



Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserkraft in Österreich

Endbericht

Projektnummer 11.125

Oktober 2023

Ersteller
Philipp Stanzel
Fabio Lerche
Christoph Libisch-Lehner
Harald Kling

Datum
24/10/2023

Telefon
+43 664 828 72 33

AFRY Project ID
119001907

E-mail
philipp.stanzel@afry.com

Report ID
Endbericht

Kunde
Österreichs Energie

Berichtsversionen

Ver.	Status	Datum	Erstellt	Geprüft	Unterschr.
01	Entwurf	11.9.2023	PS / FL / CL	PS / FL / HK	
02	Revision 1	13.10.2023	PS / FL / CL	PS / CL	
03	Revision 2	23.10.2023	PS / FL / CL	PS/ CL	
04	Final	24.10.2023	PS / FL / CL	PS/ CL	

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	12
Abstract	15
1 Einleitung	16
1.1 Hintergrund und Ziele.....	16
1.2 Gewählte Vorgangsweise	16
2 Beobachtete Veränderungen.....	18
2.1 Wasserdargebot.....	18
2.1.1 Temperatur.....	19
2.1.2 Niederschlag	20
2.1.3 Schnee.....	22
2.1.4 Gletscher.....	23
2.1.5 Strahlung und Wind	26
2.1.6 Abfluss.....	27
2.2 Auswirkungen auf die Wasserkraft.....	31
2.2.1 Laufkraftwerke	31
2.2.2 Speicherkraftwerke	34
3 Klimaprojektionen.....	38
3.1 Wasserdargebot.....	41
3.1.1 Temperatur.....	41
3.1.2 Niederschlag	43
3.1.3 Schnee.....	46
3.1.4 Gletscher.....	47
3.1.5 Strahlung und Wind	48
3.1.6 Abfluss.....	48
3.2 Auswirkungen auf die Wasserkraft.....	56
3.2.1 Laufkraftwerke	56
3.2.2 Speicherkraftwerke	58
4 Bereitstellung von Flexibilität und Ausgleich von Niederrwasser aufgrund sommerlicher Trockenperioden durch Speicherkraftanlagen	61
5 Literatur.....	65
Anhang	69

A2 Beobachtete Veränderungen.....	70
A 2.1 Wasserdargebot	70
A 2.1.1 Temperatur und Niederschlag	70
A 2.1.3 Schnee.....	74
A 2.1.4 Gletscher	76
A 2.1.5 Strahlung und Wind	78
A 2.1.6 Abfluss	79
A 2.2 Auswirkungen auf die Wasserkraft	85
A3 Klimaprojektionen	87
A 3.1 Wasserdargebot	87
A 3.1.1 Temperatur.....	87
A 3.1.2 Niederschlag	89
A 3.1.4 Gletscher	93
A 3.1.5 Strahlung und Wind	94
A 3.1.6 Abfluss	96
A 3.2. Auswirkungen auf die Wasserkraft	103

