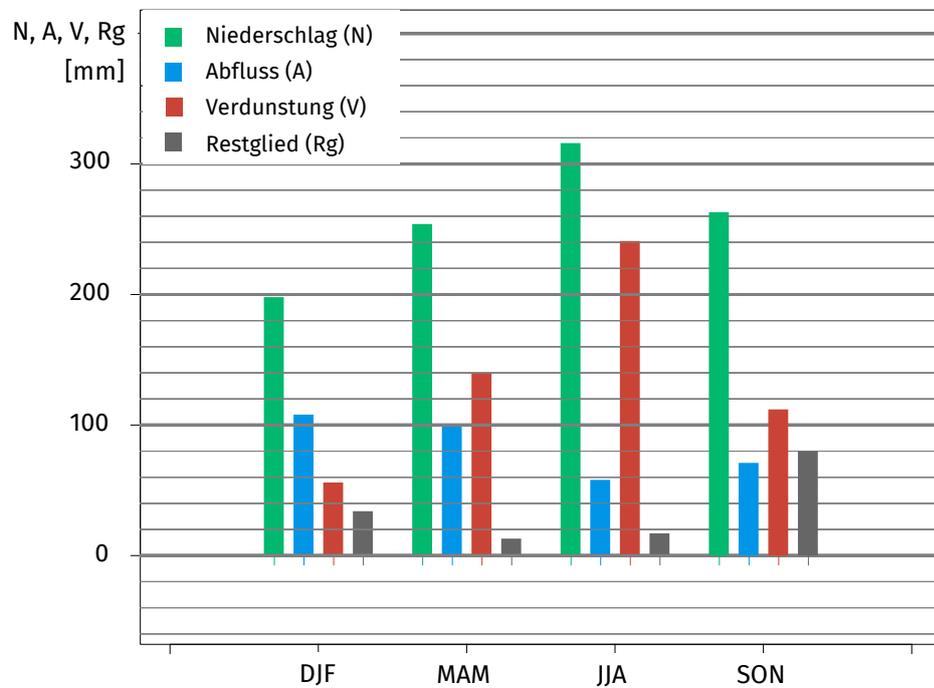


Abb. 3.36: Mittlere saisonale Wasserbilanz der Arbone 1993–2010, basierend auf den Beobachtungsdaten

### Beurteilung der Güte der Modellierung

Die Modellierung mit GR4J bildet die mittlere Jahreswasserbilanz sehr gut ab, wie die Tab. 3.4.22 verdeutlicht.

Tab. 3.4.22: Vergleich der beobachteten und modellierten Jahreswasserbilanz der Arbogne in der Periode 1993–2010. N: Niederschlag, Ao: oberirdischer Abfluss, Au: unterirdischer Abfluss, V: Verdunstung. obs: Beobachtungen. Niederschlag aus RhiresD und Abfluss aus Messungen des BAFU abgeleitet, Verdunstung wird aus Modelldaten übernommen, Au: als Restglied der Wasserbilanz berechnet. mod: modellierten Daten (Modellversion RCP4.5)

	Periode	mm/a				%			
		N	Ao	Au	V	N	Ao	Au	V
obs	1993–2010	1041	338	154	549	100	32	15	53
mod	1993–2010	1039	359	131	549	100	35	13	52

Mit der folgenden Tabelle wird beurteilt, wie gut GR4J den Niederschlag und den oberirdischen Abfluss auf saisonaler Basis abbildet.

Tab. 3.4.23: Vergleich der beobachteten und modellierten saisonalen Werte des Niederschlags (1981–2010) und des oberirdischen Abflusses der Arbogne in der Periode 1993–2010 für die beiden Emissionsszenarien RCP4.5 und RCP8.5

		RCP 4.5		RCP 8.5	
		P	MQ	P	MQ
Y	CH2018	1046	361	1046	363
Y	OBS	1041	338	1041	338
Y	$\Delta$ mm	5	23	5	25
Y	$\Delta\%$	0	7	0	7
DJF	CH2018	220	99	218	99
DJF	OBS	219	108	219	108
DJF	$\Delta$ mm	1	-9	-1	-9
DJF	$\Delta\%$	0	-8	0	-8
MAM	CH2018	258	106	262	110
MAM	OBS	261	101	261	101
MAM	$\Delta$ mm	-3	5	1	9
MAM	$\Delta\%$	-1	5	0	9
JJA	CH2018	298	78	296	78
JJA	OBS	291	58	291	58
JJA	$\Delta$ mm	7	20	5	20
JJA	$\Delta\%$	2	34	2	34
SON	CH2018	267	78	269	79
SON	OBS	269	70	269	70
SON	$\Delta$ mm	-2	8	0	9
SON	$\Delta\%$	-1	11	0	13

Die mittleren jährlichen und saisonalen Niederschläge (P) der Referenzperiode 1993–2010 werden vom Modell sehr gut abgebildet, und es bestehen keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Emissionsszenarien. Die Güte ist beim mittleren Abfluss (Vergleichsperiode 1993–2010) etwas schlechter und weist Unterschiede zwischen den Jahreszeiten auf. Die Winter- und Frühlingswerte sowie der Jahreswert werden durch das Modell GR4J gut abgebildet. Ungenügend ist die Modellgüte im Sommer und nur befriedigend im Herbst. Über alle Saisons gesehen handelt es sich um eine befriedigende Modellgüte

**Fazit:** Das hydrologische Modell kann die beobachteten Niederschläge durchwegs sehr gut reproduzieren, stösst aber vor allem bei den Abflüssen im Sommer an seine Grenzen.

## Veränderungen des mittleren Niederschlags

Die Tabellen 3.4.24 und 3.4.25 beschreiben die relativen Veränderungen der mittleren Niederschläge, während die beiden Abbildungen 3.37 und 3.38 einerseits die absoluten Veränderungen aufzeigen und andererseits auf die Streuung der Modellketten und damit auf die Modellunsicherheit hinweisen.

Beim Jahresniederschlag liegen die Veränderungen zwischen -2.4 und +4.2 %; d.h., die Veränderungen sind bei beiden Emissionsszenarien klein. Allerdings führen aufgrund der grossen Ausgangswerte die kleinen relativen Veränderungen zu grossen absoluten Veränderungen.

Im Vergleich der Saisons erkennt man die mehrheitlich grossen Zunahmen der mittleren Niederschläge im Winter und im Frühling und im Gegensatz dazu die Abnahmen im Sommer, deren Ausmass allerdings von moderat bis sehr gross variiert. Im Winter sind die Unterschiede zwischen den Emissionsszenarien deutlich und erreichen Ende des Jahrhunderts unter RCP 8.5 eine Zunahme von 24 % gegenüber der Referenzperiode oder als absolute Zahl von rund 50 mm. Auch im Frühling sind die Niederschlagszunahmen unter RCP 8.5 grösser als unter RCP 4.5. Im Sommer bestehen beträchtliche Unterschiede zwischen den beiden Emissionsszenarien, dies vor allem in der fernen Zukunft: Einer Abnahme von -9.5 % unter RCP 4.5 steht eine Abnahme von -23.1 % unter RCP 8.5 gegenüber. Das entspricht immerhin einer Abnahme von rund -70 mm. Uneinheitlich und wenig ausgeprägt hingegen sind die Niederschlagsveränderungen im Herbst.

Tab. 3.4.24: Mittlere jährliche und saisonale Niederschläge der Arbogne@Avenches (ArbAve). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 4.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	1043.9	219.0	259.1	296.6	269.2	mm
2040-2069	-2.4	5.8	1.8	-13.2	1.7	%
2070-2099	2.1	10.8	10.2	-9.5	5.4	%

Legende: ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 3.4.25: Mittlere jährliche und saisonale Niederschläge der Arbogne@Avenches (ArbAve). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 8.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	1043.9	218.1	261.9	296.6	269.2	mm
2040-2069	4.2	15.1	11.8	-8.9	4.4	%
2070-2099	0.7	24.3	15.3	-23.1	-3.1	%

Legende: ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

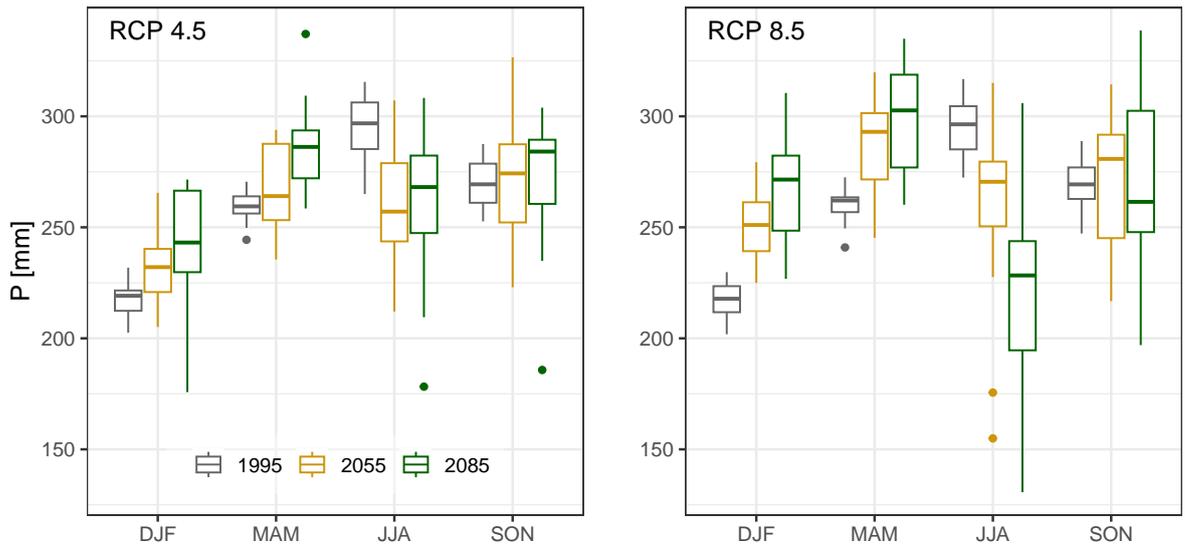


Abb. 3.37: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren saisonalen Niederschlagssummen für das Einzugsgebiet der Arbogne in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

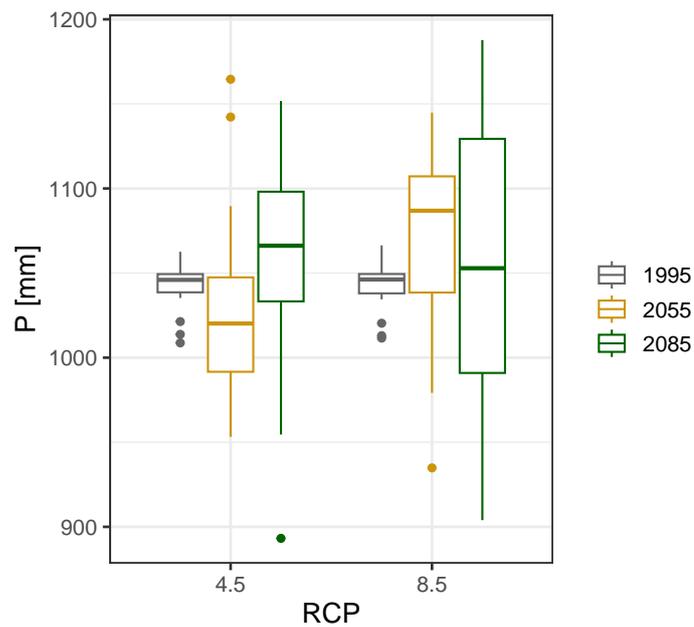


Abb. 3.38: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren Jahresniederschlags für das Einzugsgebiet der Arbogne in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

## Veränderungen des mittleren Abflusses

Die langjährigen mittleren Jahresabflüsse nehmen im Vergleich zur Referenzperiode 1981–2010 ab: in mittleren bis kleinen Umfang unter RCP4.5 und in kleinem (mittlere Zukunft) bis grossem (ferne Zukunft) Umfang unter RCP8.5 (Tab. 3.4.26 und 3.4.27 sowie Abb. 3.40).

Auffallend sind die unterschiedlichen Muster der Abnahmen zwischen den beiden Emissionsszenarien. Beim RCP4.5 ist die Abnahme gegenüber der Referenzperiode in der mittleren Zukunft grösser als in der fernen; beim RCP8.5 ist es gerade umgekehrt, nämlich dass die Abflussabnahmen in der fernen Zukunft grösser sind als in der mittleren Zukunft. Die relativ grossen Abnahmen unter RCP4.5 (-11.1%) und unter RCP8.5 (-17.2%) führen zu grossen Abnahmen des mittleren Jahresabflusses von 40 bzw. 60 mm.

Bei den saisonalen Abflüssen ist eine Zweiteilung zwischen Winter (DJF)/Frühling (MAM) auf der einen Seite und Sommer (JJA)/Herbst (SON) auf der anderen Seite erkennbar. Während im Winter/Frühling die mittleren saisonalen Abflüsse zunehmen, nehmen sie im Sommer/Herbst ab. Zudem ist das Ausmass der Veränderungen ziemlich unterschiedlich. Die Zunahmen im Winter/Frühling betragen über die beiden beiden Emissionsszenarien hinweg maximal 15%, liegen aber meistens unter 6%. Hingegen sind die relativen Abnahmen im Sommer und Herbst grösser als im Winter/ Frühling, Unter RCP4.5 im Bereich von -16.5 bis -21.2% und unter RCP8.5 bis rund -50%. Deutlich erkennbar sind die grossen bzw. sehr grossen Abnahmen sowohl im Sommer wie auch im Herbst. Da die Referenzwerte in diesen Monaten bereits sehr klein sind, sind die Auswirkungen dieser grossen bis sehr grossen Abnahmen auf das hydrologische System beträchtlich.

Tab. 3.4.26: Mittlere jährliche und saisonale Abflüsse der Arbogne@Avenches (ArbAve). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP4.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	361.4	99.5	105.8	77.6	77.6	mm
2040-2069	-11.1	5.5	0.9	-21.2	-16.5	%
2070-2099	-6.1	4.6	5.2	-16.5	-16.5	%

Legende: ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 3.4.27: Mittlere jährliche und saisonale Abflüsse der Arbogne@Avenches (ArbAve). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP8.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	361.4	98.6	109.5	78.5	78.5	mm
2040-2069	-2.0	14.8	4.2	-19.8	-23.3	%
2070-2099	-17.2	0.9	5.0	-37.2	-47.7	%

Legende: ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

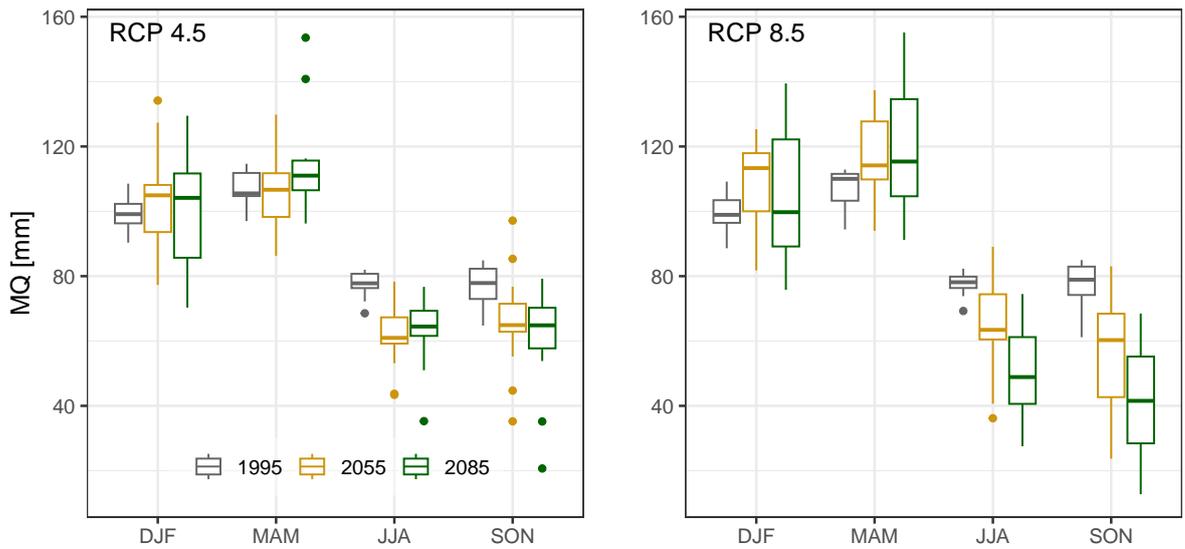


Abb. 3.39: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren saisonalen Abflüsse der Arbogne in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

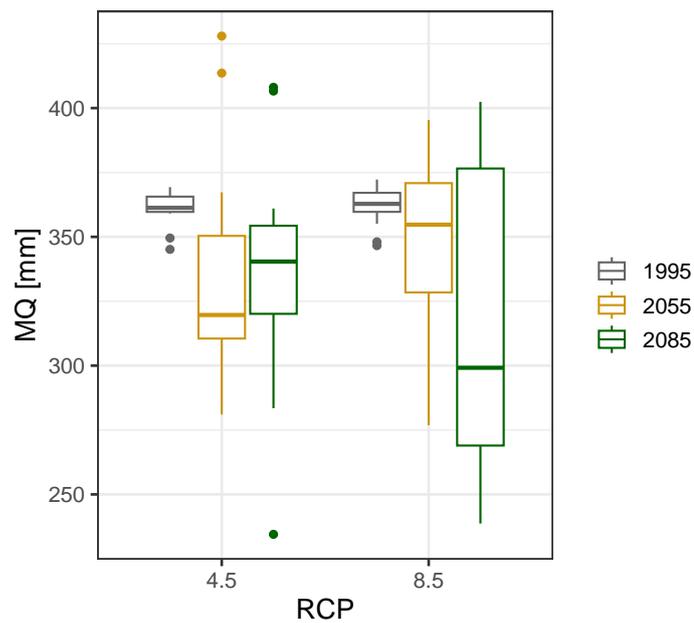


Abb. 3.40: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren Jahresabflüsse der Arbogne in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

Die Abbildung 3.41 ordnet die modellierten relativen Veränderungen in den Kontext der Beobachtungen der Periode 1993–2010<sup>10</sup> ein. Sie visualisiert einerseits die Abweichungen zwischen den Medianwerten und positioniert andererseits die zukünftigen Medianwerte im Streubereich der einzeljährigen Werte der Periode 1993–2010.

Im Winter (DJF) liegen die zukünftigen Mediane nicht nur oberhalb der Box, sondern nähern sich sogar dem grössten Jahreswert der Periode 1993–2010 an. In der Kombination RCP 8.5/mittlere Zukunft wird er gar überschritten!. Im Frühling (MAM) sind nur geringe Unterschiede zwischen den zukünftigen Perioden und der Referenzperiode erkennbar. Im Sommer (JJA) sind mehr als 75 % der einzeljährigen Abflüsse der Referenzperiode grösser als die zukünftigen Mediane. Der Medianwert in der fernen Zukunft unter RCP 8.5 nähert sich sogar dem kleinsten in einem Einzeljahr der Referenzperiode beobachteten Abfluss. Dabei ist auch zu bedenken, dass die Abflusswerte der Einzeljahre zukünftiger Perioden wiederum um den ausgewiesenen Median streuen, sodass in einzelnen Jahren nur noch sehr kleine Abflüsse auftreten. Im Herbst sind die Abnahmen unter RCP 4.5 kleiner als unter RCP 8.5. Bei diesem Szenario ist wiederum in der fernen Zukunft eine sehr grosse Abnahme zu erwarten.

---

<sup>10</sup>Die Abflussmessungen starteten erst 1993, sodass nicht die ganze Referenzperiode 1981–2010 abgedeckt werden kann

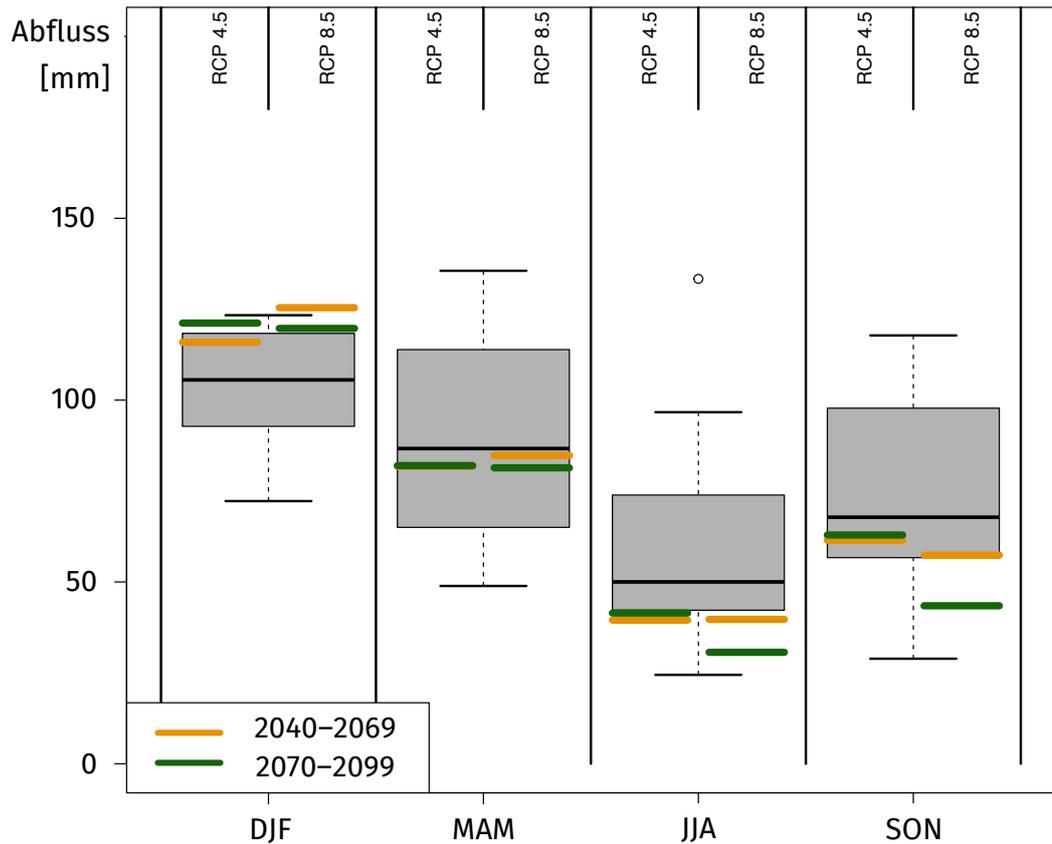


Abb. 3.41: Verteilung der saisonalen Abflüsse der Arbogne in der Periode 1993–2010, abgeleitet aus den Beobachtungen des BAFU und des Kantons Freiburg im Vergleich zu den medianen Abflüssen in der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

### Veränderungen der mittleren aktuellen Verdunstung

Im Zuge der Klimaerwärmung erhöht sich die Verdunstung in allen Jahreszeiten, in beiden Zukunftsperioden und unter beiden Emissionsszenarien. Unter RCP 4.5 nimmt die aktuelle Verdunstung in der mittleren Zukunft saisonal um 2 bis 13 % und in der fernen Zukunft um 5 bis 16 % zu, mit den grössten relativen Zunahmen im Winter und Frühling. Die Zunahme der mittleren Jahresverdunstung liegt zwischen 5 und 9 %. Das Muster der Zunahmen ist unter RCP 8.5 ähnlich, aber die Zunahmen sind insgesamt grösser, so nimmt die Verdunstung im Winter und Frühling bis zu 30 % gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 zu. Und auch die Zunahme der Jahresverdunstung ist um etwa 5 Prozentpunkte grösser als unter RCP 4.5.