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtskarte der verwendeten HISTALP Station und Abflusspegel...	18
Abbildung 2: Temperaturanomalie pro Jahr (in °C) im Vergleich zum langjährigen Mittel jeder Station von 1961 – 2022. Rot markiert überdurchschnittlich heiße Jahre wohingegen die Farbe Blau auf eher kühlere Jahre hindeutet.....	19
Abbildung 3: Niederschlagsanomalie pro Jahr (in %) im Vergleich zum langjährigen Mittel jeder Station von 1961 – 2022. Die Farbe Rot deutet auf ein eher trockenes Jahr hin. In Blau sind Jahre mit überdurchschnittlichem Niederschlag.....	20
Abbildung 4: Beobachtete Veränderung des Niederschlags in Österreich (Chimani et al. 2016). Durchschnittlicher Jahresniederschlag für die Periode 1986 - 2010 (links oben); Unterschied des durchschnittlichen Jahresniederschlags (1986 – 2010) zur Periode 1961 – 1985 (links unten); Unterschied der zwei Perioden wenn Signifikant (rechts oben); Unterschied der zwei Perioden in Prozent (rechts unten).....	21
Abbildung 5: Beobachtete Veränderung der Häufigkeit von Niederschlagstagen unterschiedlicher Intensität zwischen 1961-1985 und 1986-2010 in Österreich (Quelle: Chimani et al. 2016).	22
Abbildung 6: Berechnete Karte des Trends der mittleren saisonalen (November bis April) Schneehöhe in Österreich von 1962 – 2020. Gestreift schattierte Flächen markieren einen signifikanten Trend. Die kleinere Karte links oben zeigt beobachtete Trends der einzelnen Stationen für die gleiche Periode (SNOWPAT Datensatz), wobei rot eingefärbte Stationen einen signifikanten Trend markieren. (Quelle: Olefs et al., 2020)	23
Abbildung 7: Verhältnis zwischen dem Anteil vergletscherter Fläche (% , x-Achse) und dem Beitrag der Gletscherschmelze zum Abfluss (% , y-Achse), aus verschiedenen Quellen für Salzach und Inn für verschiedene Perioden: Salzach im langjährigen Mittel (rot), Inn im langjährigen Mittel (blau), Salzach im Jahr 2003 (grün), Salzach im August 2003 (gelb), Maximalwert für die Salzach im August 2003 (rosa), Werte von Weber et al. 2009 (schwarz) sind deutlich höher als die anderen Schätzungen.	24
Abbildung 8: Rückgang der Gletscherflächen im Großglockner-Gebiet von 1969 bis 2015 (The Austrian Glacier Inventory; Fischer et al., 2015).	25
Abbildung 9: Beobachtete Sonnenstunden pro Jahr von 1930 bis 2022 an den HISTALP Stationen Feuerkogel (oben) und Sonnblick (unten). Speziell in den letzten 35 Jahren ist ein deutlicher Anstieg an beobachteten Sonnenstunden zu erkennen. Beide Stationen zeigen in den Jahren 2003 und 2011 Werte weit über dem langjährigen Mittel.	26
Abbildung 10: Trends im beobachteten Abfluss 1976-2007. Blautöne markieren einen positiven, Rottöne einen negativen Trend. (Quelle: Schöner et al. 2008)	27
Abbildung 11: Mittlere jährliche Abflüsse an Donau (bei Wien, Pegel Nussdorf/Korneuburg, oben, 1900-2019) und Drau (Pegel Oberdrauburg, unten, 1951-2019) und linearer Trend über die gesamte Periode	29

Abbildung 12: Änderung der mittleren monatlichen Abflüsse (in %) ausgewählter Pegel in Österreich zwischen den Perioden 1960 – 1990 und 1991 – 2019. Die überwiegend rot eingefärbten Sommermonate deuten auf einen deutlichen Rückgang des Abflusses hin wohingegen in den restlichen Monaten ein leichter Anstieg zu erkennen ist. Abweichung der Referenzperiode für Enns @ Steyr (1965 – 1990) und Mur @ Graz (1966 – 1990)..... 30

Abbildung 13: Mittlere Monatsbflüsse an Donau (Pegel Nussdorf/Korneuburg, links, für die Perioden 1921-1970 und 1971-2019) und Drau (Pegel Oberdrauburg, rechts, für die Perioden 1966-1990 und 1991-2015). Frühere Perioden in hellblau und spätere in schwarz..... 30

Abbildung 14: Beziehung zwischen durchschnittlich täglichem Abfluss (Pegel Donau @ Kienstock) und der durchschnittlich täglich generierten Leistung des Donaukraftwerks Greifenstein (entso-e Erzeugungsdaten). Die generierte Leistung steigt mit zunehmendem Abfluss bis der Ausbaudurchfluss von 3150 m³/s erreicht ist. Der anschließende Leistungsabfall ist auf den Wehrbetrieb im Hochwasserfall und der damit einhergehenden Änderung der Fallhöhe zurückzuführen. 32

Abbildung 15: Theoretisch energetisch nutzbarer Abfluss des Kraftwerks Greifenstein (Ausbaudurchfluss: 3150 m³/s) mit der farblich dargestellten Abweichung des durchschnittlichen jährlichen Abflusses zum langjährigen Mittel der Donau am Pegel Wien Nussdorf. 33

Abbildung 16: Theoretisch energetisch nutzbarer Abfluss des Kraftwerks Paternion (Ausbaudurchfluss: 320 m³/s) mit der farblich dargestellten Abweichung des durchschnittlichen jährlichen Abflusses zum langjährigen Mittel der Drau am Pegel Amlach..... 33