Tab. 3.4.28: Aktuelle Verdunstung im Einzugsgebiet der Arbogne@Avenches (ArbAve) und relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 4.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	551.1	56.6	139.6	240.9	113.2	mm
2040-2069	5.3	12.9	7.2	4.2	2.4	%
2070-2099	8.6	16.1	11.1	6.4	4.8	%

Legende: -20 -10 -5 5 10 20 [%]

Tab. 3.4.29: Aktuelle Verdunstung im Einzugsgebiet der Arbogne@Avenches (ArbAve) und relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 8.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	551.1	56.6	138.7	240.9	112.2	mm
2040-2069	9.3	14.5	11.8	7.6	7.3	%
2070-2099	14.6	29.0	22.4	9.5	8.1	%

Legende: -20 -10 -5 5 10 20 [%]

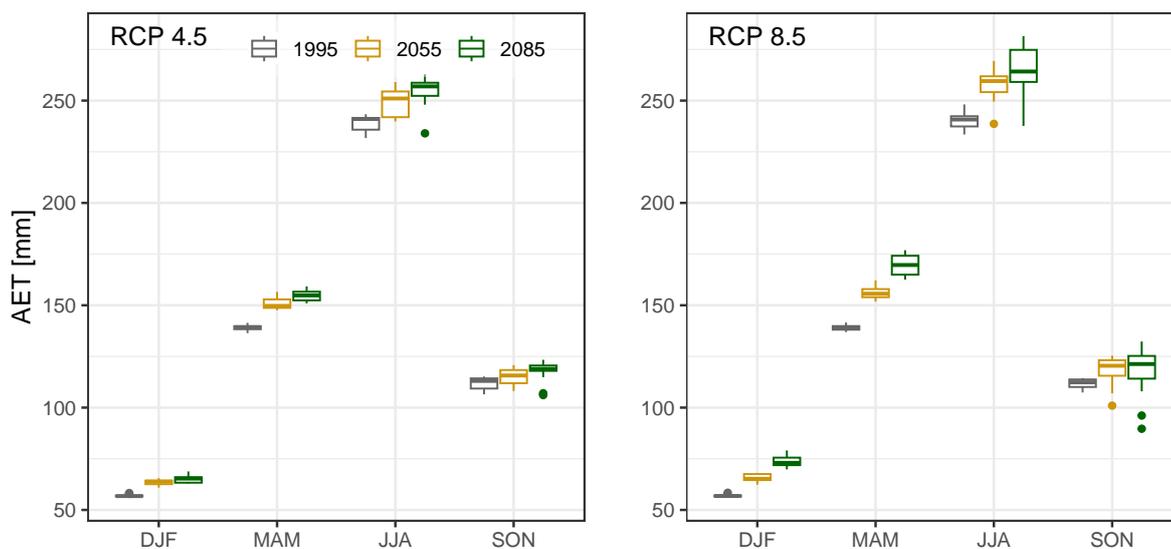


Abb. 3.42: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren saisonalen Verdunstungssummen für das Einzugsgebiet der Arbogne in der Referenzperiode 1981-2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

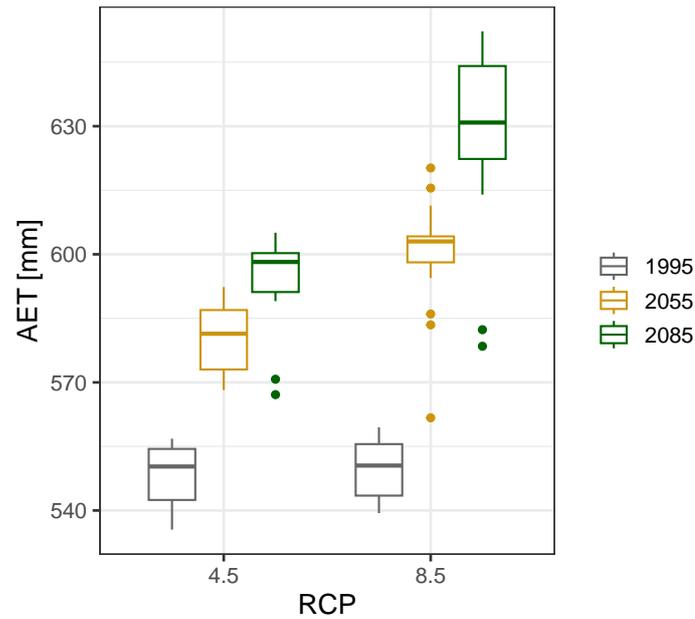


Abb. 3.43: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren Jahresverdunstung für das Einzugsgebiet der Arbonne in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP4.5 und RCP 8.5.

### Veränderungen des Schnees

Der Schnee besitzt in diesem Einzugsgebiet nur eine geringe Bedeutung. Trotzdem oder vielleicht gerade deswegen ist es dem Modell GR4J in Kombination mit dem Schneemodul CemaNeige nicht gelungen, den Schneeanteil am Gesamtniederschlag plausibel zu modellieren. Deshalb verzichten wir hier auf eine Darstellung der Ergebnisse.

### Wasserhaushaltliche Betrachtungen zu den Veränderungen

In diesem Kapitel betrachten wir die Veränderungen der Wasserhaushaltselemente in deren Zusammenspiel. Dazu werden die in den obigen Tabellen ausgewiesenen relativen Veränderungen von Niederschlag(N), Abfluss (A) und aktueller Verdunstung (V) den Beobachtungen der Referenzperiode 1981–2010 (siehe Abb. 3.44) aufgeprägt. Das Hauptziel ist es, die Veränderungen des Abflusses im Kontext der Veränderungen der anderen Wasserhaushaltselemente zu verstehen. Bei dieser Betrachtungsweise gilt:

$$\Delta A = \Delta N - \Delta V - \Delta Rg \quad (3.12)$$

Bei der Anwendung dieser Gleichung sind unbedingt die Vorzeichen zu beachten. So gilt beim Jahresabfluss unter RCP 4.5 in der mittleren Zukunft (um 2055, s. Abb. 3.44) folgende Beziehung

$$-37 = -25 - 28 - (-16) [mm] \quad (3.13)$$

Die Gleichung belegt, dass die Veränderung des Jahresabflusses (-37 mm) zu etwa gleichen Teilen durch die Abnahme des Jahresniederschlags (-25 mm) und die Zunahme der Jahresverdunstung (28 mm) bedingt sind. In den restlichen Kombinationen nimmt der mittlere Jahresniederschlag durchwegs zu. Unter RCP 4.5 in der fernen Zukunft und unter RCP 8.5 in der mittleren Zukunft kompensiert die zunehmende Verdunstung die Zunahme des Jahresniederschlags und führt dazu, dass die Abflussveränderungen eher klein ausfallen. Hingegen wirkt sich die starke Zunahme der Verdunstung in der fernen Zukunft (RCP 8.5) direkt auf die Abnahme des Abflusses aus, weil die Veränderungen des Jahresniederschlags gegenüber der Referenzperiode 1981–2010 sehr klein sind. Die aktuelle Verdunstung spielt also eine zentrale Rolle bei der Veränderung des Abflusses.

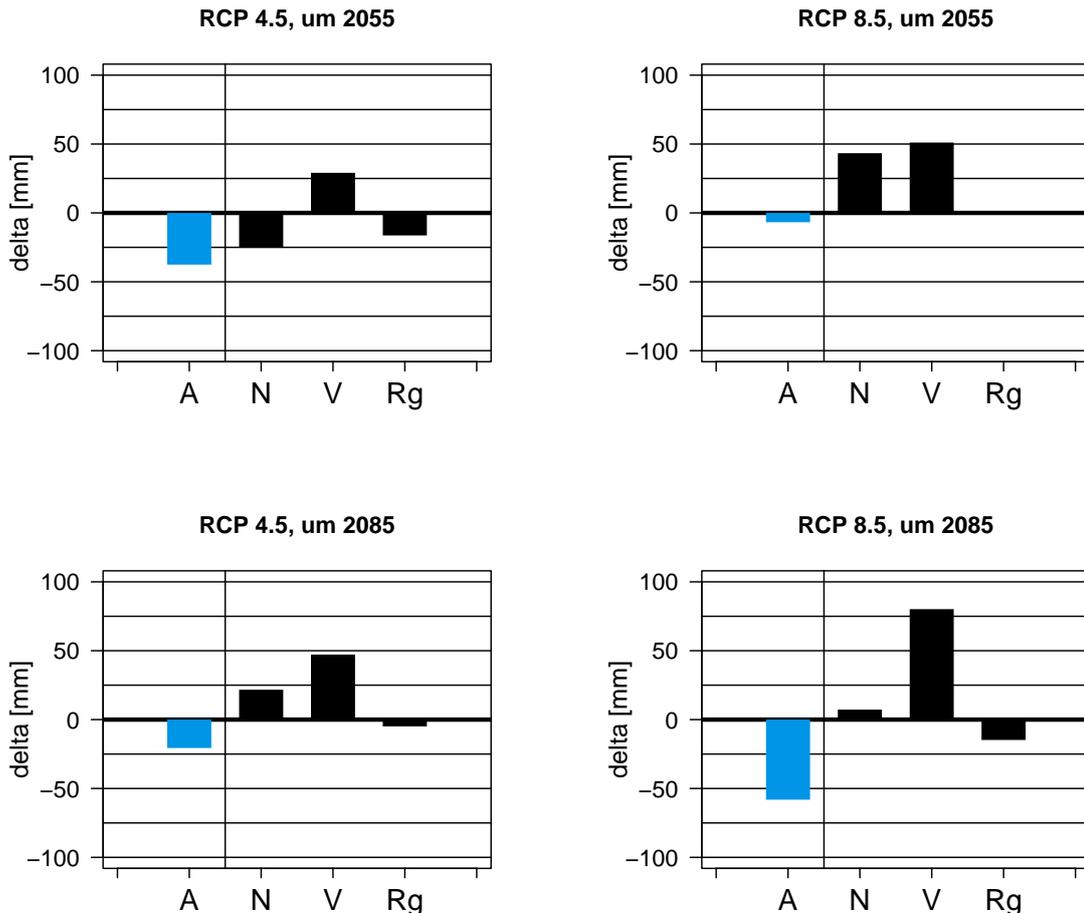


Abb. 3.44: Vergleich der Veränderungen der Jahresbilanz im Einzugsgebiet der Arbogne@Avenches. Die Säulen zeigen das Ausmass und das Vorzeichen der Veränderungen (Zu- oder Abnahmen) in mm/a. Die Grafik beschreibt zudem, welchen Beitrag die Veränderungen von Niederschlag (N), Verdunstung (V) sowie des Restglieds (Rg) zur Veränderung des Abflusses (A, blaue Säule) leisten. Es gilt  $dA = dN - dV - dRg$  (d: Veränderung in mm)

Betrachten wir nun die Abflussveränderungen und deren Ursache im Sommer (Abb. 3.45). In dieser Jahreszeit sind die relativen Abnahmen des Abflusses gross bis sehr gross. Aufgrund der bereits recht kleinen Ausgangswerte von 60 mm (Beobachtung) sind die absoluten Veränderungen zwar klein, aber gerade aufgrund der tiefen Ausgangswerte besonders relevant.

Die Abflussabnahmen sind primär durch die Abnahme der Niederschläge verursacht. Die Zunahme der Verdunstung wirkt verstärkend. Man darf dem Restglied bei den saisonalen Betrachtungen aufgrund der Unsicherheiten zwar keine allzu grosse Bedeutung beimessen, aber der grosse negative Wert des Restglieds in der fernen Zukunft unter RCP 8.5 fällt dennoch auf. Der negative Wert des Restglied suggeriert, dass zusätzliches Wasser im System vorhanden ist, vermutlich durch das Entleeren des Grundwasserspeichers. Als

Folge davon ist das Abflussdefizit kleiner als das Restglied. Dies ist nicht nur ein Hinweis auf die Bedeutung der Speicher, sondern zeigt auch auf, dass das Abflussdefizit bedeutend grösser ausfallen würde, falls kein Wasser aus dem Grundwasserspeicher zufließen würde.

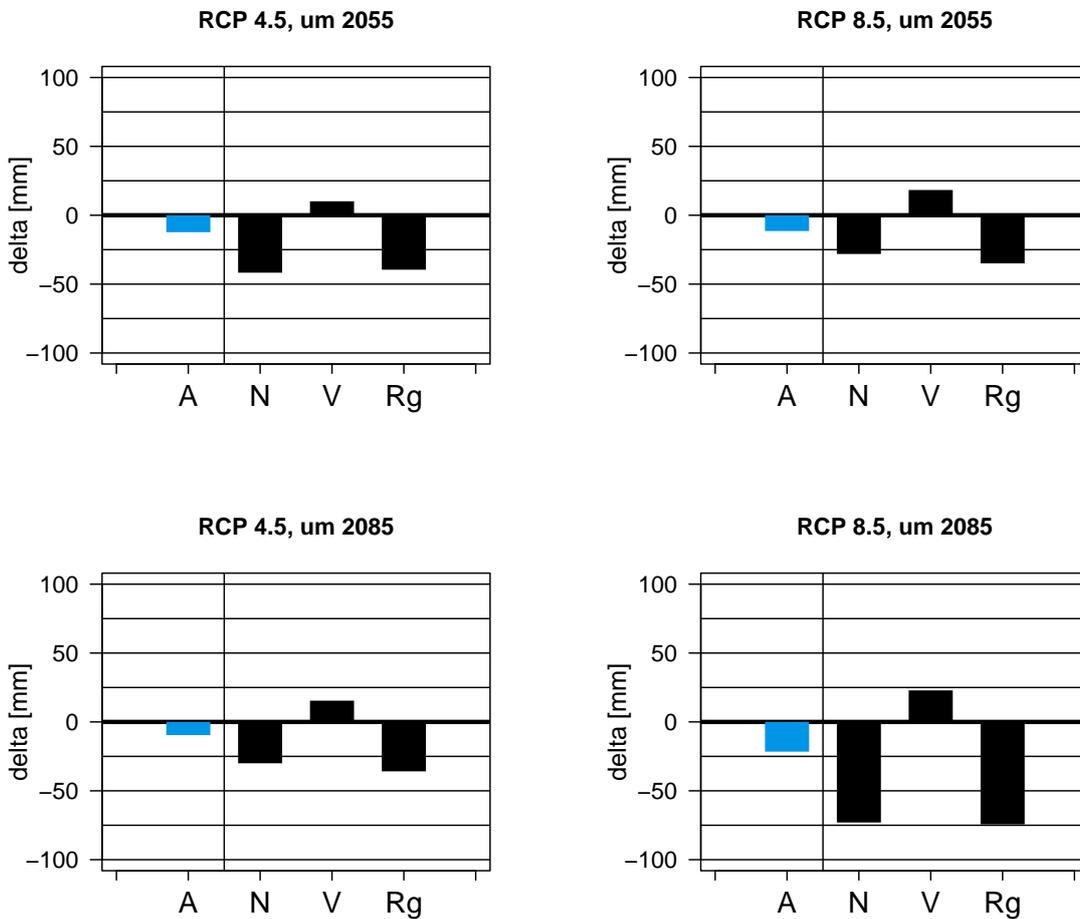


Abb. 3.45: Vergleich der Veränderungen der Wasserbilanz im Sommer (JJA) im Einzugsgebiet der Arbonne@Avenches. Die Säulen zeigen das Ausmass und das Vorzeichen der Veränderungen (Zu- oder Abnahmen) in mm/a. Die Grafik beschreibt zudem, welchen Beitrag die Veränderungen von Niederschlag (N), Verdunstung (V) sowie des Restglieds (Rg) zur Veränderung des Abflusses (A, blaue Säule) leisten. Es gilt  $dA = dN - dV - dRg$  (d: Veränderung in mm)

Diese Aussagen werden durch die Abbildungen 3.46 und 3.47 bestätigt (vgl. JJA), welche die Veränderungen des Niederschlags (deltaPR) den Veränderungen des Abflusses (deltaQ) gegenüberstellt. Man erkennt die überproportionale Abnahme des Abflusses im Vergleich zum Niederschlag. Die Medianwerte liegen unter der Winkelhalbierenden, was den Einfluss der zunehmenden aktuellen Verdunstung verdeutlicht

Im Winter (DJF) hingegen liegen die Werte beim Emissionsszenario RCP 4.5 im Bereich der Winkelhalbierenden. Das bedeutet, dass die Abflusszunahmen eng mit den Zunahmen des Niederschlags verbunden sind. Anders präsentiert sich die Situation im Winter unter RCP 8.5. Der mittlere Abfluss reagiert nur wenig auf die starke Zunahme des mittleren Niederschlags. Für die Interpretation dieses nichtlinearen Verhaltens sei auf Kapitel 3.4.2 verwiesen.

Die Streuung der Werte der einzelnen Modellketten um den Median zeigen, wie gut die einzelnen Modellketten den Medianwert repräsentieren (vgl. Abb. 3.46 und 3.47). Nehmen wir dazu das Beispiel der Modellierung unter RCP 4.5. Im Sommer sind sich die Modellketten weitestgehend über das Vorzeichen der Veränderungen einig, führen aber zu unterschiedlichen Aussagen bezüglich des Ausmasses der Veränderungen. Im Winter ist die Situation nicht derart eindeutig. So gehen einzelne Modellketten von einer Zunahme des Niederschlags und des Abflusses aus, andere von einer Abnahme. Trotzdem scharen sich die meisten Modellketten relativ nahe um die Medianwerte. Bei Unsicherheitsüberlegungen sind diese Streuungen der Modellketten miteinzubeziehen. In der vorliegenden Arbeit werden sie durch die Diagramme mit den Boxplots dargestellt.

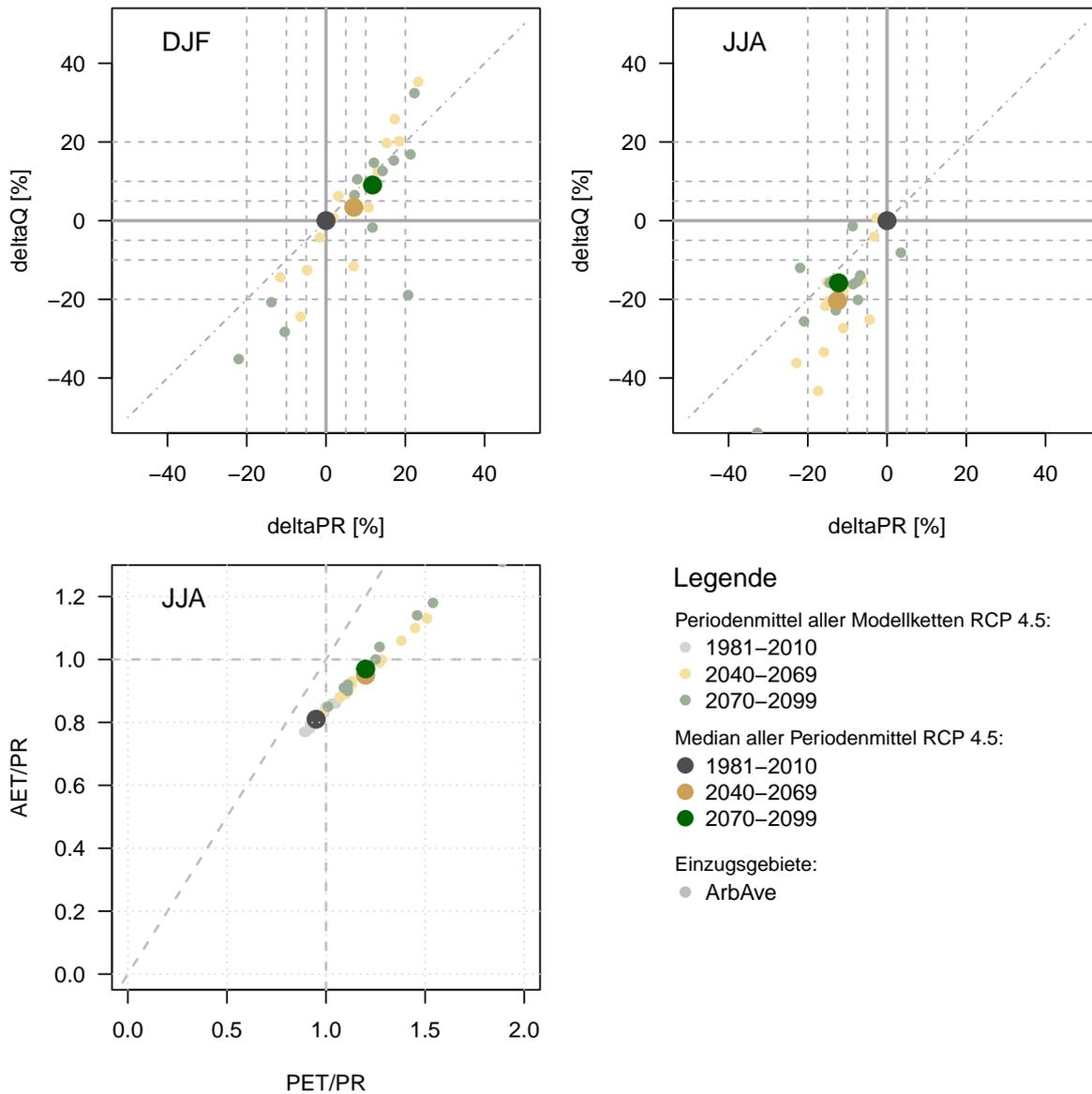


Abb. 3.46: Diagramme zum Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Arbogne@Avenches im Winter (DJF) und Sommer (JJA) unter RCP 4.5. Die oberen zwei Diagramme zeigen die relative Veränderung von Niederschlag (deltaPR) und Abfluss (deltaQ). Das Budyko-Diagramm wird im Methodenteil eingeführt und beschrieben. Die drei Diagramme zeigen die Streuung der Periodenmittel aller verwendeten Modellketten sowie den Medianwert dieser Periodenmittel.

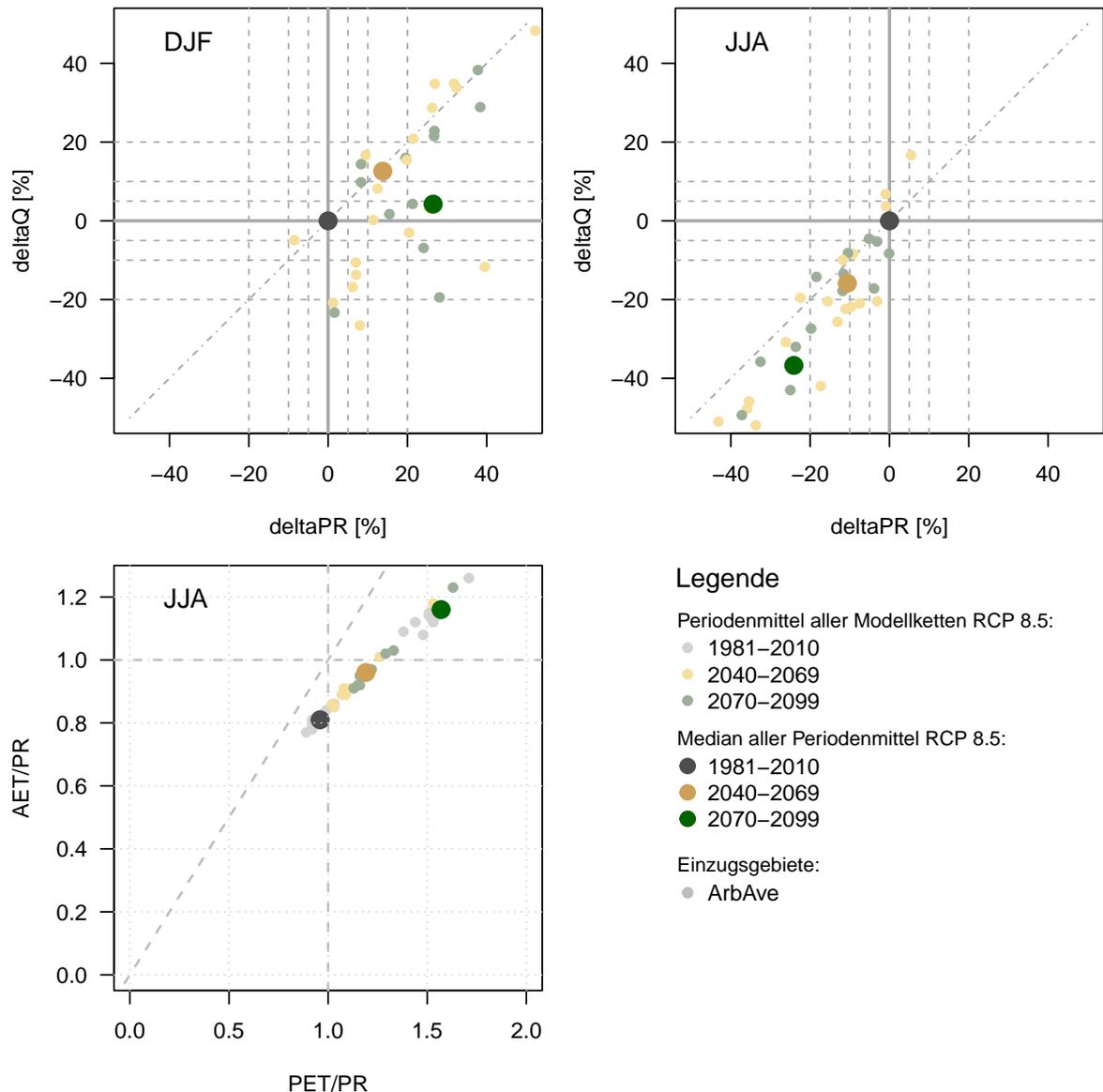


Abb. 3.47: Diagramme zum Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Arbogne@Avenches unter RCP 8.5

Gemäss dem Budyko-Diagramm (Abb. 3.46) ist der Wasserhaushalt in der Region PlaNor im Sommer in der Referenzperiode noch knapp energielimitiert und die Verdunstung dominiert den Wasserhaushalt mit einem Anteil von rund 80 % am Niederschlag. In der Zukunft wird die Bedeutung der Verdunstung unter beiden Szenarien weiter zunehmen und die Wasserhaushaltssituation wechselt von der Energielimitierung zur Wasserlimitierung, dies weit ausgeprägter unter RCP 8.5. Die Wasserknappheit wird zunehmend zu einem Problem. Dies ist nicht weiter erstaunlich, wenn man bedenkt, dass der mittlere Abfluss im Sommer in der Referenzperiode nur 60 mm beträgt (Beobachtungswert der Referenzperiode).

Bei diesem Diagramm stellt sich die Frage, ob beim Indikator AET/PR überhaupt Werte > 1 auftreten können. Eigentlich wurde das Budyko-Diagramm für Situationen entwickelt, bei denen das Speicherglied  $\Delta S$  vernachlässigbar klein ist. Dies ist bei der saisonalen Betrachtung nicht unbedingt gegeben. Deshalb ist es möglich, dass Wasser immer noch verdunsten kann, auch wenn bereits kein Niederschlagswasser mehr verfügbar ist; nämlich dann, wenn Wasser aus dem Speicher entnommen wird.

### Veränderungen der kleinsten und grössten Tagesabflüsse

Es muss nochmals deutlich darauf hingewiesen werden, dass wir hier sehr kleine und sehr grosse Tagesabflüsse analysieren. Bei den sehr grossen Tagesabflüssen handelt es sich nicht um Hochwasser bzw. Hochwasserspitzen im engeren Sinne des Wortes. Solche Hochwasser laufen im Stundenbereich ab und sind mit den hier verwendeten Tageswerten nicht erfassbar. Hingegen werden die kleinsten Abflüsse in der Tagesauflösung gut erfasst, weil die Schwankungen im Niedrigwasserbereich sehr träge ablaufen. Die kleinsten und grössten Tagesabflüsse werden durch sogenannte Quantile (q) beschrieben. Das Abflussquantil ( $Qq_{10}$ ) beispielsweise gibt jenen Abfluss (Q) an, der im Mittel an 10% der Tage – also an 37 Tagen des Jahres – erreicht oder unterschritten wird.

Tab. 3.4.30: Kleinste und grösste Abflüsse der Arbogne@Avenches (ArbAve). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 4.5

	Qq01	Qq05	Qq10	Qq90	Qq95	Qq99	
1981-2010	0.2	0.2	0.3	1.9	2.6	4.9	mm/d
1981-2010	0.2	0.2	0.2	1.6	2.2	4.1	m <sup>3</sup> /s
1981-2010	2.3	2.9	3.5	22.4	30.6	56.8	l/s/km <sup>2</sup>
2040-2069	-28.6	-28.0	-23.3	-4.8	-2.7	-6.6	%
2070-2099	-25.0	-25.0	-22.6	0.5	0.4	-0.9	%

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 3.4.31: Kleinste und grösste Abflüsse der Arbogne@Avenches (ArbAve). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 8.5

	Qq01	Qq05	Qq10	Qq90	Qq95	Qq99	
1981-2010	0.2	0.2	0.3	2.0	2.7	5.0	mm/d
1981-2010	0.1	0.2	0.2	1.6	2.3	4.2	m <sup>3</sup> /s
1981-2010	2.1	2.7	3.4	22.6	31.5	57.9	l/s/km <sup>2</sup>
2040-2069	-29.9	-27.0	-28.8	3.2	3.8	6.0	%
2070-2099	-52.7	-52.3	-50.0	-9.0	-6.5	-1.1	%

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Die deutlichen Unterschiede in den Veränderungen zwischen den kleinsten und den grössten Tagesabflüssen fallen beim Betrachten der beiden Tabellen sofort auf: Sämtliche kleinsten Tagesabflüssen nehmen in einem sehr grossen Umfang ab, unter RCP 4.5 um -23 bis -29% in beiden Zukunftsperioden, unter RCP 8.5 in der mittleren Zukunft zwischen -27 und -30% und in der fernen Zukunft bis -53%. Die Niedrigwassersituation der Arbogne verändert sich markant!

Hingegen sind die Abnahmen bei den grössten Tagesabflüssen meist klein.

### 3.4.4 Region Südliches Mittelland, région Plateau Sud (PlaSud)

#### Ausgangslage

Die Region Südliches Mittelland wird durch das Einzugsgebiet der Sionge@Vuippens repräsentiert, das folgende Charakteristiken aufweist:

- Fläche: 43.4 km<sup>2</sup>
- Höhenverhältnisse:
  - minimale Höhe: 682 m ü.M.
  - mittlere Höhe: 869 m ü.M.
  - maximale Höhe: 1412 m ü.M.

Die Region ist die zweithöchste der insgesamt fünf analysierten Regionen des Kantons. Bei der Landnutzung beträgt der Flächenanteil des Ackerlands rund 60 %. Wald und hier vor allem Nadelwald besitzen einen Flächenanteil von rund 15 %. Der Siedlungsanteil ist mit wiederum rund 15 % vergleichsweise sehr hoch. Die restlichen 10 % der Fläche sind Grünland.

Die hydrologischen Kennwerte werden in der Regel in der Dimension Millimeter ausgegeben. Bezogen auf das Einzugsgebiet der Sionge gilt: 1 mm  $\hat{=}$  43'400 m<sup>3</sup>.

#### Herleitung der Wasserbilanz

Gemäss der hydrogeologischen Karte im Hydrologischen Atlas der Schweiz<sup>11</sup> ist das Einzugsgebiet nicht geschlossen. Es ist im südöstlichen Teil mit unterirdischen Zuflüssen (Zu) zu rechnen (vgl. Abb. 3.48). Zudem befindet sich im nördlichen Teil des Einzugsgebietes ein mächtiger Grundwasserkörper, in dem vermutlich Wasser unterirdisch abfließt (Au) und von der Abflussmessstation in Vuippens (roter Punkt) nicht erfasst wird. Damit präsentiert sich die vermutete Wasserbilanz wie folgt:

$$N = A_o + Au - Zu + V \quad (3.14)$$

mit:

---

<sup>11</sup><https://hydromaps.ch>

- N: Niederschlag
- Ao: Oberirdische Abfluss
- Au: Unterirdischer Abfluss
- Zu: Unterirdischer Zufluss
- V: Verdunstung

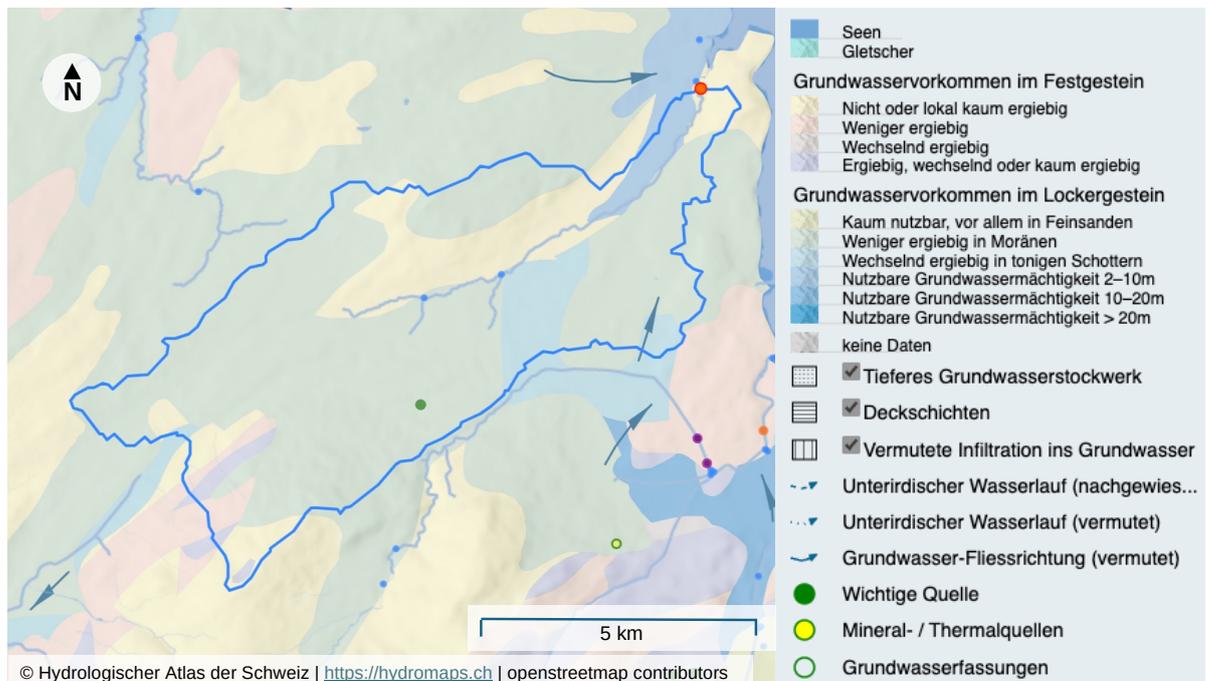


Abb. 3.48: Hydrogeologische Situation der Sionge. Ausschnitt aus dem Hydrologischen Atlas der Schweiz

Bei den beobachteten Daten musste ein Restglied ( $I$ ) in die Bilanz eingeführt werden, damit die Wasserbilanz in sich schlüssig ist. In diesem Restglied sind die unterirdischen Zuflüsse und die unterirdischen Abflüsse zusammengefasst, da sie quantitativ nicht trennbar sind. Es enthält aber auch mögliche Fehler in den Beobachtungsdaten. Das Vorzeichen des Restglieds verdeutlicht, dass die unterirdischen Zuflüsse grösser sind als die unterirdischen Abflüsse. Denn es gilt:

$$N = A_o + V - I \rightarrow N + I = A_o + V \quad (3.15)$$

Um die Bilanzbetrachtungen überhaupt durchführen zu können, mussten wir auf einen modellierten Verdunstungswert zurückgreifen. Ein Vergleich der mit GR4J errechneten Jahresverdunstung von 533 mm mit

jener aus dem Hydrologischen Atlas von 539 mm (Periode 1973–1992) zeigt, dass dieser Wert sehr vertrauenswürdig ist. In der Tabelle 3.4.32 findet man die mittlere jährliche Wasserbilanz der Referenzperiode basierend auf Beobachtungsdaten.

Tab. 3.4.32: Vergleich der beobachteten und modellierten Wasserbilanz der Sionge. N: Niederschlag, Ao: oberirdischer Abfluss, I: unterirdischer Abfluss - unterirdischer Zufluss, V: Verdunstung. obs: Beobachtungen. Niederschlag aus RhiresD und Abfluss aus Messungen des BAFU abgeleitet, Verdunstung wird aus Modelldaten übernommen, I: als Restglied der Wasserbilanz berechnet. mod: modellierte Daten

	Periode	mm/a				%			
		N	Ao	I	V	N	Ao	I	V
obs	1981–2010	1343	864	-54	533	100	64	-4	40
mod	1981–2010	1331	834	-36	533	100	63	-3	40

Die Sionge besitzt gemäss dem Hydrologischen Atlas der Schweiz<sup>12</sup> ein nivo-pluviales Regime, liegt aber aufgrund der mittleren Gebietshöhe von 869 m ü.M. im Übergangsbereich zum Regime pluvial supérieur, was bei der Betrachtung des Abflusses in Abbildung 3.49 bestätigt wird, sind doch die Abflüsse im Winter (DJF) und Frühling (MAM) sehr ähnlich. Im Frühjahr ist jedenfalls kein «Schneeschnmelz-Peak» erkennbar. Die kleinsten Abflüsse treten im Sommer (JJA) und Herbst (SON) auf. Der Niederschlag im Sommer (JJA) ist mit rund 400 mm am grössten. Die Niederschläge im Frühling (MAM) und im Herbst (SON) liegen bei 330 mm. Der kleinste saisonale Niederschlag fällt im Winter mit rund 280 mm. Bei der Verdunstung ist die durch den Strahlungshaushalt geprägte Saisonalität mit kleinen Werten im Winterhalbjahr und grossen Werten im Sommerhalbjahr erkennbar. Das Restglied suggeriert, dass bei den unterirdischen Abflusskomponenten im Winter und Frühling unterirdische Zuflüsse ins Gebiet und im Sommer und Herbst die unterirdischen Abflüsse aus dem Gebiet dominieren.

<sup>12</sup><https://hydrologischeratlas.ch> (Tafel 5.2)

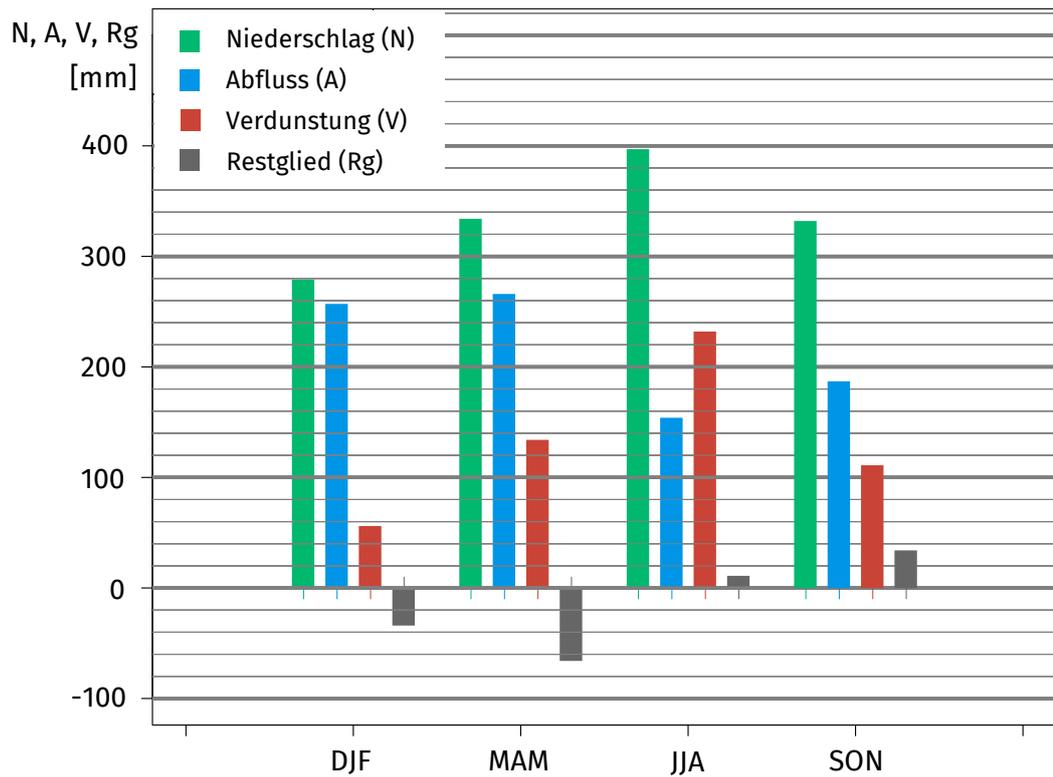


Abb. 3.49: Mittlere saisonale Wasserbilanz der Sionge in der Periode 1981–2010, basierend auf den Beobachtungsdaten

### Beurteilung der Güte der Modellierungen

Mit der GR<sub>4j</sub> Modellierung können sowohl die Wasserhaushaltselemente als auch die Bilanz sehr gut wiedergegeben werden (Tab. 3.4.32). Zwar ist der relative Fehler beim Term I mit -33 % gross. Um die Auswirkungen dieses Fehlers auf die Wasserbilanz einzuschätzen, muss der absolute Fehler betrachtet werden. Er ist mit 18 mm sehr klein.

In der folgenden Tabelle wird beurteilt, wie gut GR<sub>4j</sub> den Niederschlag (P) und den oberirdischen Abfluss (MQ) auf saisonaler Basis abbildet.

Tab. 3.4.33: Vergleich der beobachteten und modellierten saisonalen Werte des Niederschlags und des oberirdischen Abflusses der Sionge in der Periode 1981–2010 für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

		RCP 4.5		RCP 8.5	
		P	MQ	P	MQ
Y	CH2018	1325	838	1331	841
Y	OBS	1323	864	1323	864
Y	$\Delta$ mm	2	-26	8	-23
Y	$\Delta\%$	0	-3	1	-3
DJF	CH2018	294	230	295	234
DJF	OBS	295	257	295	257
DJF	$\Delta$ mm	-1	-27	0	-23
DJF	$\Delta\%$	0	-10	0	-9
MAM	CH2018	331	243	333	244
MAM	OBS	334	266	334	266
MAM	$\Delta$ mm	-3	-23	-1	-22
MAM	$\Delta\%$	-1	-9	0	-8
JJA	CH2018	371	177	370	176
JJA	OBS	364	154	364	154
JJA	$\Delta$ mm	7	23	6	22
JJA	$\Delta\%$	2	15	2	14
SON	CH2018	326	187	329	190
SON	OBS	328	187	328	187
SON	$\Delta$ mm	-2	0	1	3
SON	$\Delta\%$	-1	0	0	2

Das Modell kann die mittlere Niederschläge der Referenzperiode 1981–2010 durchwegs sehr gut abbilden. Bei den saisonalen Abflüssen hingegen ist die Modellgüte insgesamt gut, wobei saisonale Differenzen bestehen. Das Modell ist in der Lage, die Abflüsse im Herbst sehr gut, im Frühling gut, im Winter gut bis sehr gut abzubilden. Die grössten Defizite bestehen im Sommer, wo die Modellgüte nur ausreichend ist. Zwischen den beiden Emissionsszenarien bestehen aus der Sicht der Modellgüte geringe Unterschiede.

Muelchi et al. (2021)<sup>13</sup>. führten im Rahmen des CH2018-Projekts in ausgewählten Einzugsgebieten der Schweiz ebenfalls hydrologische Modellierungen vor dem Hintergrund der Klimaerwärmung durch. Die Ergebnisse sind im Hydrologischen Atlas veröffentlicht<sup>14</sup>. Als Eingangsdaten verwendeten auch sie CH2018-Modellketten, welche allerdings mit den hier verwendeten nicht ganz übereinstimmen. Ebenfalls nicht ganz identisch ist

<sup>13</sup>Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R. und Martius, O. (2021). River runoff in Switzerland in a changing climate—runoff regime changes and their time of emergence. In: Hydrology and Earth System Sciences 25,6, S. 3071–3086. DOI: 10.5194/hess-25-3071-2021

<sup>14</sup><https://hydromapscc.ch/>

die Zeitperiode der mittleren Zukunft: Muelchi et al.: 2045-2074; Studie Freiburg: 2040-2069. Trotz dieser Vorbehalte ist der Vergleich der beiden Modellierungen interessant, weil Muelchi et al. mit dem Modell PREVAH<sup>15</sup> ein hydrologisches Modell verwendeten, das komplexer ist als GR4J.

Der Modellvergleich in Abb. 3.50 belegt, dass die Ergebnisse der beiden unabhängigen Modellierungen sehr gut übereinstimmen.



Abb. 3.50: Vergleich der mittleren saisonalen Abflüsse der Sionge, modelliert mit unterschiedlichen Modellen und ähnlichen Inputdaten unter RCP 4.5

**Fazit:** Insgesamt verdeutlichen die verschiedenen Validierungen, dass das Modell GR4J in der Lage ist, die hydrologischen Bedingungen der Sionge in der Referenzperiode gut bis sehr gut abzubilden.

<sup>15</sup>Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J. und Weingartner, R. (2009). An introduction to the hydrological modelling system PREVAH. In: Environmental Modelling and Software 24.10. DOI: 10.1016/j.envsoft.2009

## Veränderungen des mittleren Niederschlags

Die Tabellen 3.4.34 und 3.4.35 beschreiben die relativen Veränderungen der mittleren Niederschläge, während die beiden Abbildungen 3.52 und 3.51 einerseits die absoluten Veränderungen aufzeigen und andererseits auf die Streuung der Modellketten und damit auf die Modellunsicherheit hinweisen.

Beim Jahresniederschlag liegen die Veränderungen zwischen 0 und -4 %: d.h., der mittlere Jahresniederschlag nimmt in Zukunft nur in einem kleineren Ausmass ab. Aufgrund der grossen Ausgangswerte führen allerdings die kleinen relativen Veränderungen zu grossen absoluten Veränderungen. Es fallen die unterschiedlichen Entwicklungsmuster zwischen den Emissionsszenarien auf:

- RCP 4.5: Abnahme gegenüber der Referenzperiode in der mittleren Zukunft, Annäherung an die Referenzperiode in der fernen Zukunft.
- RCP 8.5: Kontinuierliche Abnahme im Verlaufe der Zeit. Grosse Modellunsicherheit in der fernen Zukunft.

Saisonal gesehen nehmen die Niederschläge im Winter und Frühling zu. Diese Zunahmen verstärken sich gegen Ende des Jahrhunderts und sind unter RCP 8.5 rund 5 Prozentpunkte grösser als unter RCP 4.5. Die Zunahme im Frühling ist kleiner als im Winter, aber es bestehen wieder dieselben Unterschiede zwischen den Emissionsszenarien. Im Sommer nehmen die Niederschläge durchwegs ab. Unter RCP 4.5 um 13 bis 14 %, allerdings bestehen nur kleine Unterschiede zwischen der mittleren und fernen Zukunft. Hingegen zeigt das Szenario RCP 8.5 ein starkes Signal der Abnahme und grosse Unterschiede zwischen der mittleren und fernen Zukunft. Im Herbst nehmen die mittleren Niederschläge unter RCP 4.5 kaum ab, unter RCP 8.5 um rund 7 % bis Ende des Jahrhunderts.

Tab. 3.4.34: Mittlere jährliche und saisonale Niederschläge der Sionge. Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 4.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	1325.0	295.7	331.2	369.6	326.7	mm
2040-2069	-3.9	5.9	0.8	-14.3	0.0	%
2070-2099	0.0	10.2	5.2	-13.1	-0.6	%

Legende: ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 3.4.35: Mittlere jährliche und saisonale Niederschläge der Sionge. Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 8.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	1328.6	294.7	333.1	369.6	328.5	mm
2040-2069	-0.5	11.8	6.8	-13.1	-0.6	%
2070-2099	-3.8	15.2	10.1	-27.2	-6.9	%

Legende: -20 -10 -5 5 10 20 [%]

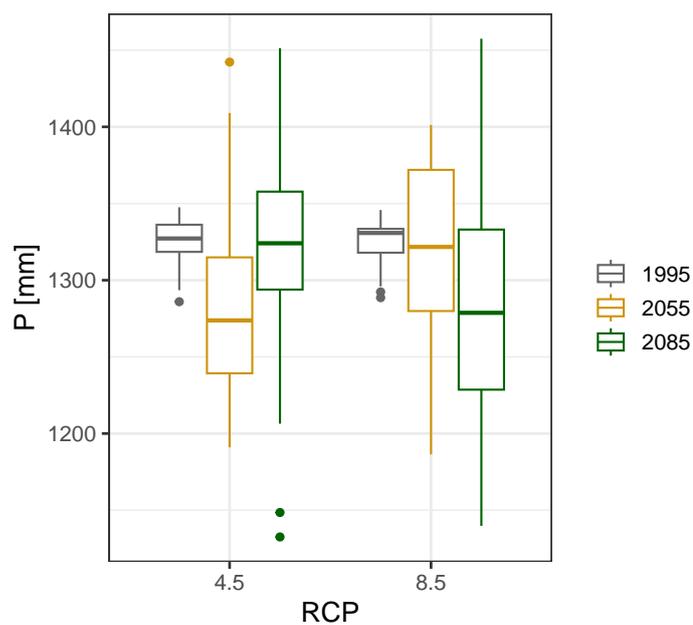


Abb. 3.51: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren Jahresniederschlags für das Einzugsgebiet der Sionge in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

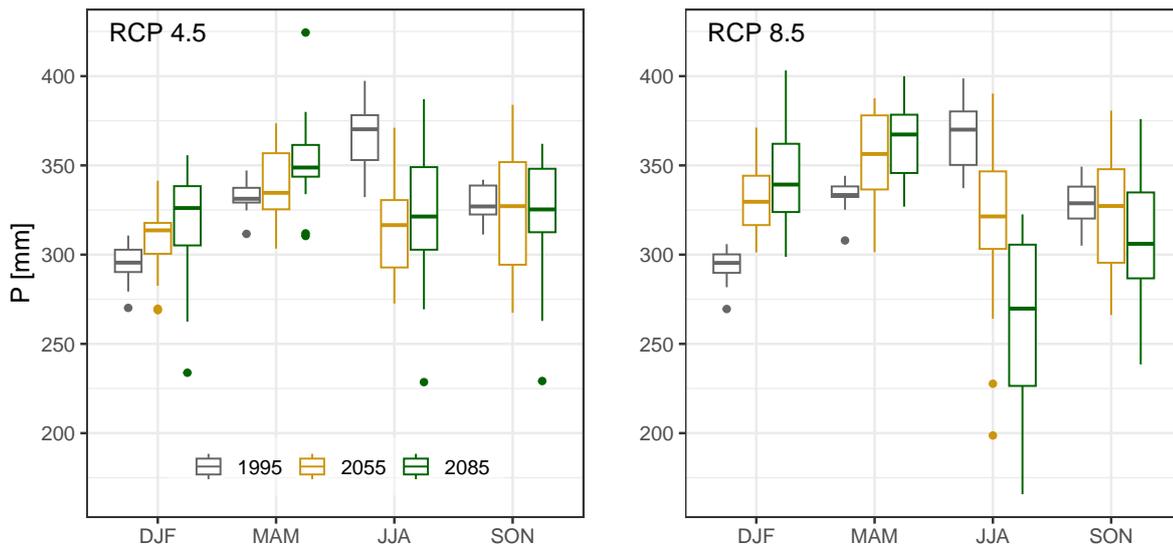


Abb. 3.52: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren saisonalen Niederschlagssummen für das Einzugsgebiet der Sionge in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

### Veränderungen der mittleren Abflüsse

Die langjährigen mittleren Jahresabflüsse nehmen alle im Vergleich zur Referenzperiode 1981–2010 ab, und dies etwa im Bereich von -10 bis -16 % (vgl. Tab. 3.4.36 und 3.4.37).