Abbildung 17: Tatsächlich energetisch genutzter Abfluss des Kraftwerks Langkampfen (Daten: TIWAG) mit der farblich dargestellten Abweichung des durchschnittlichen jährlichen Abflusses zum langjährigen Mittel des Inn am Pegel Oberaudorf..... 34

Abbildung 18: Abfluss des Kraftwerks Mayrhofen (Hauptstufe) mit der farblich dargestellten jährlichen Abweichung des Zuflusses zum langjährigen Mittel an dem Ersatzpegel Zell and Ziller (Ziller). Der Ersatzpegel repräsentiert den natürlichen Zufluss zu den Speichern der Zemm-Ziller Kraftwerksgruppe. Jahrwerte beziehen sich auf ein hydrologisches Jahr (Okt. – Sep.)..... 35

Abbildung 19: Abfluss an der Hauptstufe Kaprun mit der farblich dargestellten jährlichen Abweichung des Zuflusses zum langjährigen Mittel an dem Ersatzpegel Bruck (Fuscher Ache). Der Ersatzpegel repräsentiert den natürlichen Zufluss zu den Speichern der Kraftwerksgruppe Kaprun. Jahreswerte beziehen sich auf ein hydrologisches Jahr (Okt. – Sep.). Der hohe Abfluss im Jahr 2003 ist vermutlich zurückzuführen auf Arbeiten im Zuge der Inbetriebnahme eines neuen Druckrohrschachtes im Jahr 2004..... 35

Abbildung 20: Abfluss an der Hauptstufe der Malta-Kraftwerksgruppe mit der farblich dargestellten jährlichen Abweichung des Zuflusses zu langjährigen Mittel an dem Ersatzpegel Malnitz (Malnitzbach). Der Ersatzpegel repräsentiert den natürlichen

Zufluss zu den Speichern der Malta Kraftwerksgruppe. Jahreswerte beziehen sich auf ein hydrologisches Jahr (Okt. – Sep.).	36
Abbildung 21: Saisonale Veränderungen der mittleren monatlichen Zuflüsse zur Kraftwerksgruppe Kaprun zwischen den Perioden 1991 - 2005 und 2006 - 2020.	37
Abbildung 22: Vorgangswise Klima- und Klimafolgenmodellierung	39
Abbildung 23: Kategorisierung der Modellunsicherheit in den ÖKS15 (Quelle: Chimani et al. 2016).....	40
Abbildung 24: ÖKS15 Klimaprojektionen für Temperatur für Österreich für RCP8.5 und die ferne Zukunft; links: Ensemble-Mittelwert, rechts: Bewertung des Vertrauensgehalts (Quelle: ÖKS 2022).....	41
Abbildung 25: Historische Simulationen und Projektionen der mittleren Temperaturänderung im Einzugsgebiet der Donau bis Wien; CORDEX RCMs mit RCP4.5 und RCP8.5 und Schwankungsbreite der ENSEMBLES RCMs (Quelle: Stanzel und Kling 2018).....	42
Abbildung 26: ÖKS15 Klimaprojektionen für Niederschlag für Österreich (jährlich und saisonal) für RCP8.5 und die ferne Zukunft; links: Ensemble-Mittelwert, rechts: Bewertung des Vertrauensgehalts (Quelle: ÖKS 2022)	44
Abbildung 27: Historische Simulationen und Projektionen der mittleren Niederschlagsänderung im Einzugsgebiet der Donau bis Wien; CORDEX RCMs mit RCP4.5 und RCP8.5 und Schwankungsbreite der ENSEMBLES RCMs (Quelle: Stanzel und Kling 2018).....	45
Abbildung 28: Änderung der mittleren Schneehöhe, Projektionen mit ÖKS15-Klimamodell Daten für 2071-2100 (im Vergleich mit 1971-2000) für die drei Emissionsszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 (Quelle: Gobiet et al. 2022)	46
Abbildung 29: Änderungen im mittleren monatlichen Abfluss aus Schnee- und Gletscherschmelze im Einzugsgebiet des Gepatsch-Speichers, Projektionen mit einem RCM (REMO-UBA) unter der Annahme hoher Emissionen (Szenario A1B) und hoher Eisschmelzfaktoren (Quelle: Nachtnebel et al. 2012): Gesamtabfluss dunkelblau, Schneeschmelze hellblau, Gletscherschmelze braun.....	47
Abbildung 30: Änderung im mittleren Jahresabfluss für Europa für SRES A1B und die Periode 2071-2100 (im Vergleich zu 1961-1990) (Quelle: JRC 2012, Simulationen veröffentlicht in Alfieri et al. 2015)	50
Abbildung 31: Relative Änderung (%) im mittleren Jahresabfluss für Europa im Mittel von fünf CORDEX-Modellen unter RCP4.5 (links) und vier CORDEX-Modellen unter RCP8.5 (rechts) für die Perioden 2041-2070 (oben) und 2071-2100 (Quelle: SMHI Hypeweb, https://hypeweb.smhi.se/)	50
Abbildung 32: Änderung des mittleren Monatsabflusses der Donau in Wien für 2021-2050 (links) und 2071-2100 (rechts), Projektionen mit Daten des CORDEX-Ensembles mit den Emissionsszenarien RCP4.5 (blau, oben) und RCP8.5 (rot, unten), gegenüber 1961-1990 (Quelle: Stanzel und Kling 2018)	54
Abbildung 33: Mittlere jährliche (oben) und monatliche (unten) Veränderung in der Energieerzeugung an Laufkraftwerken in Österreich für die Perioden 2011-2030 (nur	