Bemerkenswert sind die Unterschiede zwischen den beiden Szenarien: Während beim Szenario RCP 4.5 die Abnahmen in der mittleren Zukunft grösser sind als in der fernen (immer im Vergleich zur Referenzperiode), ist die Abnahme in der fernen Zukunft unter RCP 8.5 nicht nur grösser als in der mittleren Zukunft, sondern ist mit -16.5 % bzw. rund -140 mm auch relativ gross.

Bei den saisonalen Abflüssen ist eine Dreiteilung erkennbar mit Abflusszunahmen im Winter, Abflussabnahmen im Sommer und Herbst und mit nur geringen Veränderungen im Frühling. Die Abflusszunahmen im Winter liegen bei rund 10 %, und zwar unabhängig von der Zukunftsperiode und vom Emissionsszenario. Sämtliche Abflussabnahmen im Sommer sind sehr gross; es bestehen allerdings beträchtliche Unterschiede zwischen den Szenarien. Unter RCP 4.5 betragen die Abnahmen rund -25 %, während sie unter RCP 8.5 zwischen -24 und -43 % liegen. Berücksichtigt man zusätzlich die Abflussabnahmen im Herbst, die unter RCP 8.5 in der fernen Zukunft mit rund -37 % ebenfalls sehr gross sind, erkennt man die zu erwartenden markanten Veränderungen der Abflussverhältnisse bei der Sionge im Sommerhalbjahr.

Tab. 3.4.36: Mittlere jährliche und saisonale Abflüsse der Sionge@Vuippens (SioVui). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 4.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	835.9	229.0	242.7	177.0	186.2	mm
2040-2069	-10.5	9.2	-1.9	-25.8	-4.9	%
2070-2099	-7.0	10.0	-1.1	-25.3	-9.3	%

Legende: -20 -10 -5 5 10 20 [%]

Tab. 3.4.37: Mittlere jährliche und saisonale Abflüsse der Sionge@Vuippens (SioVui). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 8.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	839.5	233.6	243.6	175.2	190.7	mm
2040-2069	-7.0	13.3	0.4	-24.0	-19.1	%
2070-2099	-16.5	11.3	-1.9	-43.2	-36.8	%

Legende: -20 -10 -5 5 10 20 [%]

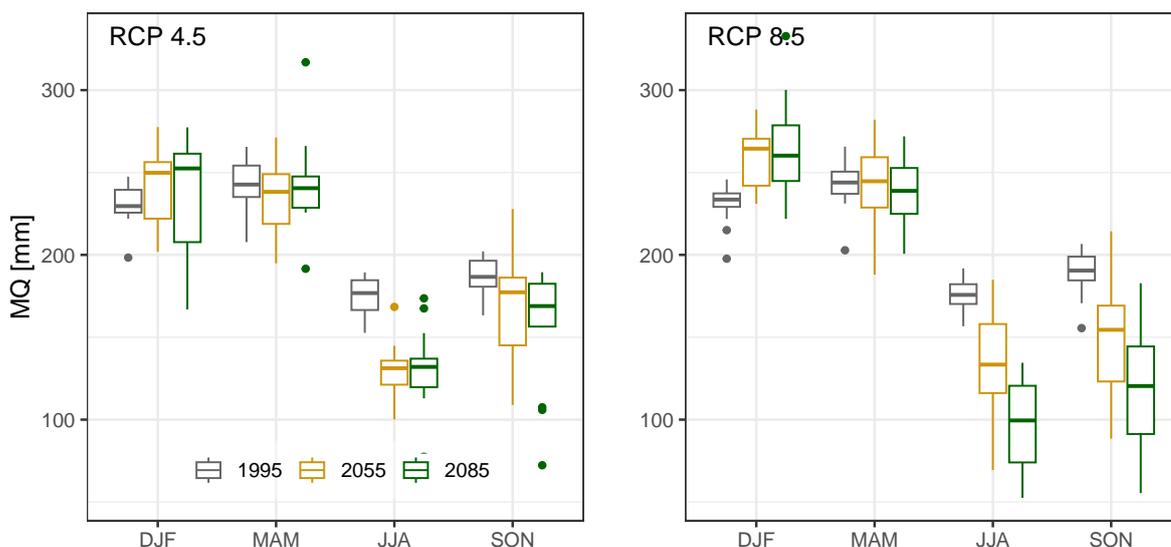


Abb. 3.53: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren saisonalen Abflüsse der Sionge in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

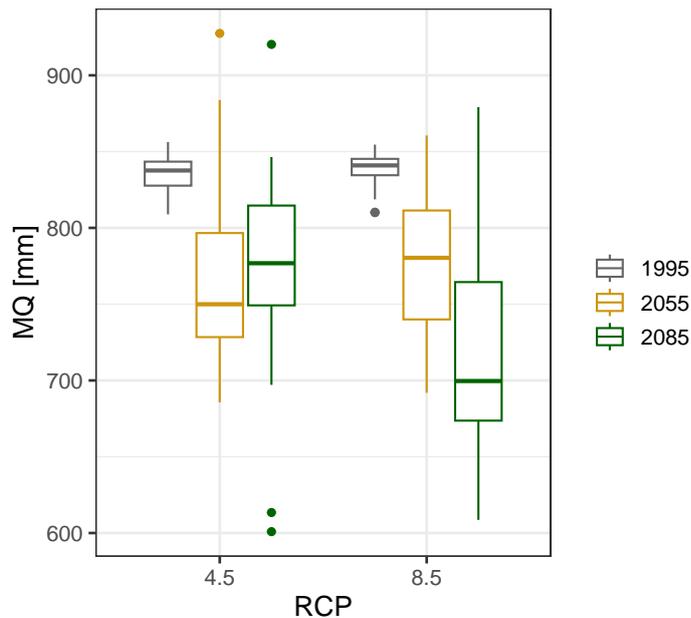


Abb. 3.54: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren Jahresabflüsse der Sionge in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

Die Abbildung 3.55 ordnet die modellierten relativen Veränderungen in den Kontext der Beobachtungen der Referenzperiode 1981–2010 ein. Sie visualisiert einerseits die Abweichungen zwischen den Medianwerten und positioniert andererseits die zukünftigen Medianwerte im Streubereich der einzeljährigen Werte der Referenzperiode.

Im Winter, Frühling und Herbst (ausser RCP 8.5, ferne Zukunft) liegen die zukünftigen Medianwerte im Streubereich der saisonalen Abflüsse der Einzeljahre der Referenzperiode. Im Sommer hingegen sind mindestens 75% der einzeljährigen Werte der Referenzperiode grösser als die zukünftigen Medianwerte. Schliesslich sind bedeutende Unterschiede zwischen den Emissionsszenarien erkennbar.

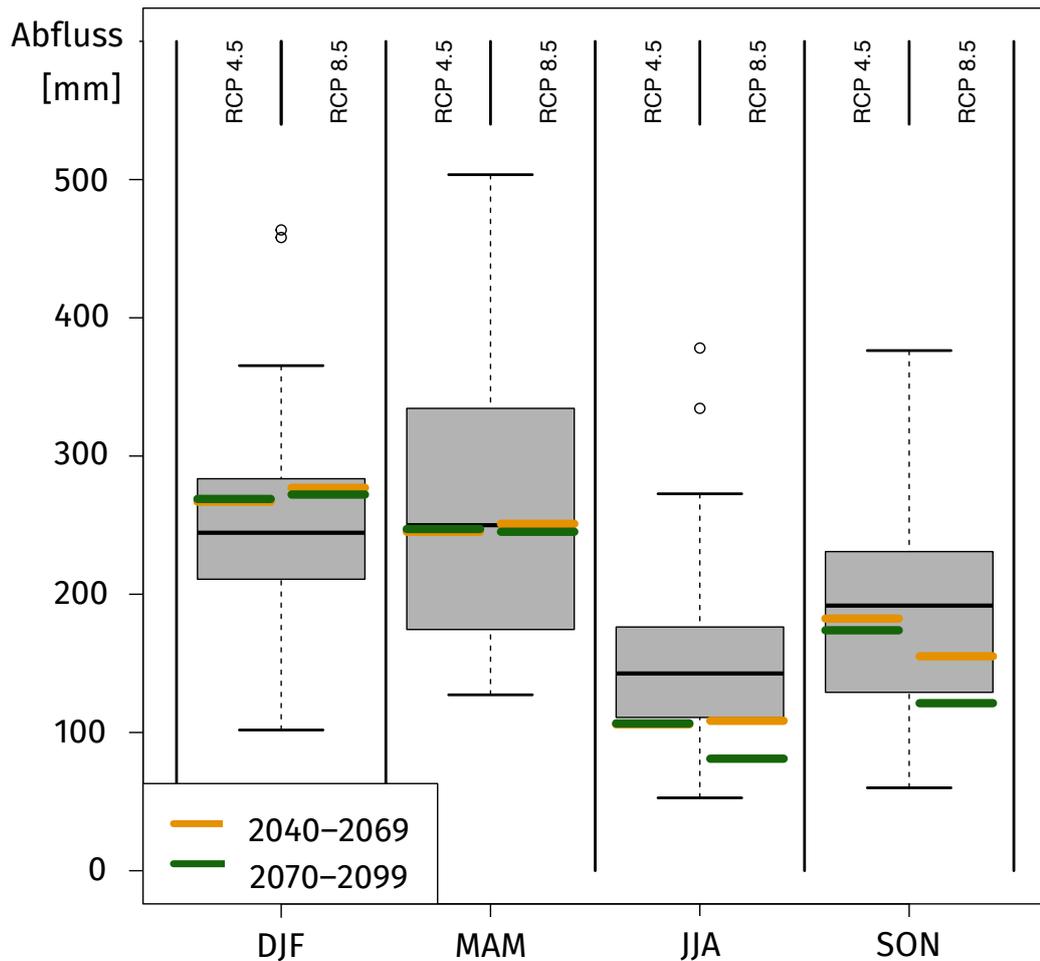


Abb. 3.55: Verteilung der saisonalen Abflüsse der Sionge in der Periode 1981–2010, abgeleitet aus den Beobachtungen des BAFU im Vergleich zu den mittleren Abflüssen in der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

### Veränderungen der mittleren aktuellen Verdunstung

Im Zuge der Klimaerwärmung erhöht sich die Verdunstung in allen Jahreszeiten, in beiden Zukunftsperioden und unter beiden Emissionsszenarien. Grosse bis sogar sehr grosse Zunahmen – zwischen 15 und 34 % – sind im Winter (DJF) und Frühjahr (MAM) zu erkennen, also in Saisons, in denen die Verdunstung eher klein ist. Die relative Zunahme von 34.4 % in der fernen Zukunft unter RCP 8.5 führt zu einer absoluten Verdunstungszunahme von 20 mm.

Im Sommer und Herbst liegen die Zunahmen der aktuellen Verdunstung unter 10 %. Dies ist insofern erstaunlich, als die Verdunstungszunahme in der höher gelegenen Nachbarregion Voralpen wesentlich grösser sind und Höchstwerte von über 20 % annehmen.

Tab. 3.4.38: Aktuelle Verdunstung im Einzugsgebiet der Sionge@Vuippens (SioVui) und relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 4.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	532.9	55.7	132.3	229.9	112.2	mm
2040-2069	5.5	14.8	8.3	4.4	1.6	%
2070-2099	8.9	16.4	12.4	6.7	5.7	%

Legende: -20 -10 -5 5 10 20 [%]

Tab. 3.4.39: Aktuelle Verdunstung im Einzugsgebiet der Sionge@Vuippens (SioVui) und relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 8.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	532.9	55.7	132.3	230.9	112.2	mm
2040-2069	8.9	18.0	12.4	5.9	7.3	%
2070-2099	13.7	34.4	24.1	6.7	7.3	%

Legende: -20 -10 -5 5 10 20 [%]

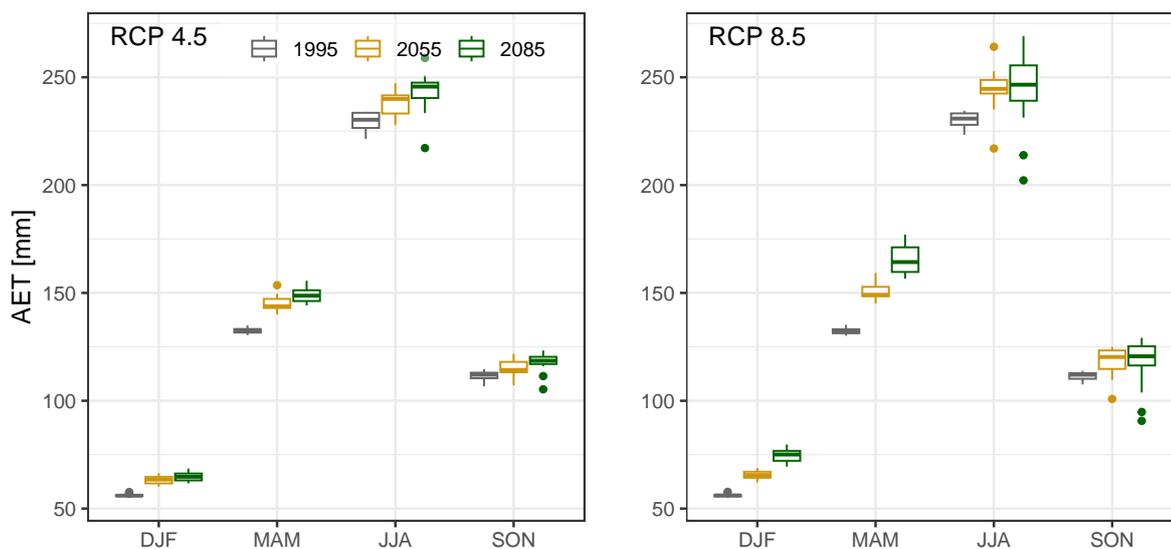


Abb. 3.56: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren saisonalen Verdunstungssummen für das Einzugsgebiet der Sionge in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

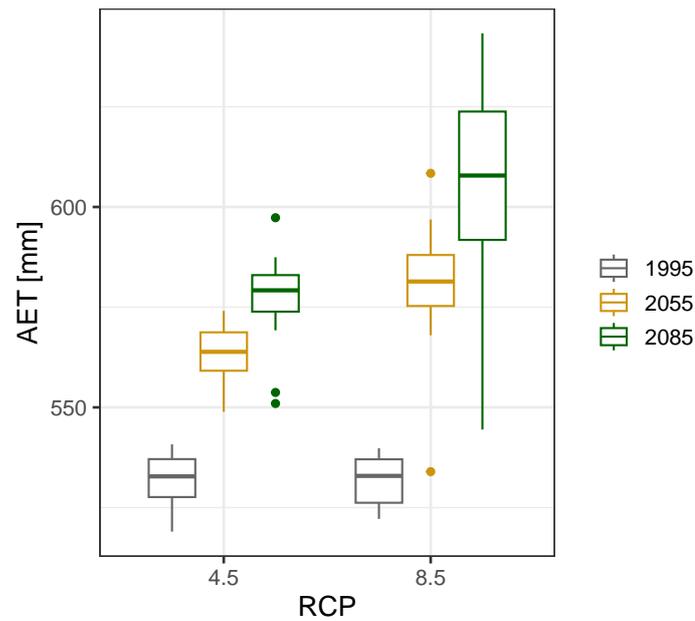


Abb. 3.57: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren Jahresverdunstung für das Einzugsgebiet der Sionge in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5.

### Veränderungen des Schnees

Wie aus den beiden Tabellen hervorgeht, beträgt der Schneeanteil am Gesamtabfluss in der Referenzperiode rund 7,6 %. Dieser Anteil ist rund 5 % kleiner als bei der Sense, welche ein typisches nivo-pluviales Regime aufweist (vgl. Kap. 3.4.5). Damit bestätigt sich, dass dies die Sionge im Übergangsbereich von einem nivo-pluvialen Regime zu einem Regime von Typ pluvial supérieur liegt. Wie die beiden Tabellen belegen, nimmt der Beitrag der Schneeschmelze zum Gesamtabfluss in der Zukunft ab und dies stärker unter RCP 8.5 in der fernen Zukunft. Die Schneeschmelze, welche bereits heute nur eine untergeordnete Rolle im Wasserhaushalt besitzt, wird in Zukunft kaum noch von Bedeutung sein.

Tab. 3.4.40: Rolle des Schnees im Einzugsgebiet der Sionge@Vuippens (SioVui). Modellierter mittlerer Anteil von Neuschnee am Niederschlag und modellierter mittlerer Schmelzwasseranteil am Gesamtabfluss ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 4.5. Die Werte beziehen sich auf ein Kalenderjahr.

	Psol/Ptot <sup>1</sup>	Qmelt/Qtot <sup>2</sup>	
1981-2010	11.7	7.6	%
2040-2069	8.3	6.2	%
2070-2099	7.0	5.6	%

<sup>1</sup> Anteil Schnee am Gesamtniederschlag

<sup>2</sup> Anteil Schneeschmelze am Gesamtabfluss

Tab. 3.4.41: Rolle des Schnees im Einzugsgebiet der Sionge@Vuippens (SioVui). Modellierter mittlerer Anteil von Neuschnee am Niederschlag und modellierter mittlerer Schmelzwasseranteil am Gesamtabfluss ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 8.5. Die Werte beziehen sich auf ein Kalenderjahr.

	Psol/Ptot <sup>1</sup>	Qmelt/Qtot <sup>2</sup>	
1981-2010	12.2	7.5	%
2040-2069	7.3	5.3	%
2070-2099	3.7	3.3	%

<sup>1</sup> Anteil Schnee am Gesamtniederschlag

<sup>2</sup> Anteil Schneeschmelze am Gesamtabfluss

### Wasserhaushaltliche Betrachtungen zu den Veränderungen

In diesem Kapitel betrachten wir die Veränderungen der Wasserhaushaltselemente in deren Zusammenspiel. Dazu werden die in den obigen Tabellen ausgewiesenen relativen Veränderungen von Niederschlag (N), Abfluss (A) und aktueller Verdunstung (V) den Beobachtungen der Referenzperiode 1981–2010 (siehe Tab. 3.4.32) aufgeprägt. Das Hauptziel ist es, die Veränderungen des Abflusses im Kontext der Veränderungen der anderen Wasserhaushaltselemente zu verstehen. Bei dieser Betrachtungsweise gilt:

$$\Delta A = \Delta N - \Delta V - \Delta Rg \quad (3.16)$$

Bei der Anwendung dieser Gleichung sind unbedingt die Vorzeichen zu beachten. So gilt beim Jahresabfluss unter RCP 4.5 in der mittleren Zukunft (um 2055, s. Abb. 3.58.) folgende Beziehung

$$-92 = -52 - 29 - 9 [mm] \quad (3.17)$$

Die Gleichung belegt, dass die Veränderung des Jahresabflusses (-92 mm) vor allem durch die Abnahme des Jahresniederschlags (-52 mm) und die Zunahme der Jahresverdunstung (29 mm) bedingt sind. In der fernen Zukunft unter RCP4.5 und generell unter RCP 8.5 ist die Zunahme der Verdunstung der Haupttreiber der Abflussabnahme. Mit anderen Worten: Sogar wenn der Niederschlag in Zukunft nicht abnehmen sollte, wird der Abfluss wegen der Klimaerwärmung, die zu hohen Verdunstungsraten führt, weiterhin abnehmen. Dies solange bis die aktuelle Verdunstung durch die fehlende Wasserverfügbarkeit im Boden limitiert wird.

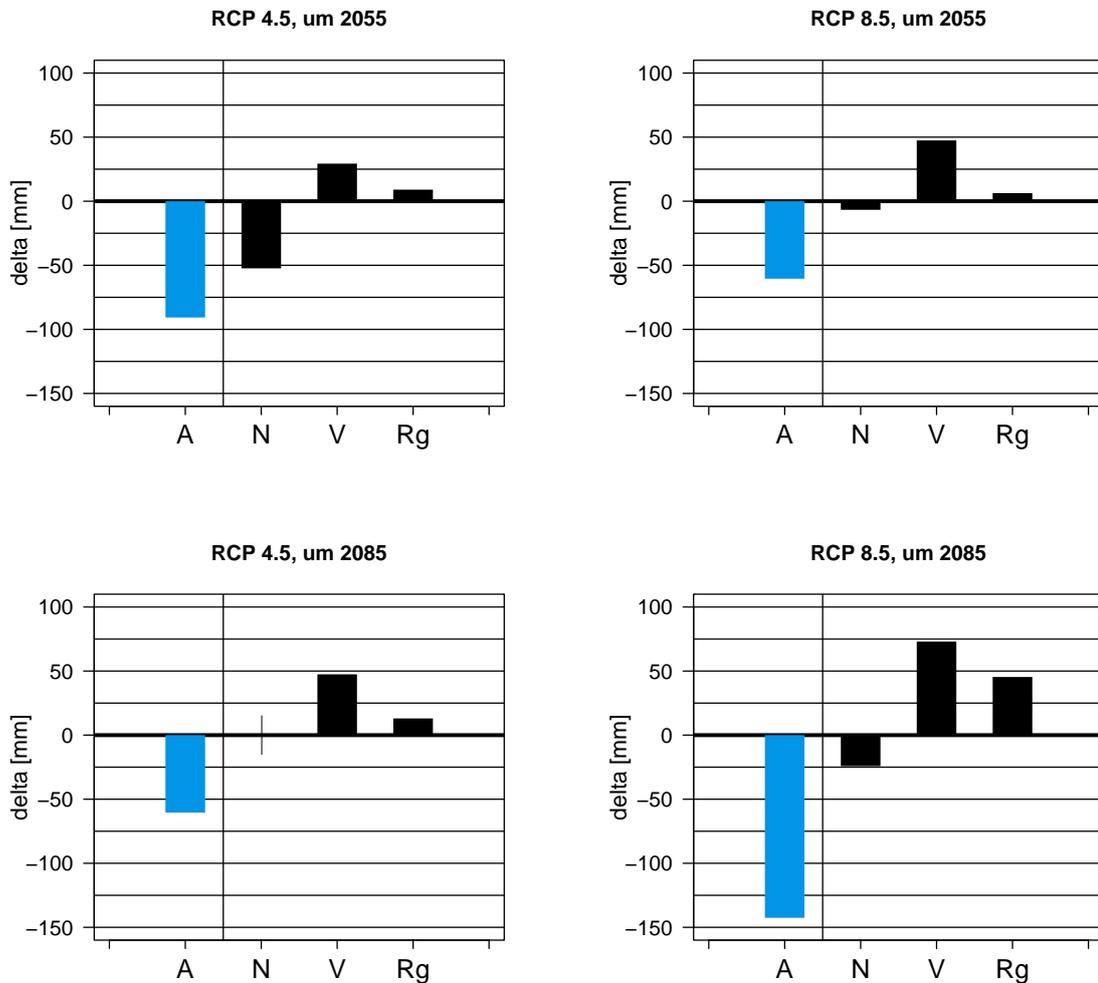


Abb. 3.58: Vergleich der Veränderungen der Jahresbilanz im Einzugsgebiet der Sionge@Vuippens. Die Säulen zeigen das Ausmass und das Vorzeichen der Veränderungen (Zu- oder Abnahmen) in mm/a. Die Grafik beschreibt zudem, welchen Beitrag die Veränderungen von Niederschlag (N), Verdunstung (V) sowie des Restglieds (Rg) zur Veränderung des Abflusses (A, blaue Säule) leisten. Es gilt  $dA = dN - dV - dRg$  (d: Veränderung in mm).