oben) und 2031-2050 (oben und unten) in vier verschiedenen Klimaprojektionen in einem A1B-Emissionsszenario (Quelle: Wagner et al. 2016)..... 57

Abbildung 34: Mittlerer monatlicher Zufluss zum Mattmark-System, in der Referenzsimulation sowie in den Zukunftsperioden 2031-2040 (links) und 2041-2050 (rechts), unter stochastisch generierten Wetterszenarien auf der Grundlage einer Klimaprojektion des RCM REMO in einem A1B-Emissionsszenario (Quelle: Anghileri et al. 2018) 59

Abbildung 35: Mittlere monatliche Speicherstände (oben) und Energieerzeugung (unten) im Valtellina-System, in der Referenzsimulation (strichlierte Linie) sowie in den Zukunftsszenarien (bunte Linien bzw. Balken, für drei Emissionsszenarien und drei Klimamodelle) für 2040-2049 (jeweils untere Darstellung) und 2090-2099 (jeweils obere Darstellung, mit umgedrehter y-Achse); Quelle: Bombelli et al. (2019)..... 59

Abbildung 36: Trendanalyse der Temperatur (oben) und Niederschlag (unten) für die HISTALP-Station Retz und Sankt Pölten. Rote Punkte zeigen eine positive, blaue eine negative Anomalie der Jahreswerte zum Mittel der gesamten Zeitreihe. Für die Trendanalyse wird ebenfalls die gesamte Zeitreihe betrachtet (1961 – 2020). 70

Abbildung 37: Trendanalyse der Temperatur (oben) und Niederschlag (unten) für die HISTALP-Station Admont und Sankt Bad Gastein. Rote Punkte zeigen eine positive, blaue eine negative Anomalie der Jahreswerte zum Mittel der gesamten Zeitreihe. Für die Trendanalyse wird ebenfalls die gesamte Zeitreihe betrachtet (1961 – 2020). ... 71

Abbildung 38: Trendanalyse der Temperatur (oben) und Niederschlag (unten) für die HISTALP-Station Klagenfurt-Flughafen und Lienz. Rote Punkte zeigen eine positive, blaue eine negative Anomalie der Jahreswerte zum Mittel der gesamten Zeitreihe. Für die Trendanalyse wird ebenfalls die gesamte Zeitreihe betrachtet (1961 – 2020). ... 72

Abbildung 39: Trendanalyse der Temperatur (oben) und Niederschlag (unten) für die HISTALP-Station Innsbruck-Universität und Feldkirch. Rote Punkte zeigen eine positive, blaue eine negative Anomalie der Jahreswerte zum Mittel der gesamten Zeitreihe. Für die Trendanalyse wird ebenfalls die gesamte Zeitreihe betrachtet (1961 – 2020). ... 73

Abbildung 40: Mittlere maximale 5-Tages-Niederschlagssummen 1986-2010 in Frühling (oben links) und Sommer (unten links) sowie Änderungssignale gegenüber der Periode 1961-1985 (rechts). Quelle: Chimani et al. 2016..... 74

Abbildung 41: Trendanalyse der saisonalen (Dezember bis Februar, oben; November bis April; unten) gemittelten Gesamtschneehöhe (linke Spalte) sowie der Schneedeckendauer (rechte Spalte) bezüglich der Untersuchungsperiode 1961 – 2021 für 86 homogenisierte Langzeitmessreihen in Österreich (Stationshöhe: 121 m bis 2140 m). Signifikant negative Trends in Rot. Stationsmessnetze: GeoSphere Austria und Hydrographisches Zentralbüro (HZB). (<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimafolgen/schnee>)..... 74

Abbildung 42: Gleich wie Abbildung 41 aber in Abhängigkeit der Höhenlage der Messstationen. 75

Abbildung 43: Beobachtete Schneehöhe an fünf Stationen zwischen 800 und 1300 m Seehöhe (Quelle: ZAMG, SNOWPAT, https://www.klimawandelanpassung.at/newsletter/nl28/kwa-snowpat)	75
Abbildung 44: Veränderung der Gletscherfläche der Sonnblickgruppe von 1969 bis 2015 (Fischer et al., 2015).....	76
Abbildung 45: Veränderung der Gletscherfläche der Ankogelgruppe von 1969 bis 2015 (Fischer et al., 2015).....	77
Abbildung 46: Veränderung der Gletscherfläche der Ötztaler Alpen von 1969 bis 2015 (Fischer et al., 2015).....	77
Abbildung 47: Beobachtete Trends der bodennahen Windgeschwindigkeit (in m/s) pro Station für den Zeitraum 1979 – 2008 (Vautard et al., 2010). Es zeigt sich ein deutlicher negativer Trend in der nördlichen Hemisphäre.	78
Abbildung 48: Trends im beobachteten Abfluss 1951-2000. Blautöne markieren einen positiven, Rottöne einen negativen Trend. (Quelle: Fürst et al. 2008, in Nachtnebel et al. 2014)	79
Abbildung 49: Beobachtete mittlere jährliche Abflüsse an ausgewählten Pegel zwischen 1951 und 2019 (Donau/Hofkirchen, Inn/Oberaudorf, Inn/Schärding, Salzach)	80
Abbildung 50: Beobachtete mittlere jährliche Abflüsse an ausgewählten Pegeln zwischen 1951 und 2019 (Enns, Mur, Ill, Kamp, Fischa)	81
Abbildung 51: Trends im beobachteten Abfluss 1951-2000 für das Sommerhalbjahr (oben) und das Winterhalbjahr (unten). Positiver Trend in Blau/Lila, negativer Trend in Orange/Rot. (Quelle: Fürst et al. 2008, in Nachtnebel et al. 2014)	82
Abbildung 52: Mittlere Monatsbflüsse an Inn (Pegel Schärding), Enns (Steyr-Ortskai) Ill (Gisingen), Mur (Graz) Salzach (Oberndorf) und Fischa (Fischamend), jeweils für die Perioden 1966-1990 und 1991-2015 (bzw. die längste Periode mit Datenverfügbarkeit innerhalb dieser Zeiträume)	83
Abbildung 53: Trends der Jahresmaxima des Abflusses im Zeitraum 1976–2014: große Kreise blau: signifikant steigende Trends, d. h. Zunahme des mittleren jährlichen Hochwassers MHQ. Große Kreise rot: signifikant fallende Trends. Kleine Kreise: Trends nicht signifikant (Signifikanzniveau 5 %). Oben: Gebiete >500 km ² , unten: Gebiete <500 km ² Fläche. (Quelle: Blöschl et al. 2018).....	84
Abbildung 54: Trends der Jahresniederwasserdurchflüsse Q95 im Zeitraum 1976–2014: große Kreise blau: signifikant steigende Trends, d. h. Zunahme des Q95. Große Kreise rot: signifikant fallende Trends. Kleine Kreise: Trends nicht signifikant (Signifikanzniveau 5 %). Kreuze zeigen Pegel, die durch Überleitungen oder Speicher beeinflusst sind. (Quelle: Blöschl et al. 2018).....	85
Abbildung 55: Beziehung zwischen rückgerechnetem Zufluss der Malta-Kraftwerksgruppe und dem ausgewähltem Ersatzpegel.....	85
Abbildung 56: Beziehung zwischen Zufluss der Kaprun-Kraftwerksgruppe und dem ausgewähltem Ersatzpegel.	86
Abbildung 57: Beziehung zwischen Zufluss der Zemm-Ziller-Kraftwerksgruppe und dem ausgewähltem Ersatzpegel.	86