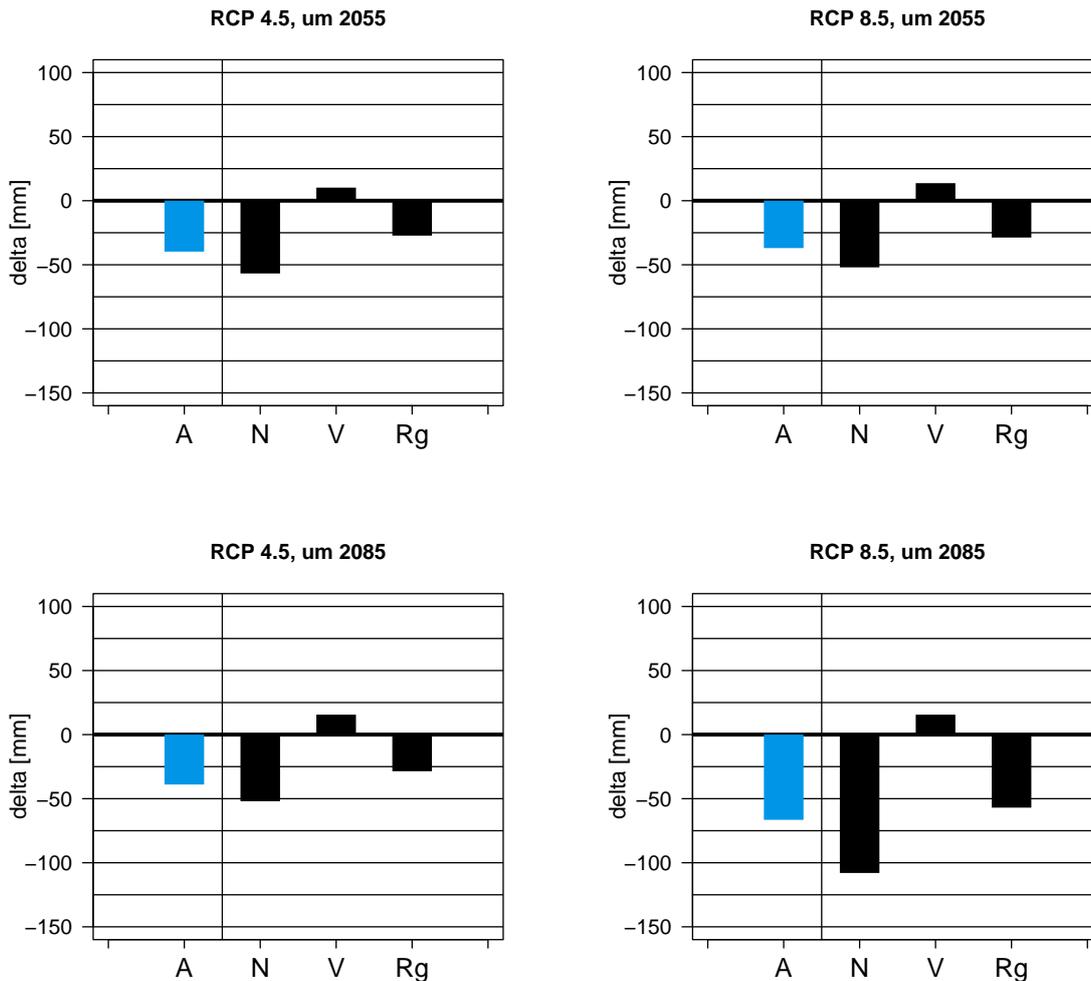


Abb. 3.59: Vergleich der Veränderungen der Wasserbilanz im Sommer (JJA) im Einzugsgebiet der Sionge@Vuippens. Die Säulen zeigen das Ausmass und das Vorzeichen der Veränderungen (Zu- oder Abnahmen) in mm/a. Die Grafik beschreibt zudem, welchen Beitrag die Veränderungen von Niederschlag (N), Verdunstung (V) sowie des Restglieds (Rg) zur Veränderung des Abflusses (A, blaue Säule) leisten. Es gilt  $dA = dN - dV - dRg$  (d: Veränderung in mm)

Aufgrund der Analysen der Wasserhaushaltselemente zeichnen sich vor allem grosse Veränderungen im Winter und im Sommer ab. Betrachten wir zuerst die Situation im Sommer, und zwar mit dem gleichen Diagramm wie beim Jahresabfluss (siehe Abb. 3.59). Dazu ist allerdings vorab zu erwähnen, dass auf saisonaler Basis nicht davon ausgegangen werden kann, dass das Speicherglied  $\Delta S$  gegen 0 geht. Die Grösse des Speicherglieds kann allerdings nicht quantifiziert werden und ist deshalb im Restglied (Rg) subsumiert, welches deshalb grösser ist als bei der Jahresbilanz. Für die Abflussabnahme im Sommer ist die Niederschlagsabnahme die wichtigste Grösse; sie wird aber durch die Verdunstung noch etwas verstärkt.

Diese Aussagen werden durch die Abbildungen 3.73 und 3.74 bestätigt (vgl. JJA), welche die Veränderungen des Niederschlags ( $\Delta PR$ ) den Veränderungen des Abflusses ( $\Delta Q$ ) gegenüberstellt. Man erkennt die überproportionale Abnahme des Abflusses im Vergleich zum Niederschlag. Die Medianwerte liegen unter der Winkelhalbierenden, was den Einfluss der zunehmenden aktuellen Verdunstung verdeutlicht.

Im Winter (DJF) hingegen liegen die Werte bei beiden Emissionsszenarien im Bereich der Winkelhalbierenden. Das bedeutet, dass die Abflusszunahmen eng mit den Zunahmen des Niederschlags verbunden sind.

Die Streuung der Werte der einzelnen Modellketten um den Median zeigen, wie gut die einzelnen Modellketten den Medianwert repräsentieren (vgl. Abb. 3.60 und 3.61). Nehmen wir dazu das Beispiel der Modellierung unter RCP 4.5. Im Sommer sind sich die Modellketten weitestgehend über das Vorzeichen der Veränderungen einig, führen aber zu unterschiedlichen Aussagen bezüglich des Ausmasses der Veränderungen. Im Winter ist die Situation nicht derart eindeutig. So gehen einzelne Modellketten von einer Zunahme des Niederschlags und des Abflusses aus, andere von einer Abnahme. Trotzdem scharen sich die meisten Modellketten relativ nahe um die Medianwerte. Bei Unsicherheitsüberlegungen sind diese Streuungen der Modellketten miteinzubeziehen. In der vorliegenden Arbeit werden sie durch die Diagramme mit den Boxplots dargestellt.

Gemäss dem Budyko-Diagramm (unten links) ist der Wasserhaushalt in der Region PlaSud im Sommer in der Referenzperiode energielimitiert. Diese Energielimitierung bleibt unter RCP 4.5 auch in Zukunft im Mittel knapp erhalten, wie die Mediane für die mittlere und ferne Zukunft unterstreichen. Bei einigen Modellketten ist allerdings schon ein Übergang in den wasserlimitierten Bereich erkennbar. Unter RCP 8.5 ist die Situation in der mittleren Zukunft noch knapp energielimitiert, in der fernen Zukunft dann aber bereits deutlich wasserlimitiert. Dies ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass das Wasser im Sommer knapp werden könnte.

Die Ordinate des Budyko-Diagramms beschreibt, welchen Anteil die Verdunstung am Gesamtniederschlag hat. In der Referenzperiode liegt dieser Anteil bei ca. 60%; die Verdunstung ist demnach die wichtigere Komponente im Wasserhaushalt. Mit zunehmender Klimaerwärmung nimmt der Anteil der Verdunstung an der Wasserbilanz weiter zu.

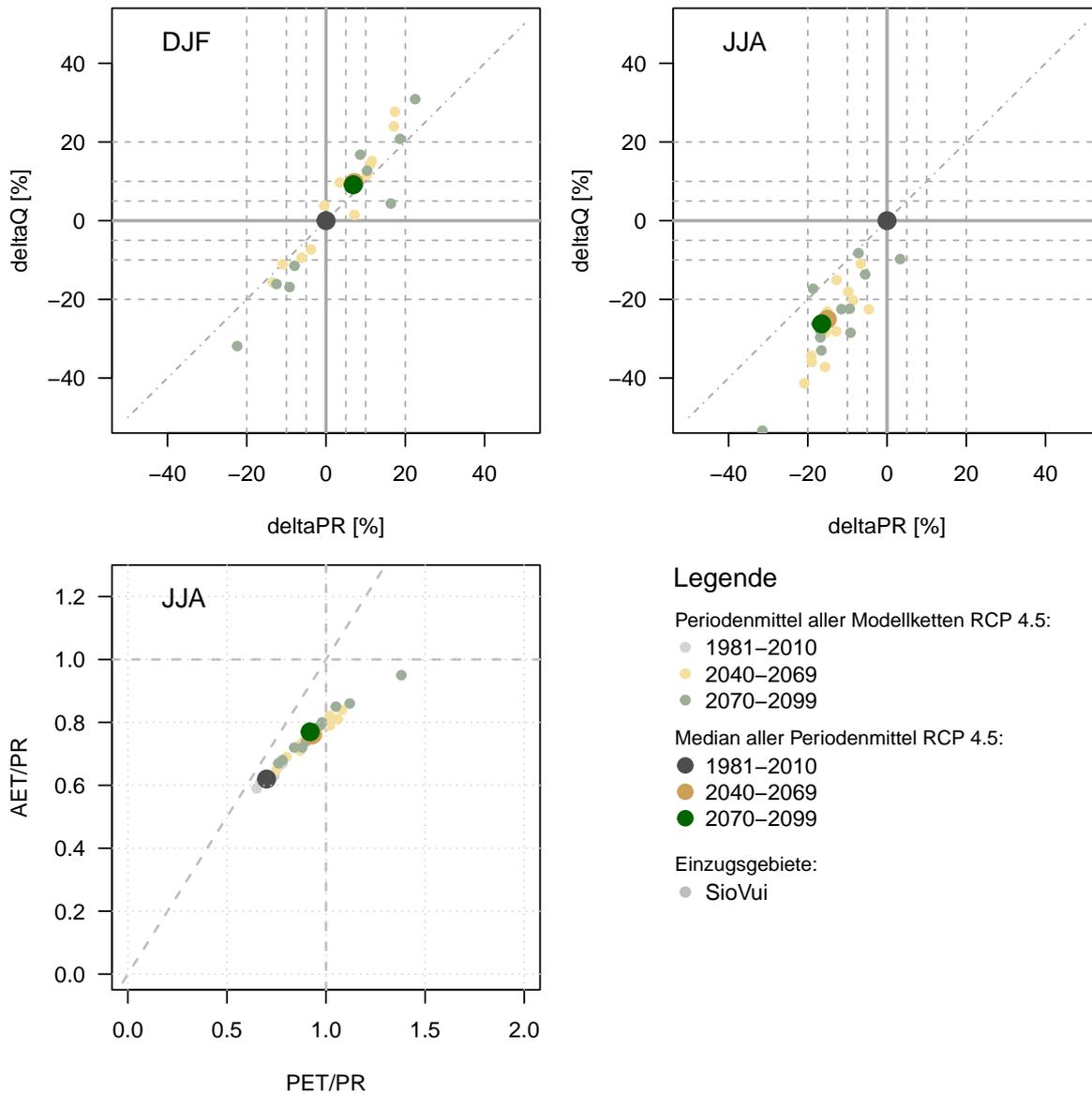


Abb. 3.60: Diagramme zum Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Sionge@Vuippens im Winter (DJF) und Sommer (JJA) unter RCP4.5. Die oberen zwei Diagramme zeigen die relative Veränderung von Niederschlag (deltaPR) und Abfluss (deltaQ). Das Budyko-Diagramm wird im Methodenteil eingeführt und beschrieben. Die drei Diagramme zeigen die Streuung der Periodenmittel aller verwendeten Modellketten sowie den Medianwert dieser Periodenmittel.

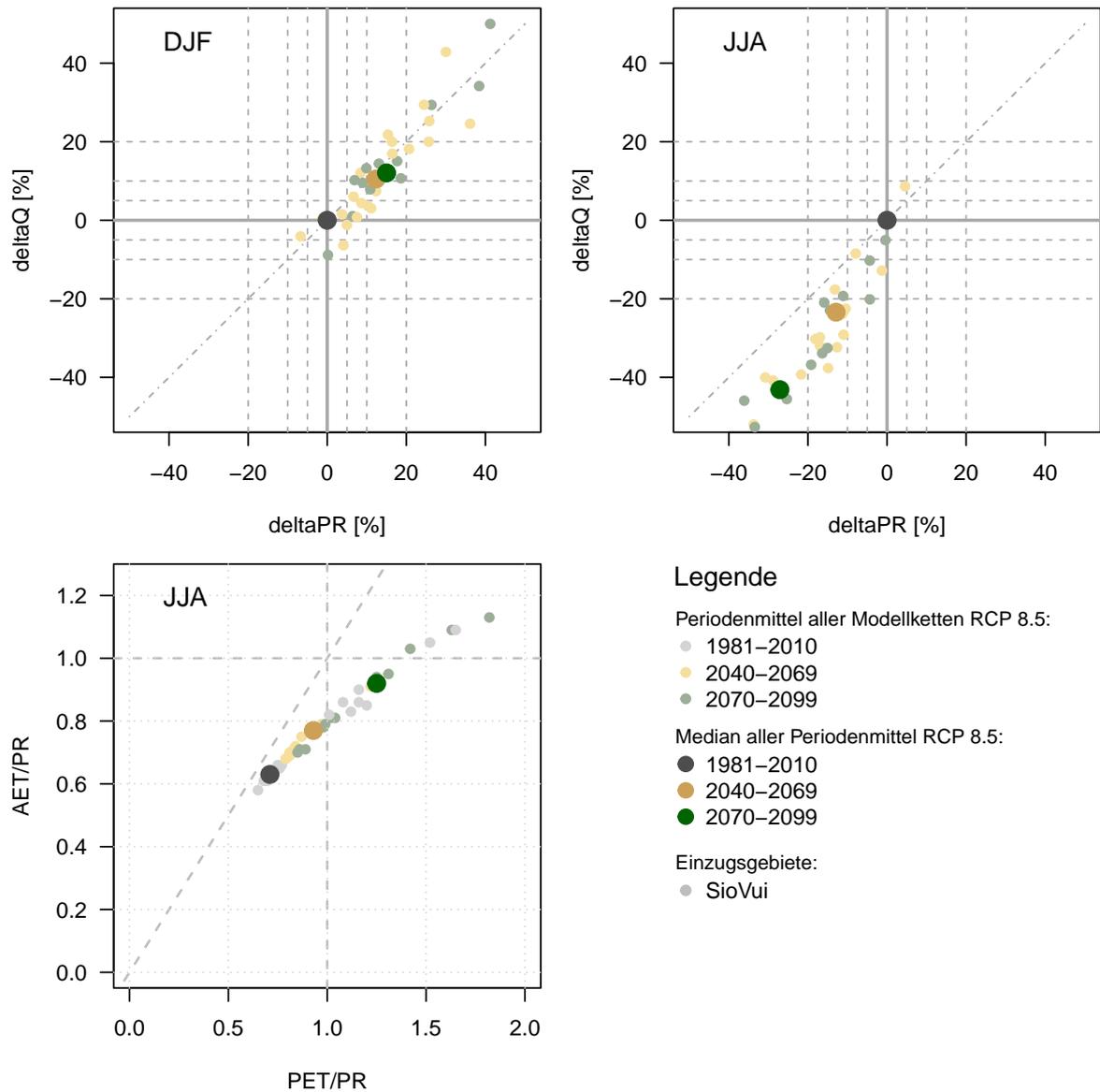


Abb. 3.61: Diagramme zum Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Sionge@Vuippens unter RCP 8.5

### Zukünftige Veränderungen kleinsten und grössten Tagesabflüsse

Es muss nochmals deutlich darauf hingewiesen werden, dass wir hier sehr kleine und sehr grosse Tagesabflüsse analysieren. Bei den sehr grossen Tagesabflüssen handelt es sich nicht um Hochwasser bzw. Hochwasserspitzen im engeren Sinne des Wortes. Solche Hochwasser laufen im Stundenbereich ab und sind mit den hier verwendeten Tageswerten nicht erfassbar. Hingegen werden die kleinsten Abflüsse in der Tagesauflösung gut erfasst, weil die Schwankungen im Niedrigwasserbereich sehr träge ablaufen. Die kleinsten

und grössten Tagesabflüsse werden durch sogenannte Quantile (q) beschrieben. Das Abflussquantil (Qq10) beispielsweise gibt jenen Abfluss (Q) an, der im Mittel an 10 % der Tage – also an 37 Tagen des Jahres – erreicht oder unterschritten wird.

Tab. 3.4.42: Kleinste und grösste Abflüsse der Sionge@Vuippens (SioVui). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP4.5

	Qq01	Qq05	Qq10	Qq90	Qq95	Qq99	
1981-2010	0.3	0.4	0.5	4.9	7.3	13.7	mm/d
1981-2010	0.2	0.2	0.2	2.6	3.8	7.2	m <sup>3</sup> /s
1981-2010	3.5	4.5	5.6	57.1	84.4	158.0	l/s/km <sup>2</sup>
2040-2069	-25.8	-24.4	-25.0	-7.6	-4.5	0.0	%
2070-2099	-25.8	-26.8	-25.0	-7.2	-3.8	-4.6	%

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 3.4.43: Kleinste und grösste Abflüsse der Sionge@Vuippens (SioVui). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP8.5

	Qq01	Qq05	Qq10	Qq90	Qq95	Qq99	
1981-2010	0.3	0.4	0.5	5.0	7.3	13.9	mm/d
1981-2010	0.1	0.2	0.2	2.6	3.8	7.3	m <sup>3</sup> /s
1981-2010	3.4	4.5	5.6	57.3	84.3	160.8	l/s/km <sup>2</sup>
2040-2069	-27.1	-27.0	-27.1	-4.1	-2.6	0.7	%
2070-2099	-50.0	-53.4	-51.1	-10.7	-6.2	-4.2	%

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Die deutlichen Unterschiede in den Veränderungen – fast alles Abnahmen – zwischen den kleinsten und den grössten Tagesabflüssen fallen beim Betrachten der beiden Tabellen sofort auf: Sämtliche kleinsten Tagesabflüsse nehmen in einem sehr grossen Umfang ab, unter RCP4.5 um -25 % in beiden Zukunftsperioden, unter RCP8.5 in der mittleren Zukunft um rund -27% und in der fernen Zukunft um -50 % und mehr. Die Niedrigwassersituation der Sionge verändert sich markant!

Hingegen sind die Abnahmen bei den grössten Tagesabflüssen meist klein. Der grösste Tagesabfluss Qq99 nimmt weniger stark ab als die anderen grossen Tagesabflüsse.

### 3.4.5 Region Voralpen, région Préalpes (PreAlp)

#### Ausgangslage

Die Region Voralpen wird durch das Einzugsgebiet der Sense@Thörishaus repräsentiert, das folgende Charakteristiken aufweist:

- Fläche: 351 km<sup>2</sup>
- Höhenverhältnisse:
  - minimale Höhe: 555 m ü.M.
  - mittlere Höhe: 1070 m ü.M.
  - maximale Höhe: 2184 m ü.M.

Die Region Voralpen ist die höchstgelegene im Kanton Freiburg. Entsprechend unterschiedlich setzt sich die Landnutzung zusammen. Der Flächenanteil von Ackerland, Grünland und Wald beträgt je rund 30 %.

Die hydrologischen Kennwerte werden in der Regel in der Dimension Millimeter ausgegeben. Bezogen auf das Einzugsgebiet der Sense gilt: 1 mm  $\hat{=}$  351'000 m<sup>3</sup>.

#### Herleitung der Wasserbilanz

Nach Angaben des BAFU ist die hydrogeologische Situation im Einzugsgebiet der Sense wie folgt zu beurteilen<sup>16</sup>: «Das Einzugsgebiet erstreckt sich von der Klippen-Decke bis zur mittelländischen Molasse, wobei der Gurnigel-Flysch und die subalpine Molasse durchflossen werden. In den teilweise leicht verkarsteten Gesteinen der Klippen-Decke ist die Wasserscheide lokal nicht mit Sicherheit festzulegen. Stellenweise ist im Kiesbett der Sense eine erhöhte Durchlässigkeit zu erwarten. Verluste sind auch via die Kiese möglich, die zwischen Plaffeien und Plasselb einen ehemaligen Senselauf in Richtung Saane auffüllen. Ausserhalb dieses Bereichs haben die Gesteine im Untergrund eine unterschiedliche, z.T. sehr geringe Durchlässigkeit. In Anbetracht der Ausdehnung des Einzugsgebietes spielen die hydrogeologischen Unsicherheiten keine bedeutende Rolle.»

Was bedeutet diese hydrogeologische Charakterisierung nun in Bezug auf die Jahreswasserbilanz? Aus der Sicht der Geschlossenheit der Wasserbilanz ist der Hinweis wichtig, dass Verluste möglich seien und dass Wasser unterirdisch aus dem Einzugsgebiet abflüsse. Ein Blick auf die Wasserbilanz in Tabelle 3.4.44 bestätigt dies. Die Wasserbilanz ist in sich nur schlüssig, wenn man einen unterirdischen Abflussterm einführt.

---

<sup>16</sup>Schädler, B. und R. Bigler (1995): Wasserhaushalt der hydrologischen Untersuchungsgebiete der Schweiz. Hydrologische Mitteilungen, Nr.21, Bern

$$N = A_o + A_u + V \quad (3.18)$$

mit:

- N: Niederschlag
- A<sub>o</sub>: Oberirdische Abfluss
- A<sub>u</sub>: Unterirdischer Abfluss
- V: Verdunstung

Wie der Wert von 155 mm pro Jahr belegt, ist der unterirdische Abfluss beträchtlich.

Tab. 3.4.44: Vergleich der beobachteten und modellierten mittleren Jahreswasserbilanz der Sense. N: Niederschlag, A<sub>o</sub>: oberirdischer Abfluss, A<sub>u</sub>: unterirdischer Abfluss, V: Verdunstung. obs: Beobachtungen. Niederschlag aus RhiresD und Abfluss aus Messungen des BAFU abgeleitet, Verdunstung wird aus Modelldaten übernommen, A<sub>u</sub>: als Restglied der Wasserbilanz berechnet, mod: modellierte Werte

	Periode	mm/a				%			
		N	A <sub>o</sub>	A <sub>u</sub>	V	N	A <sub>o</sub>	A <sub>u</sub>	V
obs	1981–2010	1455	794	155	506	100	55	11	34
mod	1981–2010	1474	828	151	506	100	56	10	34

Wir gehen davon aus, dass die-Jahr-zu-Jahr-Schwankungen des Speicherglieds  $\Delta S$ , welches im Fall der Sense im Wesentlichen dem Grundwasser entspricht, vernachlässigt klein ist und daher nicht explizit berücksichtigt werden muss. Um die Bilanzbetrachtungen überhaupt durchführen zu können, mussten wir auf einen modellierten Verdunstungswert zurückgreifen. Ein Vergleich der mit GR4J errechneten Jahresverdunstung von 506 mm mit jener aus dem Hydrologischen Atlas von 511 mm (Periode 1973–1992) zeigt, dass dieser Wert sehr vertrauenswürdig ist.

Die saisonale Charakteristiken der Wasserbilanz basierend auf Beobachtungsdaten veranschaulicht Abbildung 3.62: Der Niederschlag ist mit rund 450 mm im Sommer (JJA) am grössten. Die Niederschläge im Frühling (MAM) und im Herbst (SON) sind rund 100 mm kleiner, während der Niederschlag im Winter (DJF) bei rund 300 mm liegt. Der grösste Abfluss hingegen tritt im Frühling auf. Hier zeigt sich der Einfluss des Schnees bzw. der Schneeschmelze im nivo-pluvial geprägten Einzugsgebiet<sup>17</sup>. Der mittlere Sommerabfluss ist mit 200 mm relativ gross. Schliesslich erkennen wir bei der Verdunstung die durch den Strahlungshaushalt geprägte Saisonalität mit kleinen Werten im Winterhalbjahr und grossen Werten im Sommerhalbjahr.

<sup>17</sup><https://hydrologischeratlas.ch/produkte/druckausgabe/fliessgewasser-und-seen/tafel-5-2>

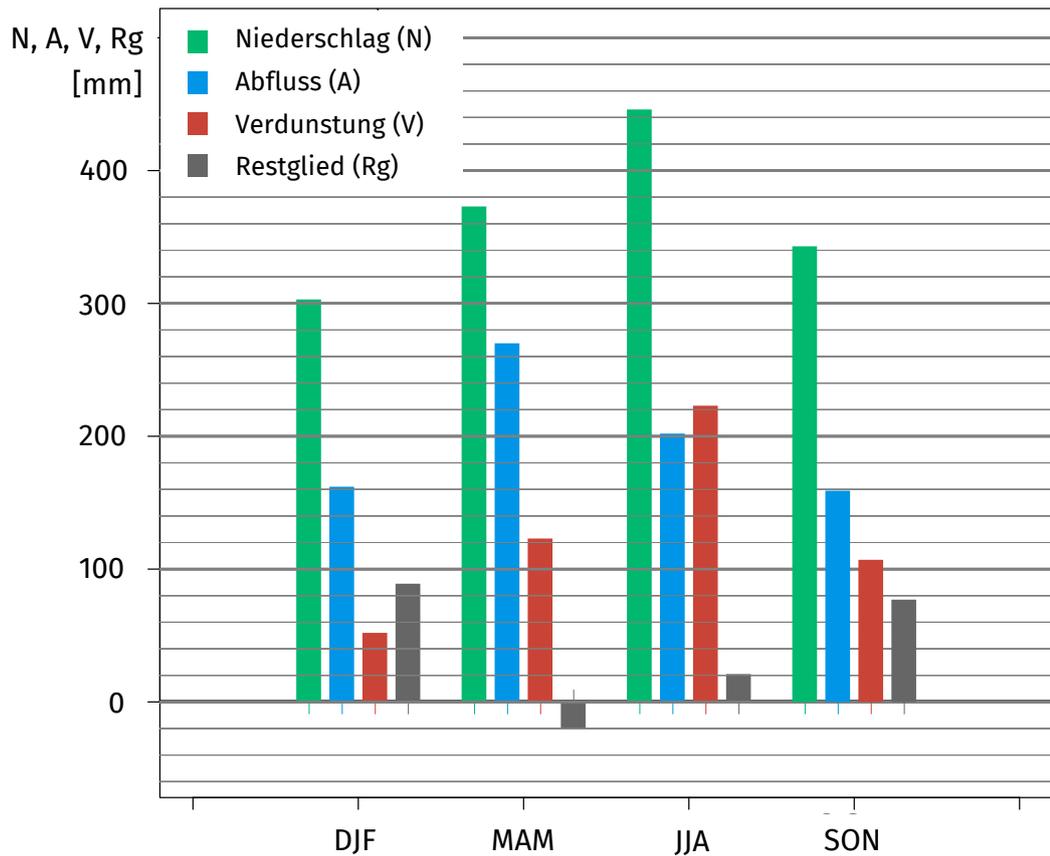


Abb. 3.62: Mittlere saisonale Wasserbilanz der Sense in der Periode 1981–2010, basierend auf den Beobachtungsdaten

### Beurteilung der Güte der Modellierungen

Im Folgenden wird die Güte des Modells GR4J aus verschiedenen Blickwinkeln beurteilt.

1. Das Modell reproduziert die beobachtete Jahreswasserbilanz als Ganzes sehr gut (vgl. Tab. 3.4.44).
2. Die folgende Tabelle stellt dar, wie gut GR4J den Niederschlag (P) und den oberirdischen Abfluss (MQ) in der Referenzperiode 1981–2010 auf jährlicher und saisonaler Basis wiedergeben. Dabei wird zwischen den beiden Emissionsszenarien unterschieden. Der Niederschlag wird durchwegs sehr gut reproduziert. Dies gilt auch für den Jahresabfluss. Im Winter (DJF) und Frühling (MAM) ist die Modellgüte beim Abfluss gut bis sehr gut, in den beiden anderen Jahreszeiten ausreichend.

Tab. 3.4.45: Vergleich der beobachteten und modellierten saisonalen Werte des Niederschlags (P) und des oberirdischen Abflusses (MQ) der Sense in der Periode 1981–2010 für die beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

		RCP 4.5		RCP 8.5	
		P	MQ	P	MQ
Y	CH2018	1469	826	1472	828
Y	OBS	1466	794	1466	794
Y	$\Delta$ mm	3	32	6	34
Y	$\Delta\%$	0	4	0	4
DJF	CH2018	303	167	304	170
DJF	OBS	303	162	303	162
DJF	$\Delta$ mm	0	5	1	8
DJF	$\Delta\%$	0	3	0	5
MAM	CH2018	372	255	375	253
MAM	OBS	373	270	373	270
MAM	$\Delta$ mm	-1	-15	2	-17
MAM	$\Delta\%$	0	-6	0	-6
JJA	CH2018	454	230	453	231
JJA	OBS	446	202	446	202
JJA	$\Delta$ mm	8	28	7	29
JJA	$\Delta\%$	2	14	2	14
SON	CH2018	339	177	342	178
SON	OBS	343	159	343	159
SON	$\Delta$ mm	-4	18	-1	19
SON	$\Delta\%$	-1	11	0	12

3. Muelchi et al. (2021)<sup>18</sup>. führten im Rahmen des CH2018 Projekts in ausgewählten Einzugsgebieten der Schweiz ebenfalls hydrologische Modellierungen vor dem Hintergrund der Klimaerwärmung durch. Die Ergebnisse sind im Hydrologischen Atlas veröffentlicht<sup>19</sup>. Als Eingangsdaten verwendeten auch sie CH2018-Modellketten, welche allerdings mit den hier verwendeten nicht ganz übereinstimmen. Ebenfalls nicht identisch ist die Zeitperiode der mittleren Zukunft: Muelchi et al.: 2045–2074; Studie Freiburg: 2040–2069. Trotz dieser Vorbehalte ist der Vergleich der beiden Modellierungen interessant, weil Muelchi et al. mit dem Modell PREVAH<sup>20</sup> ein hydrologisches Modell verwendeten, das komplexer ist als GR4J.

<sup>18</sup>Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R. und Martius, O. (2021). River runoff in Switzerland in a changing climate–runoff regime changes and their time of emergence. In: Hydrology and Earth System Sciences 25,6, S. 3071–3086. DOI: 10.5194/hess-25-3071-2021

<sup>19</sup><https://hydromapscc.ch/>

<sup>20</sup>Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J. und Weingartner, R. (2009). An introduction to the hydrological modelling system PREVAH. In: Environmental Modelling and Software 24,10. DOI: 10.1016/j.envsoft.2009

Der Modellvergleich in Abb. 3.63 belegt, dass die Ergebnisse der beiden unabhängigen Modellierungen sehr gut übereinstimmen.

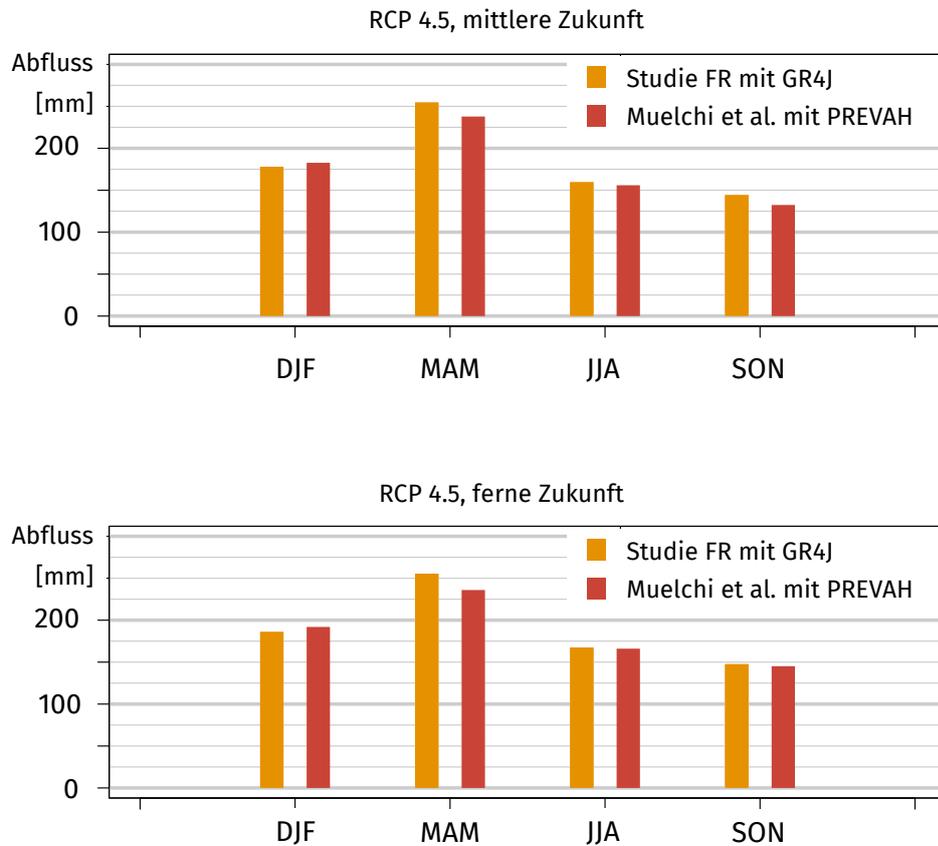


Abb. 3.63: Vergleich der mittleren saisonalen Abflüsse der Sense, modelliert mit unterschiedlichen Modellen und ähnlichen Inputdaten unter RCP 4.5

**Fazit:** Insgesamt verdeutlichen die verschiedenen Validierungen, dass das Modell GR4J in der Lage ist, die hydrologischen Bedingungen der Sense so zu erfassen, dass es für die Analyse der zukünftigen Veränderungen eingesetzt werden kann.

### Veränderungen des mittleren Niederschlags

Die Tabellen 3.4.46 und 3.4.47 beschreiben die relativen Veränderungen der mittleren Niederschläge, während die beiden Abbildungen 3.64 und 3.65 einerseits die absoluten Veränderungen aufzeigen und andererseits auf die Streuung der Modellketten und damit auf die Modellunsicherheit hinweisen. Beim Jahresniederschlag liegen die Veränderungen alle unter  $\pm 5\%$ , d. h., der mittlere Jahresniederschlag verändert sich in Zukunft

kaum. Aufgrund der grossen Ausgangswerte führen allerdings die kleinen relativen Veränderungen zu grossen absoluten Veränderungen.

Saisonal gesehen nehmen die Niederschläge im Winter und Frühling zu. Diese Zunahmen verstärken sich gegen Ende des Jahrhunderts. Im Sommer nehmen die Niederschläge durchwegs ab. Unter RCP 4.5 sind die Veränderungen zwischen der mittleren und fernen Zukunft allerdings gering. Hingegen zeigt das Szenario RCP 8.5 ein starkes Signal der Abnahme und entsprechend grosse Unterschiede zwischen der mittleren und fernen Zukunft. Schliesslich besteht bei den Veränderungen im Herbst ein undifferenziertes Bild.

Tab. 3.4.46: Mittlere jährliche und saisonale Niederschläge der Sense@Thörishaus. Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 4.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	1467.3	304.8	372.3	453.5	343.1	mm
2040-2069	-3.2	4.8	2.2	-11.9	-2.1	%
2070-2099	0.2	8.1	4.9	-9.7	1.3	%

Legende: ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 3.4.47: Mittlere jährliche und saisonale Niederschläge der Sense@Thörishaus. Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 8.5

Periode	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Einheit
1981-2010	1471.0	303.9	375.0	452.6	341.3	mm
2040-2069	0.5	11.1	6.8	-7.5	1.6	%
2070-2099	-2.0	12.0	7.3	-24.4	-6.1	%

Legende: ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

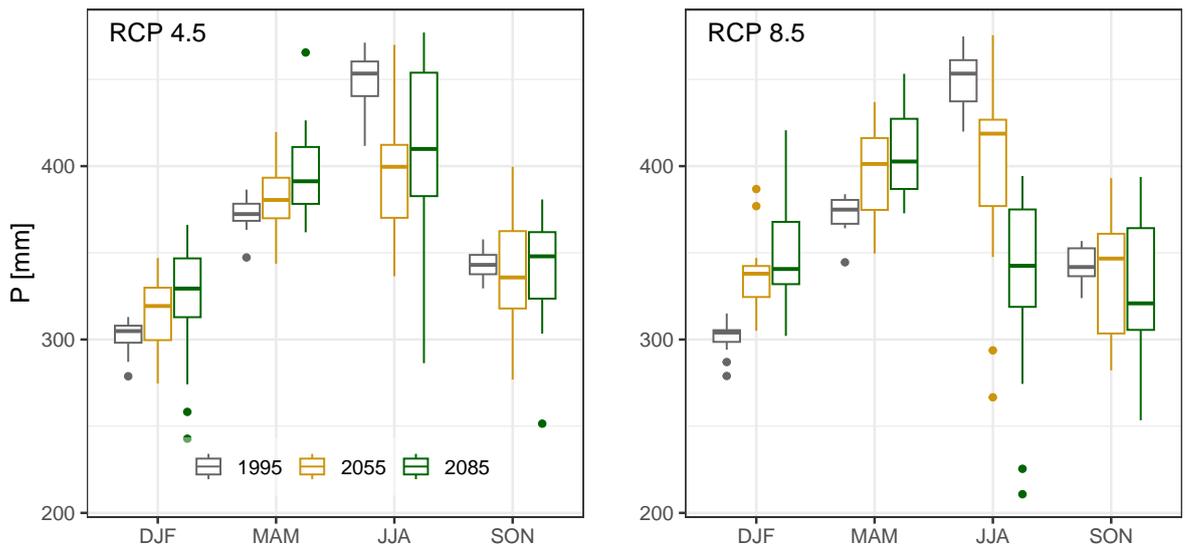


Abb. 3.64: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren saisonalen Niederschlagssummen für das Einzugsgebiet der Sense in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

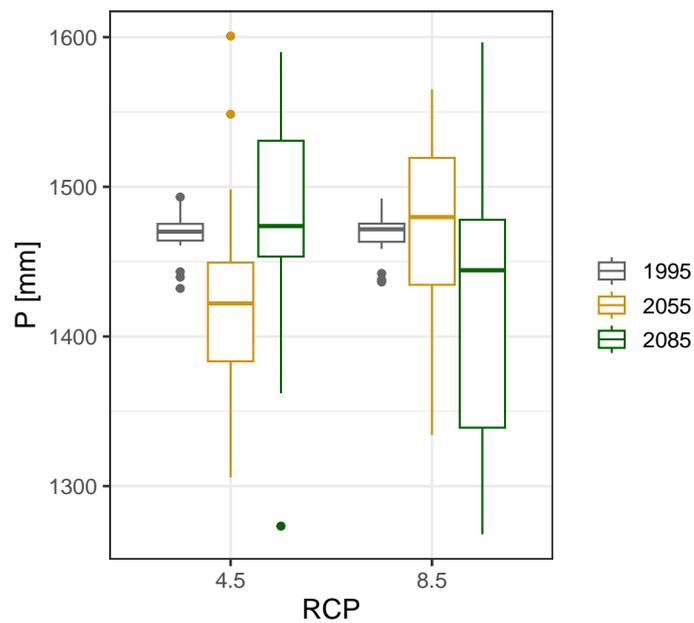


Abb. 3.65: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren Jahresniederschlags für das Einzugsgebiet der Sense in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

## Veränderungen der mittleren Abflüsse

Die Veränderungen der Abflussverhältnisse sind in der Region PreAlp ausgeprägt. Es sind klare Veränderungsmuster erkennbar (vgl. Tab. 3.4.48 und Tab. 3.4.49 sowie Abb. 3.66 und Abb. 3.67).

Die mittleren saisonalen Abflüsse nehmen – ausser im Winter – in allen Saisons ab. Diese saisonalen Abnahmen haben eine Abnahme des mittleren Jahresabflusses im Bereich von -5 bis -15 % zur Folge. In der fernen Zukunft nimmt der Jahresabfluss unter RCP 8.5 signifikant stärker ab als unter RCP 4.5. Eine relativen Abnahme von rund -15 % entspricht einer absoluten Abnahme von rund 120 mm.

Auffallend ist die gegensätzliche Entwicklung der mittleren Winter- und Sommerabflüsse: im Winter nehmen die Abflüsse bis zu 20 % zu, wobei die Unterschiede zwischen den beiden Emissionsszenarien in der fernen Zukunft sehr klein sind. Im Sommer beträgt die Abnahme des Abflusses unter RCP 4.5 bis rund -20 %, unter RCP 8.5 sogar bis rund -40 %. Auch im Herbst sind Abnahmen vorhanden, unter RCP 4.5 vor allem zwischen der Referenzperiode und der mittleren Zukunft, unter RCP 8.5 verstärkt sich die Abnahme von der mittleren bis zur fernen Zukunft.

Tab. 3.4.48: Mittlere jährliche und saisonale Abflüsse der Sense@Thörishaus. Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 4.5

	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	
1981-2010	824.9	167.0	255.5	229.9	177.0	mm
2040-2069	-8.8	9.8	-5.7	-21.0	-9.3	%
2070-2099	-5.8	14.8	-5.4	-17.1	-7.2	%

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 3.4.49: Mittlere jährliche und saisonale Abflüsse der Sense@Thörishaus. Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 8.5

	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	
1981-2010	828.5	169.7	252.8	230.9	177.9	mm
2040-2069	-6.6	18.8	-2.2	-20.6	-15.4	%
2070-2099	-15.4	13.4	-6.1	-38.7	-35.9	%

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

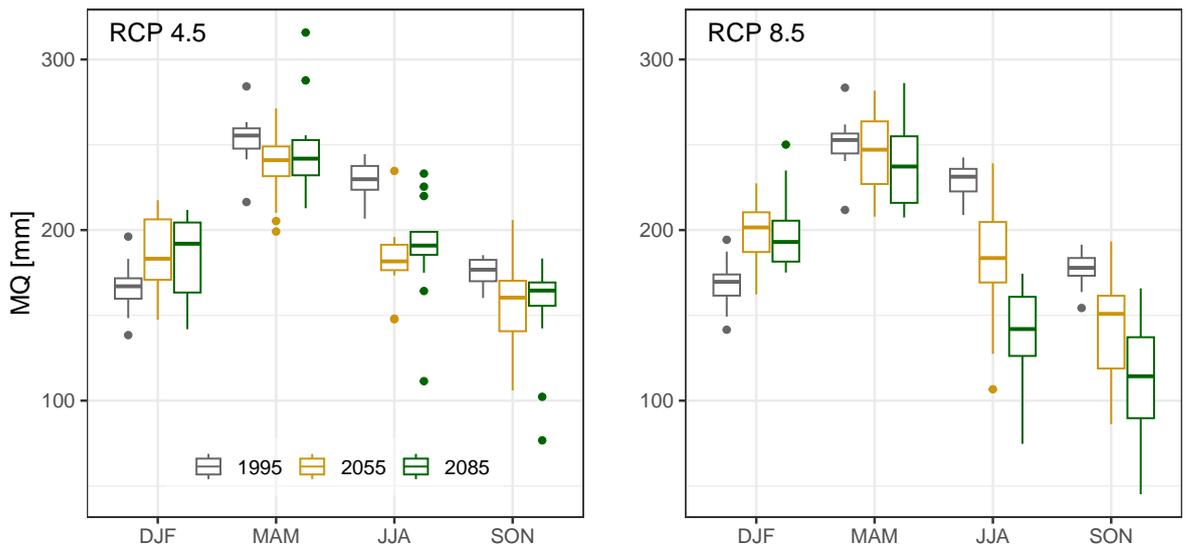


Abb. 3.66: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren saisonalen Abflüsse der Sense in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4,5 und RCP 8,5

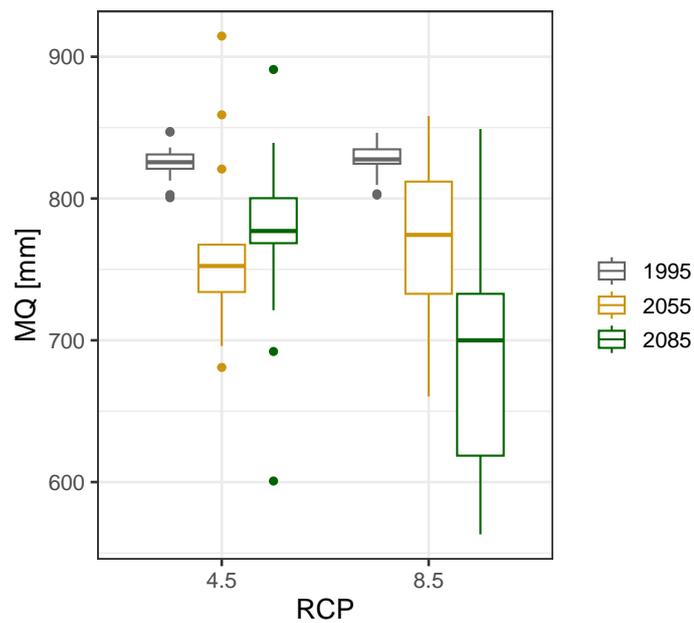


Abb. 3.67: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren Jahresabflüsse der Sense in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4,5 und RCP 8,5

Die Abbildung 3.68 visualisiert einerseits die Abweichungen zwischen den Medianwerten und positioniert andererseits die zukünftigen Medianwerte im Streubereich der einzeljährigen Werte der Referenzperiode 1981–2010. Im Winter (DJF) liegen die zukünftigen Mediane oberhalb der Box, was bedeutet, dass die einzeljährigen Werte der Referenzperiode mehrheitlich kleiner sind als der zukünftige Medianwert. Im Frühling (MAM) sind die absoluten Veränderungen klein. Im Sommer (JJA) sind die zukünftigen Mediane kleiner als mindestens 75 % der Werte der Einzeljahre der Referenzperiode.

Im Weiteren ist die extreme Abnahme des Abflusses im Sommer und Herbst in der fernen Zukunft unter RCP 8.5 ersichtlich. Um diese sehr kleinen medianen Abflüsse werden die einzeljährigen Werte streuen. In einzelnen Jahren sind deshalb kleine Abflüsse zu erwarten.

In der Referenzperiode treten die kleinsten mittleren saisonalen Abflüsse sowohl im Winter wie auch im Herbst auf. Im Zuge der Klimaerwärmung kommt dann das saisonale Minimum aber in den Herbst zu liegen.

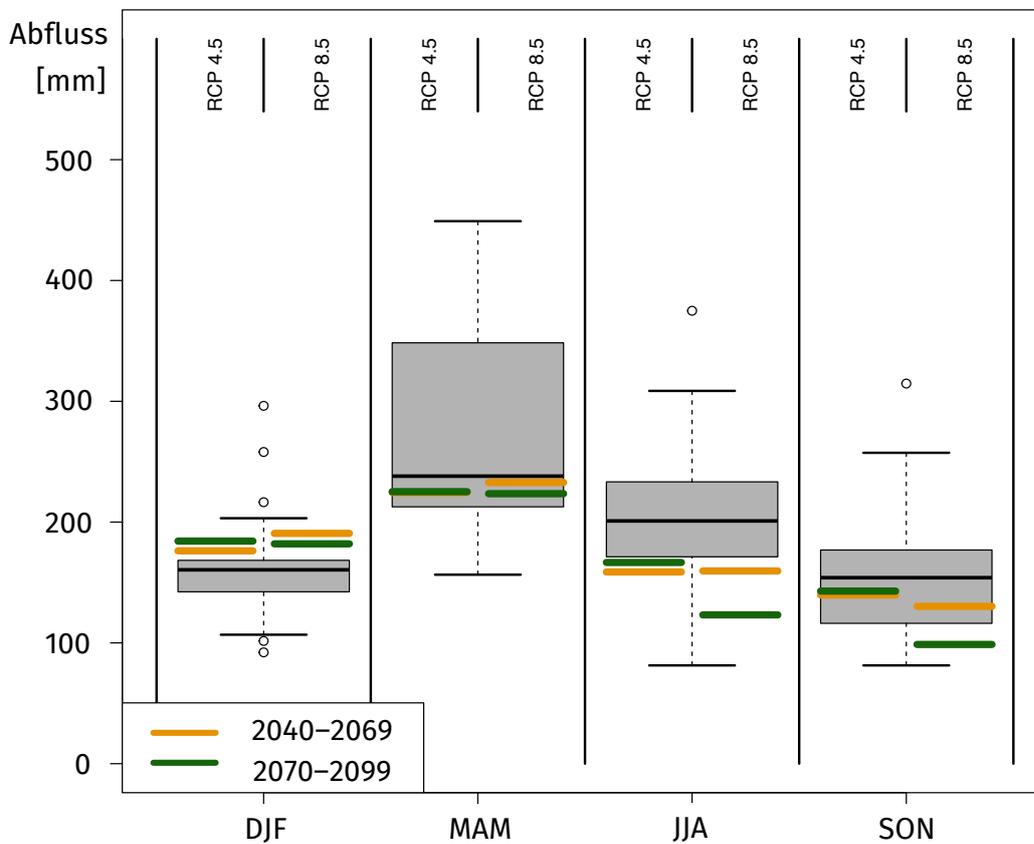


Abb. 3.68: Verteilung der saisonalen Abflüsse der Sense in der Periode 1981–2010, abgeleitet aus den Beobachtungen des BAFU im Vergleich zu den mittleren Abflüssen in der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

## Veränderungen der mittleren aktuellen Verdunstung

Die aktuelle Verdunstung weist eine starke Saisonalität auf mit tiefen Werten im Winter, hohen Werten im Frühling und Herbst und sehr hohen Werten im Sommer (vgl. Abb. 3.62). Im Zuge der Klimaerwärmung erhöht sich die mittlere Jahresverdunstung unter RCP 4.5 zwischen 8 und 12 %, unter RCP 8.5 zwischen 13 und 22 %, also bis über 100 mm pro Jahr (Tab. 3.4.50 und 3.4.51). Aus saisonaler Sicht nimmt die mittlere Verdunstung unter RCP 4.5 zwischen 7 und 16 % zu, unter RCP 8.5 zwischen 11 und 33 %. Da die saisonalen Ausgangswerte im Winter klein und in den restlichen Saisons gross bis sehr gross sind, führen die ähnlichen relativen Zunahmen zu ganz anderen absoluten Zunahmen (vgl. Abb. 3.69).