Abbildung 58: ÖKS15 Klimaprojektionen für Temperatur für Österreich; links: Ensemble-Mittelwert, rechts: Bewertung des Vertrauensgehalts (Quelle: ÖKS 2022) 87

Abbildung 59: Klimaprojektionen für Temperatur für Europa für RCP8.5 (bzw. SSP5-8.5) und die Periode 2081-2100 (im Vergleich zu 1981-2010); oben CMIP5, Mitte: CORDEX; unten CMIP6 (Quelle: IPCC Atlas). Der Querbalken auf der Skala in den einzelnen Karten zeigt den Wert an der Stelle des Zeigefingers. 88

Abbildung 60: ÖKS15 Klimaprojektionen für die mittlere Niederschlagsmenge für Österreich; links: Ensemble-Mittelwert, rechts: Bewertung des Vertrauensgehalts (Quelle: ÖKS 2022)..... 89

Abbildung 61: Klimaprojektionen für Niederschlag für Europa für RCP8.5 (bzw. SSP5-8.5) und die Periode 2041-2060 (im Vergleich zu 1995-2014); oben CMIP5, Mitte: CORDEX; unten CMIP6 (Quelle: IPCC Atlas)..... 90

Abbildung 62: ÖKS15 Klimaprojektionen für maximale tägliche Niederschlagssumme für Österreich; links: Ensemble-Mittelwert, rechts: Bewertung des Vertrauensgehalts (Quelle: ÖKS 2022)..... 91

Abbildung 63: ÖKS15 Klimaprojektionen für die Dauer von Trockenperioden für Österreich im Sommer (jja); links: Ensemble-Mittelwert, rechts: Bewertung des Vertrauensgehalts (Quelle: ÖKS 2022)..... 92

Abbildung 64: Beitrag der Gletscherschmelze (negative Massenbilanz) zum Abfluss der Donau bei Wien im Juli, Projektionen mit 21 RCMs (ENSEMBLES unter A1B) (Quelle: Kling et al. 2011)..... 93

Abbildung 65: Mittlerer Sommer-Abfluss und Anteil der Eisschmelze am Abfluss für drei beispielhafte Einzugsgebiete im Donau-Einzugsgebiet (Oberlauf: Susch, Mittellauf: Oberaudorf; Unterlauf: Greifenstein), Projektionen mit 14 CMIP5 GCMs unter RCP2.6 (Quelle: Wallner 2022, Daten von Huss und Hock 2015)..... 93

Abbildung 66: ÖKS15 Klimaprojektionen für Globalstrahlungssumme für Österreich; links: Ensemble-Mittelwert, rechts: Bewertung des Vertrauensgehalts (Quelle: ÖKS 2022)..... 94

Abbildung 67: Klimaprojektionen für mittlere Jahreswindgeschwindigkeit für Österreich, ein RCM für Szenario A1B und die Periode 2041-2050 (im Vergleich zu 1981-1990) (Quelle: Krenn et al. 2011) 95

Abbildung 68: Klimaprojektionen für mittleren Wind für Europa, Ensemble-Mittelwert von CMIP6-GCMs für SSP5-8.5 und die Periode 2081-2100 (im Vergleich zu 1981-2010) (Quelle: IPCC Atlas) 95

Abbildung 69: Änderung des mittleren Jahresabflusses für 2061-2090, Projektionen mit Daten des Klimamodells REMO-UBA in den SRES-Szenarien A2 (unten) und A1B (oben), gegenüber 1961-1990 (Quelle: Stanzel und Nachtnebel 2010) 96

Abbildung 70: Änderung des mittleren Jahresabflusses für 2021-2050, Projektionen mit Daten des Klimamodells CLM-ECHAM5 im SRES-Szenario A1B, gegenüber 1976-2007, mit verschiedenen Parametrisierungen des hydrologischen Modells (links/rechts); gelb: keine Änderung, orange-rot: Abnahme, grün-blau: Zunahme (Quelle: Blaschke et al. 2007)..... 96