Tab. 3.4.50: Aktuelle Verdunstung im Einzugsgebiet der Sense@Thörishaus (SenTho) und relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 4.5

	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	
1981-2010	507.3	52.0	121.4	222.7	107.7	mm
2040-2069	8.6	14.0	9.8	8.2	6.8	%
2070-2099	11.5	15.8	12.8	10.7	10.2	%

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 3.4.51: Aktuelle Verdunstung im Einzugsgebiet der Sense@Thörishaus (SenTho) und relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 8.5

	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	
1981-2010	507.3	52.0	121.4	222.7	106.8	mm
2040-2069	12.9	17.5	13.5	12.7	11.1	%
2070-2099	21.6	33.3	25.6	21.3	17.9	%

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

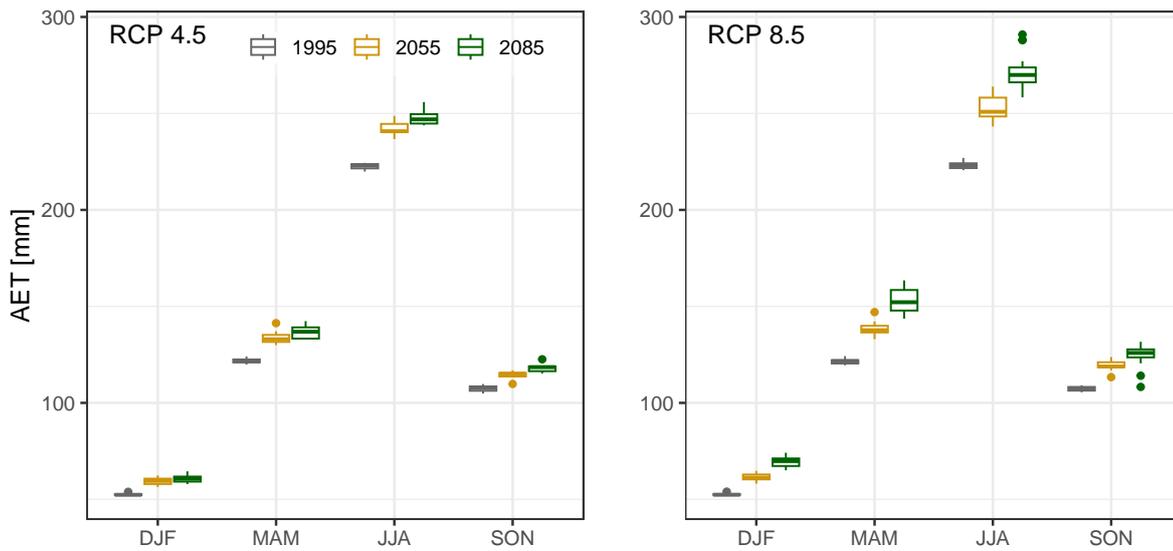


Abb. 3.69: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren saisonalen Verdunstungssummen für das Einzugsgebiet der Sense in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

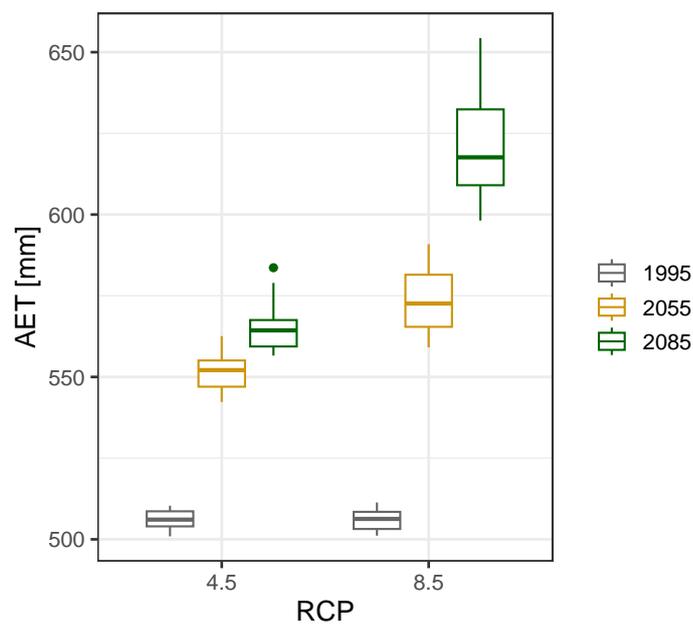


Abb. 3.70: Streuung der Mittelwerte der verwendeten Modellketten der modellierten langjährigen mittleren Jahresverdunstung für das Einzugsgebiet der Sense in der Referenzperiode 1981–2010, der mittleren und fernen Zukunft unter den beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

## Veränderungen des Schnees

Beim nivo-pluvialen Abflussregime der Sense spielt der Schnee eine bedeutende Rolle, wie die Werte in den beiden Tabellen 3.4.52 und 3.4.53 unterstreichen. Die Schneeschmelze trägt in der Referenzperiode 1981–2010 im Mittel rund 13 % zum Gesamtabfluss bei. Dieser Anteil reduziert sich bis Ende des Jahrhunderts auf 10 % unter RCP 4.5 bzw. auf 8.2 % unter RCP 8.5. Die Schneeschmelze spielt also auch in Zukunft immer noch eine unterstützende Rolle im Wasserhaushalt der Sense. Ihr zurückgehender Anteil führt aber vermutlich dazu, dass die mittleren Abflüsse im Frühling (MAM) abnehmen.

Tab. 3.4.52: Rolle des Schnees im Einzugsgebiet der Sense@Thörishaus (SenTho). Modellierter mittlerer Anteil von Neuschnee am Niederschlag und modellierter mittlerer Schmelzwasseranteil am Gesamtabfluss ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 4.5. Die Werte beziehen sich auf ein Kalenderjahr.

	Psol/Ptot <sup>1</sup>	Qmelt/Qtot <sup>2</sup>	
1981-2010	15.9	12.5	%
2040-2069	12.0	11.5	%
2070-2099	10.4	10.0	%

<sup>1</sup> Anteil Schnee am Gesamtniederschlag

<sup>2</sup> Anteil Schneeschmelze am Gesamtabfluss

Tab. 3.4.53: Rolle des Schnees im Einzugsgebiet der Sense@Thörishaus (SenTho). Modellierter mittlerer Anteil von Neuschnee am Niederschlag und modellierter mittlerer Schmelzwasseranteil am Gesamtabfluss ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 8.5. Die Werte beziehen sich auf ein Kalenderjahr.

	Psol/Ptot <sup>1</sup>	Qmelt/Qtot <sup>2</sup>	
1981-2010	15.9	12.8	%
2040-2069	10.9	10.3	%
2070-2099	6.7	8.2	%

<sup>1</sup> Anteil Schnee am Gesamtniederschlag

<sup>2</sup> Anteil Schneeschmelze am Gesamtabfluss

## Wasserhaushaltliche Betrachtungen zu den Veränderungen

In diesem Kapitel betrachten wir die Veränderungen der Wasserhaushaltselemente in deren Zusammenspiel. Dazu werden die in den obigen Tabellen ausgewiesenen relativen Veränderungen von Niederschlag(N), Abfluss (A) und aktueller Verdunstung (V) den Beobachtungen der Referenzperiode 1981–2010 (siehe Tab. 3.4.44)

aufgeprägt. Das Hauptziel ist es, die Veränderungen des Abflusses im Kontext der Veränderungen der anderen Wasserhaushaltselemente zu verstehen. Bei dieser Betrachtungsweise gilt:

$$\Delta A = \Delta N - \Delta V - \Delta R_g \quad (3.19)$$

Bei der Anwendung dieser Gleichung sind unbedingt die Vorzeichen zu beachten. So gilt beim Jahresabfluss unter RCP 4.5 in der mittleren Zukunft (um 2055, s. Abb. 3.71.) folgende Beziehung:

$$-61 = -41 - 43 - (-23) [mm] \quad (3.20)$$

Die Gleichung belegt, dass die Veränderung des Jahresabflusses (-61 mm) zu gleichen Teilen durch die Veränderungen des Jahresniederschlags (-41 mm) und der Jahresverdunstung (43 mm) bedingt sind. Nach Abbildung Abb. 3.71 ist dies jedoch ein Einzelfall. In der fernen Zukunft unter RCP 4.5 und generell unter 8.5 ist die Zunahme der Verdunstung der Haupttreiber der Abflussabnahme. Mit anderen Worten: Sogar wenn der Niederschlag in Zukunft nicht abnehmen sollte, wird der Abfluss wegen der Klimaerwärmung, die zu hohen Verdunstungsraten führt, weiterhin abnehmen. Dies solange, bis die aktuelle Verdunstung durch die fehlende Wasserverfügbarkeit im Boden limitiert wird.

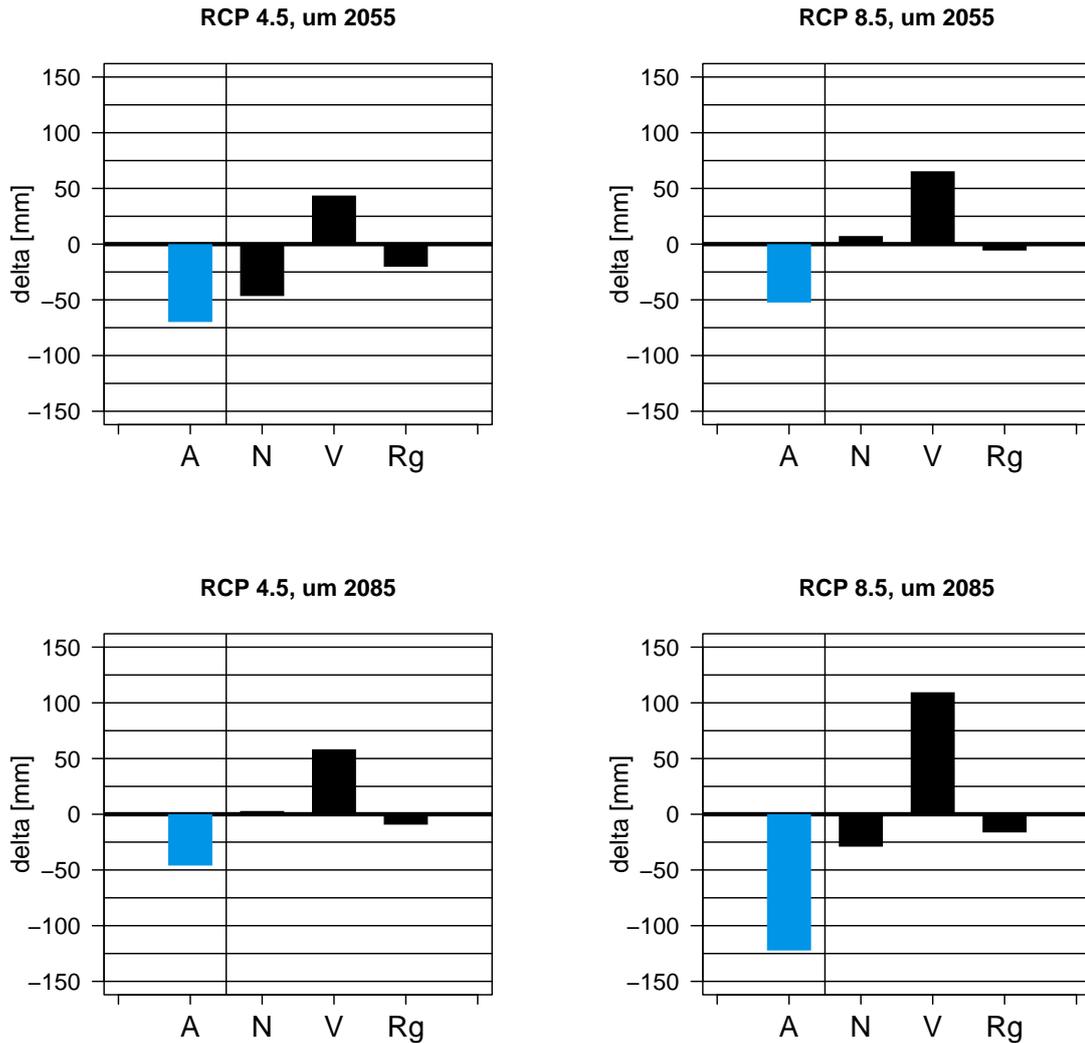


Abb. 3.71: Vergleich der Veränderungen der Jahresbilanz im Einzugsgebiet der Sense@Thörishaus. Die Säulen zeigen das Ausmass und das Vorzeichen der Veränderungen (Zu- oder Abnahmen) in mm/a. Die Grafik beschreibt zudem, welchen Beitrag die Veränderungen von Niederschlag (N), Verdunstung (V) sowie des Restglieds (Rg) zur Veränderung des Abflusses (A, blaue Säule) leisten. Es gilt  $dA = dN - dV - dRg$  (d: Veränderung in mm).

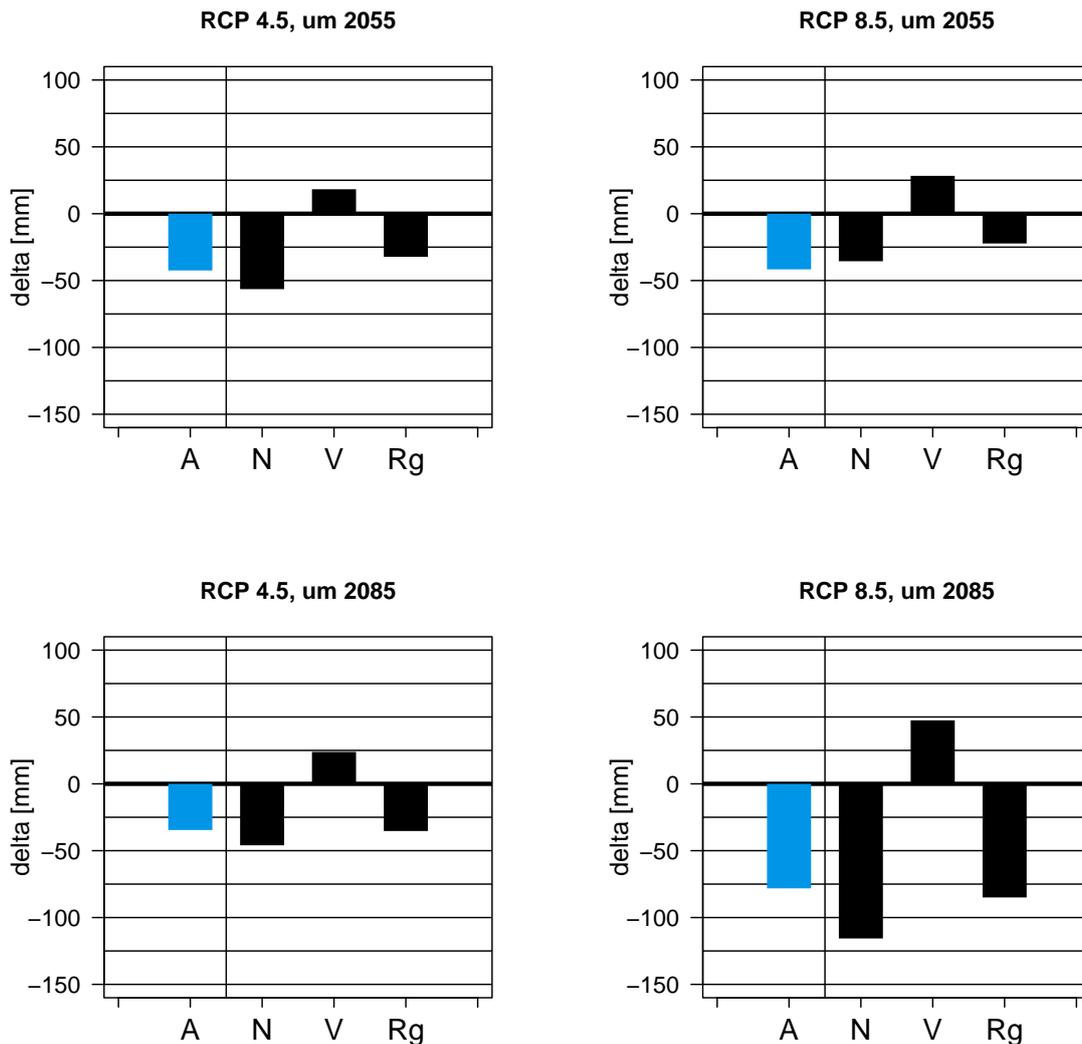


Abb. 3.72: Vergleich der Veränderungen der Wasserbilanz im Sommer (JJA) im Einzugsgebiet der Sense@Thörishaus. Die Säulen zeigen das Ausmass und das Vorzeichen der Veränderungen (Zu- oder Abnahmen) in mm/a. Die Grafik beschreibt zudem, welchen Beitrag die Veränderungen von Niederschlag (N), Verdunstung (V) sowie des Restglieds (Rg) zur Veränderung des Abflusses (A, blaue Säule) leisten. Es gilt  $dA = dN - dV - dRg$  (d: Veränderung in mm)

Aufgrund der Analysen der Wasserhaushaltselemente zeichnen sich vor allem grosse Veränderungen im Winter und im Sommer ab. Betrachten wir zuerst die Situation im Sommer, und zwar mit dem gleichen Diagramm wie beim Jahresabfluss (siehe Abb. 3.72). Dazu ist allerdings vorab zu erwähnen, dass auf saisonaler Basis nicht davon ausgegangen werden kann, dass das Speicherglied  $\Delta S$  gegen 0 geht. Die Grösse des Speicherglieds kann allerdings nicht quantifiziert werden und ist deshalb im Restglied (Rg) subsumiert, welches deshalb viel grösser ist als bei der Jahresbilanz. Für die Abflussabnahme im Sommer ist die Niederschlagsab-

nahme die wichtigste Grösse; sie wird aber durch die Verdunstung wesentlich verstärkt, insbesondere unter RCP 8.5 in der fernen Zukunft. Diese Aussagen werden durch die Abbildungen 3.73 und 3.74 bestätigt (vgl. JJA), welche die Veränderungen des Niederschlags ( $\Delta PR$ ) den Veränderungen des Abflusses ( $\Delta Q$ ) gegenüberstellt. Man erkennt die überproportionale Abnahme des Abflusses im Vergleich zum Niederschlag. Die Medianwerte liegen unter der Winkelhalbierenden, was den Einfluss der erhöhten aktuellen Verdunstung verdeutlicht.

Auch im Winter (DJF) ist die Abflusszunahme mehr oder weniger ausgeprägt niederschlagsgesteuert. Sie ist unter RCP 4.5 in der mittleren und fernen Zukunft grösser als die Niederschlagszunahme. Unter RCP 8.5 gilt das nur für die mittlere Zukunft. Die Ursache dafür ist nicht abschliessend erklärbar. Eine Rolle könnte der Abflusskoeffizient spielen, der den Anteil des Niederschlags beschreibt, der zum Abfluss gelangt. In der Referenzperiode nimmt er die folgenden Werte an:

Jahr: 0.33  
DJF: 0.51  
MAM: 0.42  
JJA: 0.19  
SON: 0.26

Durch die gesättigten Böden ist der Abflusskoeffizient im Winter (DJF) grösser. Es gelangt also bei demselben Niederschlagsinput mehr Wasser zum Abfluss als den übrigen Jahreszeiten, was zu einer Überhöhung des Abflusses im Vergleich zur Niederschlagszunahme führt. Unter RCP 8.5 in der fernen Zukunft macht die erhöhte Verdunstung diesen Effekt mehr oder weniger rückgängig, sodass der Median dann auf der Winkelhalbierenden zu liegen kommt.

Die Streuung der Werte der einzelnen Modellketten um den Median zeigen, wie gut die einzelnen Modellketten den Medianwert repräsentieren (Abb. 3.73 und 3.74). Nehmen wir dazu das Beispiel der Modellierung unter RCP 4.5. Im Sommer sind sich die Modellketten weitestgehend über das Vorzeichen der Veränderungen einig, führen aber zu unterschiedlichen Aussagen bezüglich des Ausmasses der Veränderungen. Im Winter ist die Situation nicht derart eindeutig. So gehen einzelne Modellketten von einer Zunahme des Niederschlags und des Abflusses aus, andere von einer Abnahme. Trotzdem scharen sich die meisten Modellketten relativ nahe um die Medianwerte. Bei Unsicherheitsüberlegungen sind diese Streuungen der Modellketten miteinzubeziehen. Sie sind auch durch die Boxplots bei den einzelnen Wasserhaushaltselementen erfasst (vgl. z.B. Abb. 3.67)

Gemäss dem Budyko-Diagramm (unten links) ist der Wasserhaushalt in der Region PreAlp im Sommer in der Referenzperiode energielimitiert. Diese Energielimitierung bleibt auch – unabhängig vom Emissionsszenario – in Zukunft erhalten. Grössere Wasserknappheitsprobleme im Sommer sind demnach trotz der festgestellten Abflussabnahmen in einem mittleren Jahr nicht zu erwarten.

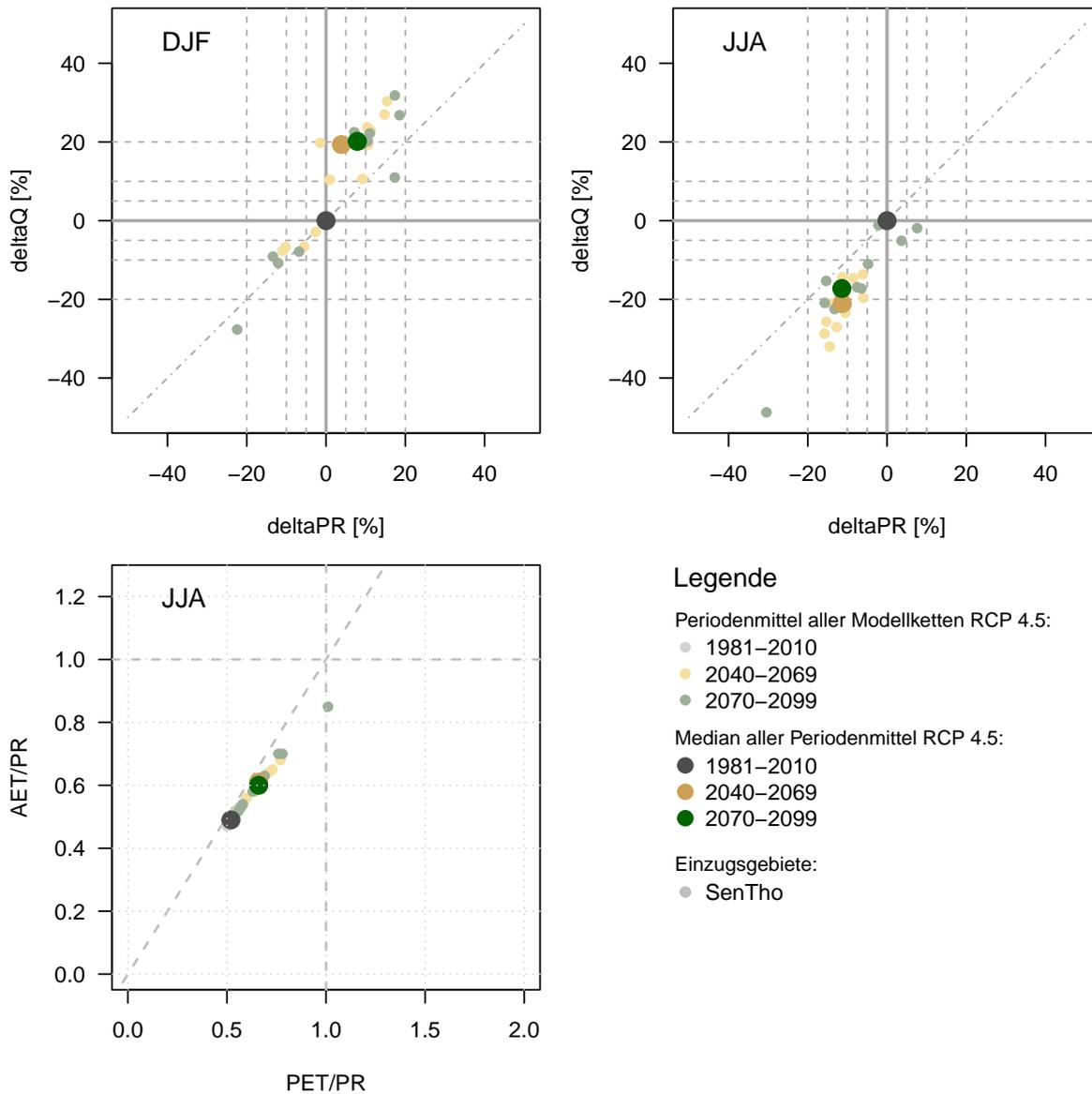


Abb. 3.73: Diagramme zum Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Sense@Thörishaus im Winter (DJF) und Sommer (JJA) unter RCP 4.5. Die oberen zwei Diagramme zeigen die relative Veränderung von Niederschlag (deltaPR) und Abfluss (deltaQ). Das Budyko-Diagramm wird im Methodenteil eingeführt und beschrieben. Die drei Diagramme zeigen die Streuung der Periodenmittel aller verwendeten Modellketten sowie den Medianwert dieser Periodenmittel.