Abbildung 71: Änderung des mittleren Jahresabflusses (mm) für drei Perioden, im Vergleich zu 1961-1990, Projektionen mit Daten von drei Klimamodellen im SRES-Szenario A1B (Quelle: Goler et al. 2016).....	97
Abbildung 72: Änderung des mittleren Jahresabflusses (Verhältnis) für verschiedene Pegel in vier Flussgebieten für die Periode 2061-2090, im Vergleich zu 1961-1990 (Referenzwert 1), Projektionen mit Daten von vier Klimamodellen im SRES-Szenario A1B (Quelle: Nachtnebel et al. 2012).....	97
Abbildung 73: Änderung des mittleren Jahresabflusses für 2071-2100, Projektionen mit Daten des CORDEX-Ensembles mit den Emissionsszenarien RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot), gegenüber 1981-2010 (Quelle: Hanus et al. 2021).....	98
Abbildung 74: Änderung des mittleren Monatsabflusses (m ³ /s) für drei Flussgebieten für die Periode 2071-2100, im Vergleich zu 1961-1990 (schwarze Linie), Projektionen mit Daten von 16 CORDEX-Klimamodellen in den Szenarien RCP4.5 (links) und RCP8.5 (Mitte), sowie der Bandbreite der Ergebnisse mit 21 ENSEMBLES-Klimamodellen im Szenario A1B (orange Fläche); rechts: Ensemble-Mediane (Quelle: Stanzel und Kling 2018).....	98
Abbildung 75: Änderung des mittleren Monatsabflusses (m ³ /s) für zwei Flussgebieten für die Periode 2061-2090, im Vergleich zu 1961-1990 (blaue Linien), Projektionen mit Daten von 3 Regionalen Klimamodellen im Szenario A1B (REMO-UBA schwarze Linien, RegCM3 orange Linien und Arpege violette Linien) (Quelle: Nachtnebel et al. 2012)	99
Abbildung 76: Änderung des mittleren Monatsabflusses (mm/Tag) für sechs kleinere alpine Flussgebiete für die Periode 2071-2100, Projektionen mit Daten des CORDEX-Ensembles mit den Emissionsszenarien RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot), gegenüber 1981-2010 (Quelle: Hanus et al. 2021).....	100
Abbildung 77: Änderung des Hochwasserabflusses HQ100 bei bestimmten Annahmen der Änderung der Hochwasser auslösenden Prozesse (2021-2050 im Vergleich zu 1976-2007). (Quelle: Blöschl et al. 2011).....	101
Abbildung 78: Änderung des Niederwasserabflusses Q95 für den Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zu 1978-2007 berechnet mit einem kontinuierlichen Niederschlag-Abflussmodell und Inputdaten aus zwei Regionalen Klimamodellen mit zwei unterschiedlichen Emissionsszenarien. Blau: Zunahme des Q95, rot: Abnahme des Q95 (Quelle: Blöschl et al. 2018).....	102
Abbildung 79: Änderung der Wasserkrafterzeugung in Laufkraftwerken in Österreich für den Zeitraum 2051-2080 im Vergleich zu 1971-1989, im Mittel von drei Modellprojektionen unter A1B-Emissionsszenarien (Quelle: Totschnig et al. 2017)..	103
Abbildung 80: Änderung der Wasserkrafterzeugung in Laufkraftwerken in der Schweiz für die Zeiträume 2020-2049, 2045-2074 und 2070-2099 (drei Spalten in den Ergebnis-Boxen), im Vergleich zu 1981-2010, für die Mittelwerte der Ergebnisse der Emissionsszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 (drei Zeilen in den Ergebnis-Boxen, Quelle: Wechsler et al. 2023)	103

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beobachtungsgrößen und Datenquelle.....	18
Tabelle 2: Gletscherflächen (in km ²) ausgewählter Regionen in Österreich und deren Entwicklung über die letzten Dekaden. Die Flächen wurden abgeleitet aus den Daten des Austrian Glacial Inventory (Fischer et al., 2015)	25
Tabelle 3: Änderungen im beobachteten mittleren Abfluss	29
Tabelle 4: Häufig verwendete Klimamodell Datensätze, zugrundeliegende Emissionsszenarien und die Bandbreite der Projektionen der mittleren Klimaerwärmung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (ΔT)	38
Tabelle 5: Projektionen von Änderungen im mittleren Abfluss (ΔMQ) in verschiedenen Flussgebieten aus verschiedenen Studien	52
Tabelle 6: Theoretisch mögliche Dauer der Aufhöhung von Niederwasser aus der Abgabe alpiner Speicher (in Tagen) unter der Annahme verschiedener verfügbarer Volumina und verschiedener Abgabemengen	63