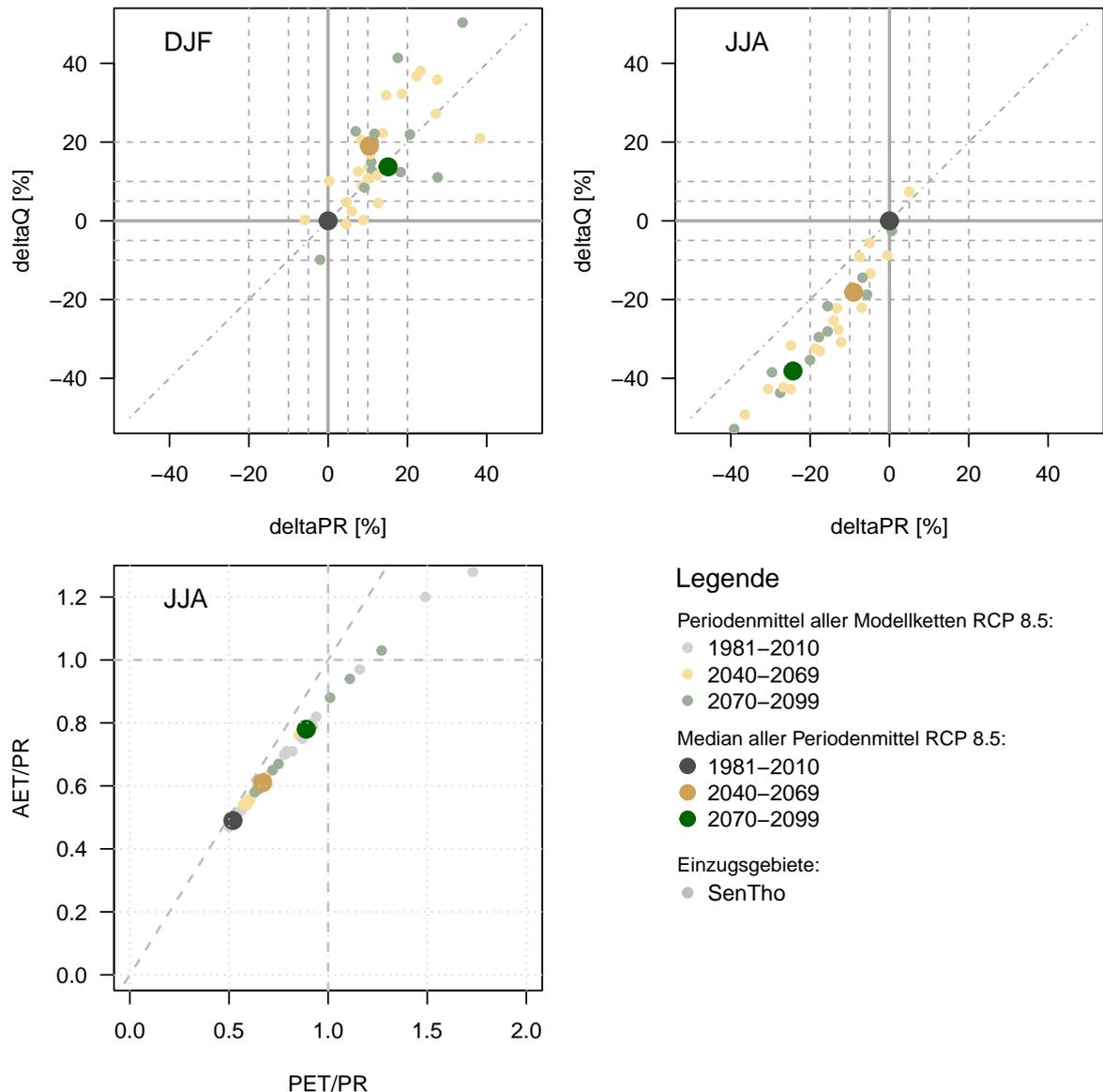


Abb. 3.74: Diagramme zum Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Sense@Thörishaus unter RCP 8.5

### Zukünftige Veränderungen kleinsten und grössten Tagesabflüsse

Es muss nochmals deutlich darauf hingewiesen werden, dass wir hier sehr kleine und sehr grosse Tagesabflüsse analysieren. Bei den sehr grossen Tagesabflüssen handelt es sich nicht um Hochwasser bzw. Hochwasserspitzen im engeren Sinne des Wortes. Solche Hochwasser laufen im Stundenbereich ab und sind mit den hier verwendeten Tageswerten nicht erfassbar. Hingegen werden die kleinsten Abflüsse in der Tagesauflösung gut erfasst, weil die Schwankungen im Niedrigwasserbereich sehr träge ablaufen. Die kleinsten

und grössten Tagesabflüsse werden durch sogenannte Quantile (q) beschrieben. Das Abflussquantil ( $Qq_{10}$ ) beispielsweise gibt jenen Abfluss (Q) an, der im Mittel an 10% der Tage – also an 37 Tagen des Jahres – erreicht oder unterschritten wird.

Tab. 3.4.54: Kleinste und grösste Abflüsse der Sense@Thörishaus (SenTho). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP4.5

	Qq01	Qq05	Qq10	Qq90	Qq95	Qq99	
1981-2010	0.4	0.5	0.6	4.7	6.7	12.2	mm/d
1981-2010	1.7	2.1	2.6	19.0	27.3	49.9	m <sup>3</sup> /s
1981-2010	4.9	6.0	7.3	54.0	77.4	141.8	l/s/km <sup>2</sup>
2040-2069	-17.1	-15.1	-12.7	-9.4	-8.7	-2.4	%
2070-2099	-19.0	-13.2	-11.1	-5.3	-5.6	0.4	%

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 [%]

Tab. 3.4.55: Kleinste und grösste Abflüsse der Sense@Thörishaus (SenTho). Relative Veränderungen ausgehend von den CH2018-Klimaszenarien unter RCP 8.5

	Qq01	Qq05	Qq10	Qq90	Qq95	Qq99	
1981-2010	0.4	0.5	0.6	4.7	6.7	12.4	mm/d
1981-2010	1.7	2.1	2.5	19.1	27.2	50.4	m <sup>3</sup> /s
1981-2010	4.9	6.0	7.2	54.3	77.3	143.1	l/s/km <sup>2</sup>
2040-2069	-22.8	-15.9	-13.3	-6.1	-5.1	-3.9	%
2070-2099	-46.0	-39.2	-34.4	-15.4	-12.4	-8.4	%

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 [%]

Die kleinsten Tagesabflüsse ( $Qq_{01}$  bis  $Qq_{10}$ ) nehmen durchwegs ab, unter RCP4.5 in einem grossen und unter RCP 8.5 mehrheitlich in einem sehr grossen Ausmass, nämlich bis zu 46%. Die Abnahme des kleinsten Tagesabflusses ( $Qq_{01}$ ) ist deutlich grösser als jene der Abflüsse  $Qq_{05}$  und  $Qq_{10}$ . Niedrige Abflüsse werden also mit dem Klimawandel immer kleiner.

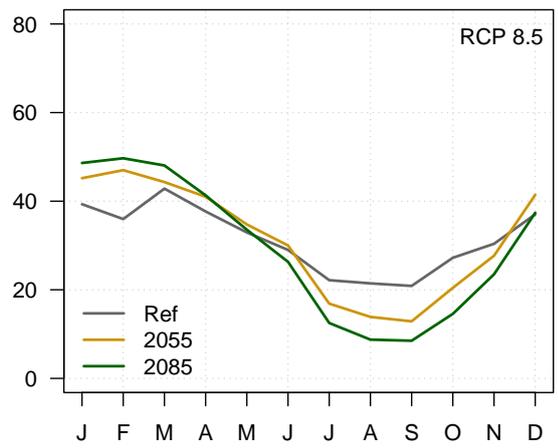
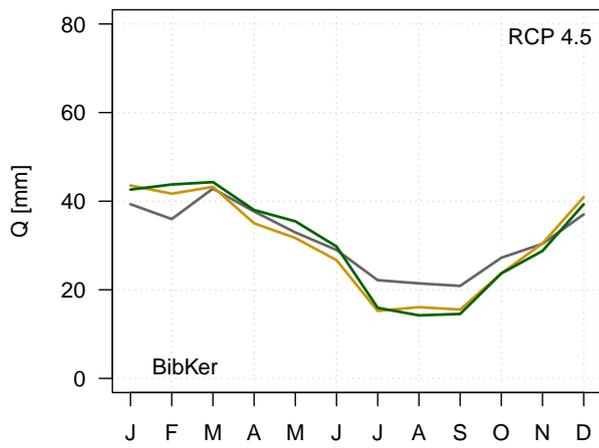
Aber auch die grössten Tagesabflüsse nehmen in der Region PreAlp ab: In einem kleinen bis moderaten Ausmass unter RCP4.5 und einem kleinen bis grossen Umfang unter RCP 8.5.

### 3.5 Veränderungen des Abflussregimes

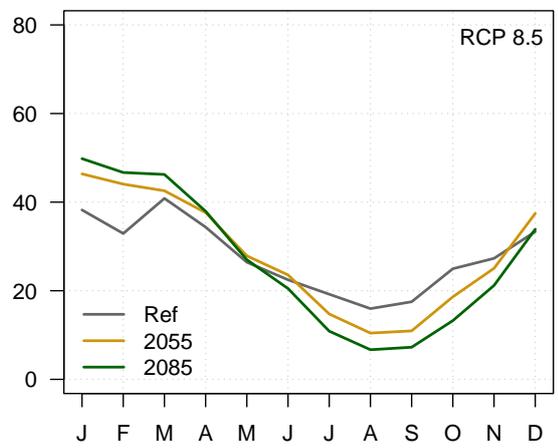
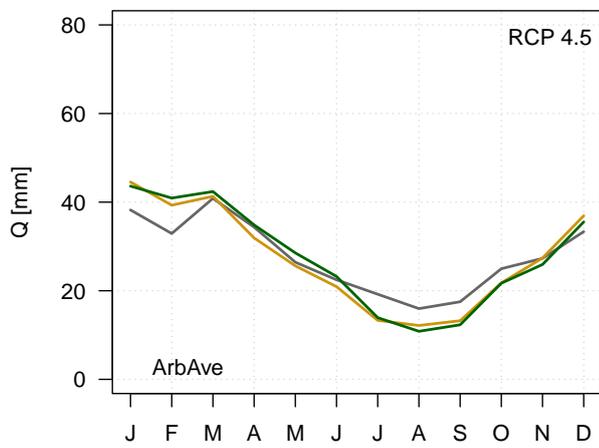
Bisher beschränkten wir uns bei den wasserhaushaltlichen Betrachtungen auf die jährliche und saisonale Auflösung. Dies geschah vor allem aus Gründen der Übersichtlichkeit und der Praktikabilität. Eine Erweiterung der Analysen auf die einzelnen Monate wäre durchaus möglich gewesen. Die entsprechenden Daten sind verfügbar. Dabei hätte aber die Komplexität der Analysen stark zugenommen, dies auf Kosten der Übersichtlichkeit. Mit den folgenden Grafiken zu den Abflussregimes soll hier zum Schluss auch der monatlichen Dimension noch etwas Beachtung gegeben werden.

Die Abflussregimes zeigen die mittleren saisonalen Schwankungen des Abflusses auf der Basis von Monatswerten. Mit dem Vergleich der Abflussregimes der Referenzperiode 1981–2010 und den zukünftigen Abflussregimes in der mittleren fernen Zukunft – getrennt nach den Emissionsszenarien – ist es möglich, entscheidende Aspekte der Veränderungen auf einen Blick zu erfassen. Insbesondere erkennt man in den folgenden Grafiken das Ausmass der winterlichen Abflusszunahmen und gleichzeitig jenes der sommerlichen Abflussabnahmen. Zur Herleitung der Abflussregimes wurden die Beobachtungsdaten der Referenzperiode bzw. der Messperiode mit den modellierten prozentualen Veränderungen überprägt. Dadurch entsteht ein direkter Bezug zwischen den beobachteten und den zukünftigen Abflussregimes.

a)



b)



c)

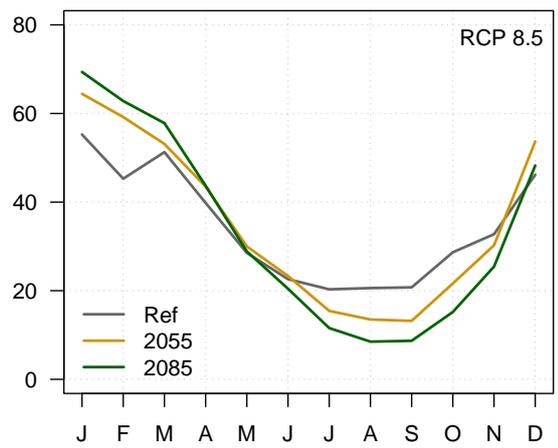
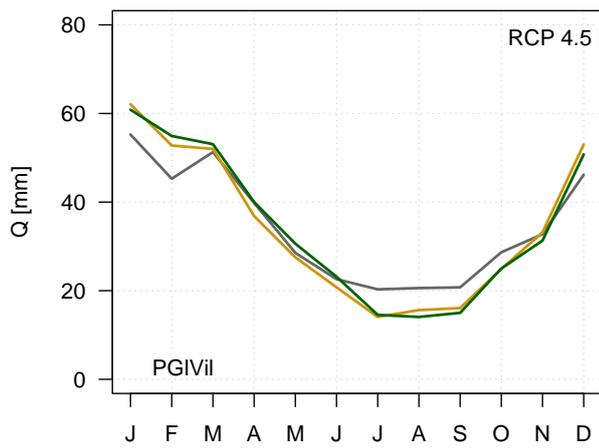
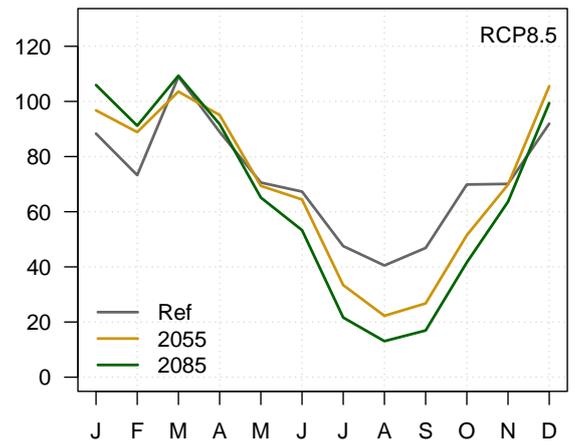
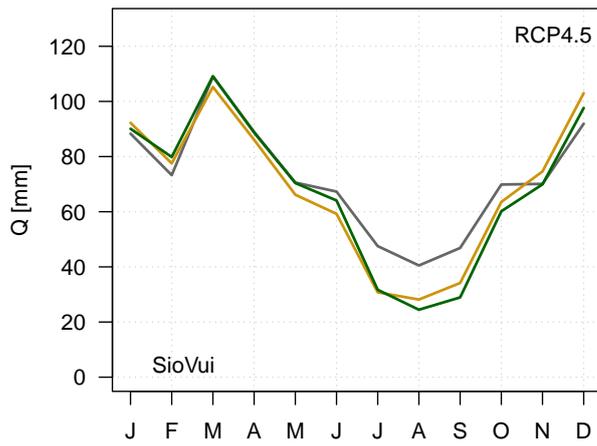


Abb. 3.75: Regime um 1995, 2055 und 2085

a)



b)

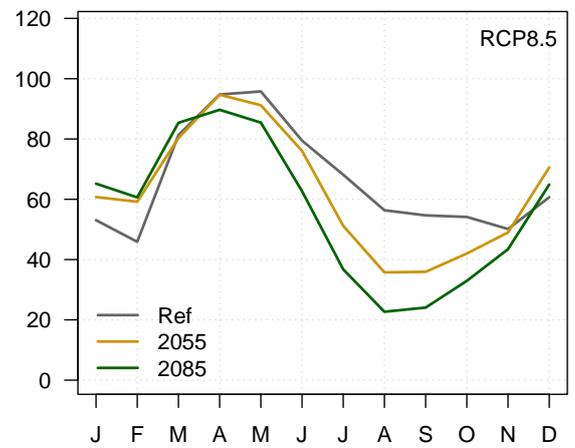
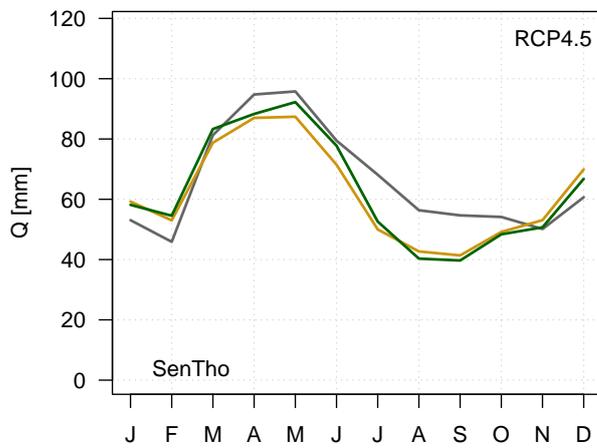


Abb. 3.76: Regime um 1995, 2055 und 2085

### 3.6 Schlussfolgerungen

Aufgrund der bei der Analyse gewonnenen Erfahrungen wurden kurze und prägnante Schlussfolgerungen formuliert. Mit ihnen werden einerseits den verschiedenen Dimensionen der Veränderungen Rechnung getragen und andererseits auch deren räumliche Gültigkeit aufgezeigt. Wie im ganzen Bericht üblich, sind auch die Schlussfolgerungen nach mittlerer und ferner Zukunft sowie nach den beiden Emissionsszenarien gegliedert. Die Schlussfolgerungen basieren auf den in den repräsentativen Einzugsgebieten gewonnenen Erkenntnissen.

Zur besseren Verständlichkeit der folgenden Tabellen seien hier noch einmal die repräsentativen Einzugsgebiete mit der zugehörigen Region zusammengestellt:

Bibere@Kerzers (BibKer):	Region Seeland-Grosses Moos
Petite Glâne@Villars-le-Grand (PGLVil):	Untere Broye
Arbogne@Avenches (ArbAve):	Nördliches Mittelland
Sionge@Vuippens (SioVui):	Südliches Mittelland
Sense@Thörishaus (SenTho):	Voralpen

Tab. 3.6.1: Zusammenfassung – Wasserhaushalt, RCP4.5. Grün eingefärbtes Kästchen bedeutet, dass die Schlussfolgerung für das Einzugsgebiet gültig ist

### Wasserhaushalt (RCP 4.5)

	BibKer	PGIVil	ArbAve	SioVui	SenTho	
<b>Der mittlere Jahresniederschlag verändert sich kaum</b> (Veränderungen unter 5%)						2040 - 2069
						2070 - 2099
<b>Der mittlere Jahresabfluss nimmt ab</b>						2040 - 2069
						2070 - 2099
<b>Der mittlere Jahresabfluss nimmt stark ab</b> (Abnahmen $\leq 10\%$ )						2040 - 2069
						2070 - 2099
<b>Die Zunahme der mittleren aktuellen Jahresverdunstung ist hauptsächlich für die Abnahme des mittleren Jahresabflusses verantwortlich</b> (s. spezifische Analysen)						2040 - 2069
						2070 - 2099

Tab. 3.6.2: Zusammenfassung – Wasserhaushalt, RCP8.5. Grün eingefärbtes Kästchen bedeutet, dass die Schlussfolgerung für das Einzugsgebiet gültig ist

### Wasserhaushalt (RCP 8.5)

	BibKer	PGIVil	ArbAve	SioVui	SenTho	
<b>Der mittlere Jahresniederschlag verändert sich kaum</b> (Veränderungen unter 5%)						2040 - 2069
						2070 - 2099
<b>Der mittlere Jahresabfluss nimmt ab</b>						2040 - 2069
						2070 - 2099
<b>Der mittlere Jahresabfluss nimmt stark ab</b> (Abnahmen $\leq -10\%$ )						2040 - 2069
						2070 - 2099
<b>Die Zunahme der mittleren aktuellen Jahresverdunstung ist hauptsächlich für die Abnahme des mittleren Jahresabflusses verantwortlich</b> (s. spezifische Analysen)						2040 - 2069
						2070 - 2099

Tab. 3.6.3: Zusammenfassung – Mittlere Abflüsse im Sommer und Winter, RCP 4.5. Grün eingefärbtes Kästchen bedeutet, dass die Schlussfolgerung für das Einzugsgebiet gültig ist

### Mittlere Abflüsse im Winter und Sommer (RCP 4.5)

	BibKer	PGIVil	ArbAve	SioVui	SenTho	
<b>Die Zunahme der mittleren winterlichen Abflüsse ist im Vergleich zur Referenzperiode 1981-2010 gross</b> (der Medianwert einer zukünftigen Periode liegt oberhalb des engeren Schwankungsbereichs (Interquartilsabstand) der Einzeljahre der Referenzperiode)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2040 - 2069
	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2070 - 2099
<b>Die Abnahme der mittleren sommerlichen Abflüsse ist im Vergleich zur Referenzperiode 1981-2010 sehr gross</b> (der Medianwert einer zukünftigen Periode liegt unterhalb des engeren Schwankungsbereichs (Interquartilsabstand) der Einzeljahre der Referenzperiode)	<input checked="" type="checkbox"/>	2040 - 2069				
	<input checked="" type="checkbox"/>	2070 - 2099				
<b>Die Trockenheit im Sommer stellt bereits in einem mittleren Jahr der Referenzperiode 1981-2010 ein Problem dar</b> (das Budyko-Diagramm gibt einen Hinweis auf eine Wasserlimitierung)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<b>Die Trockenheit im Sommer stellt in Zukunft ein Problem dar</b> (das Budyko-Diagramm gibt einen Hinweis auf eine Wasserlimitierung in einem mittleren Jahr)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2040 - 2069
	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2070 - 2099
<b>Die Abnahme der mittleren Abflüsse im Sommer ist entscheidend durch die Abnahme der mittleren sommerlichen Niederschläge geprägt</b> (s. spezifische Analysen)	<input checked="" type="checkbox"/>	2040 - 2069				
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2070 - 2099

Tab. 3.6.4: Zusammenfassung – Mittlere Abflüsse im Sommer und Winter, RCP 8.5 Grün eingefärbtes Kästchen bedeutet, dass die Schlussfolgerung für das Einzugsgebiet gültig ist

### Mittlere Abflüsse im Winter und Sommer (RCP 8.5)

	BibKer	PGIVil	ArbAve	SioVui	SenTho	
<b>Die Zunahme der mittleren winterlichen Abflüsse ist im Vergleich zur Referenzperiode 1981-2010 gross</b> (der Medianwert einer zukünftigen Periode liegt oberhalb des engeren Schwankungsbereichs (Interquartilsabstand) der Einzeljahre der Referenzperiode)						2040 - 2069
						2070 - 2099

	BibKer	PGIVil	ArbAve	SioVui	SenTho	
<b>Die Abnahme der mittleren sommerlichen Abflüsse ist im Vergleich zur Referenzperiode 1981-2010 sehr gross</b> (der Medianwert einer zukünftigen Periode liegt unterhalb des engeren Schwankungsbereichs (Interquartilsabstand) der Einzeljahre der Referenzperiode)						2040 - 2069
						2070 - 2099

	BibKer	PGIVil	ArbAve	SioVui	SenTho
<b>Die Trockenheit im Sommer stellt bereits in einem mittleren Jahr der Referenzperiode 1981-2010 ein Problem dar</b> (das Budyko-Diagramm gibt einen Hinweis auf eine Wasserlimitierung)					

	BibKer	PGIVil	ArbAve	SioVui	SenTho	
<b>Die Trockenheit im Sommer stellt in Zukunft ein Problem dar</b> (das Budyko-Diagramm gibt einen Hinweis auf eine Wasserlimitierung in einem mittleren Jahr)						2040 - 2069
						2070 - 2099

	BibKer	PGIVil	ArbAve	SioVui	SenTho	
<b>Die Abnahme der mittleren Abflüsse im Sommer ist entscheidend durch die Abnahme der mittleren sommerlichen Niederschläge geprägt</b> (s. spezifische Analysen)						2040 - 2069
						2070 - 2099

Tab. 3.6.5: Zusammenfassung – Kleinste und grösste Tagesabflüsse, RCP 4.5. Grün eingefärbtes Kästchen bedeutet, dass die Schlussfolgerung für das Einzugsgebiet gültig ist

### Kleinste und grösste Tagesabflüsse (RCP 4.5)

	BibKer	PGIVil	ArbAve	SioVui	SenTho	
Die kleinsten Tagesabflüsse nehmen alle stark ab (Abnahme $\leq -10\%$ )						2040 - 2069
						2070 - 2099
Die grössten Tagesabflüsse nehmen alle ab						2040 - 2069
						2070 - 2099

Tab. 3.6.6: Zusammenfassung – Kleinste und grösste Tagesabflüsse RCP 8.5 Grün eingefärbtes Kästchen bedeutet, dass die Schlussfolgerung für das Einzugsgebiet gültig ist

### Kleinste und grösste Tagesabflüsse (RCP 8.5)

	BibKer	PGIVil	ArbAve	SioVui	SenTho	
Die kleinsten Tagesabflüsse nehmen alle stark ab (Abnahme $\leq -10\%$ )						2040 - 2069
						2070 - 2099
Die grössten Tagesabflüsse nehmen alle ab						2040 - 2069
						2070 - 2099