Abkürzungen

ACRP	Austrian Climate Research Programme
CH2018	Schweizer Klimamodell Datensatz
CMIP	Coupled Modelling Intercomparison Project
CORDEX	Coordinated Regional Downscaling Experiment
eHYD	Online-Portal für hydrographische Daten (https://ehyd.gv.at/)
GCM	General Circulation Model (Global Climate Model)
HISTALP	Stationsdatensatz der ZAMG, siehe Böhm et al. 2009
HZB	Hydrographischen Zentralbüro
IPCC	International Panel on Climate Change
HQ	Hochwasser
MQ	Mittelwasser
NQ	Niederwasser
ÖKS15	Hochaufgelöste Klimaszenarien für Österreich
RCM	Regional Climate Model
RCP	Representative Concentration Pathway (Emissionsszenarien der CMIP5-GCM-Generation)
SMHI	Schwedischer Hydro-meteorologischer Dienst
SRES	Emissionsszenarien der CMIP3-GCM-Generation
SSP	Shared Socio-economic Pathways (Emissionsszenarien der CMIP6-GCM-Generation)
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (seit 2023: GeoSphere Austria)

Kurzfassung

Im vorliegenden Bericht wird der derzeitige Stand des Wissens zum Klimawandel und seinen Auswirkungen auf das Wasserdargebot sowie auf die Wasserkrafterzeugung in Österreich zusammengefasst. Dabei werden sowohl bereits beobachtete Veränderungen der Vergangenheit analysiert als auch erwartbare zukünftige Veränderungen. Die Auswertungen zu Veränderungen in der Vergangenheit berücksichtigten Beobachtungsdaten und publizierte Trendanalysen. Für die Auswertungen zur Zukunft unter den Bedingungen des Klimawandels wurden Klimaprojektionen und Klimafolgensimulationen aus veröffentlichten Datensätzen und Studien analysiert.

Die Analysen für die Beobachtungen der Vergangenheit zeigen:

- In den vergangenen Jahrzehnten wird ein deutlicher Anstieg der Temperatur beobachtet.
- Im Niederschlag zeigt sich eine leichte Zunahme in vielen Teilen Österreichs, davon ausgenommen sind lediglich Regionen im Süden sowie in Vorarlberg.
- Der Anteil an Schneefall im Winterniederschlag geht zurück, die Schneedeckendauer und die Schneemengen reduzieren sich.
- Die Gletscher schmelzen, Gletscherflächen gehen zurück und der Beitrag der Gletscherschmelze am Abfluss vergletschelter Einzugsgebiete nimmt zu.
- Im mittleren Jahresabfluss zeigen sich nur sehr schwache Trends, mit geringfügigen Zunahmen an Flüssen im Zentrum Österreichs und geringen Abnahmen im Westen, Norden und Süden.
- Saisonal zeigen sich deutliche Verschiebungen im Abfluss, mit einer Zunahme in den Wintermonaten und einer Abnahme im Sommer.
- In der Wasserkrafterzeugung sind keine Trends erkennbar. Veränderungen in der Erzeugung in Laufkraftwerken, aber auch in Speicherkraftwerken korrelieren stark mit Veränderungen im natürlichen Abfluss.

Projektionen für die Zukunft deuten auf folgende Veränderungen hin:

- Die Erwärmung wird sich fortsetzen, wobei das Ausmaß stark von den zukünftigen Treibhausgasemissionen abhängt.
- Projektionen für Niederschläge sind unsicher, mit großen Schwankungen zwischen den Ergebnissen verschiedener Klimamodelle. Tendenziell kann mit einer leichten Zunahme der Niederschläge gerechnet werden. Saisonal werden Niederschläge im Winter zunehmen und im Sommer, in vielen Regionen Österreichs abnehmen.
- Der Trend zu weniger Schnee wird sich fortsetzen, und hat einen starken Einfluss auf die saisonale Abflussbildung in alpinen Einzugsgebieten.
- Gletscher werden weiterhin abschmelzen, wobei es in den nächsten Jahrzehnten aufgrund des Rückgangs der Gletscherflächen und Volumina zu

einem Rückgang des Abflusses aus der Gletscherschmelze kommen wird. Ab welchem Zeitpunkt der derzeit zumeist noch ansteigende Gletscherabfluss sich wieder verringert, hängt von der Höhenlage und der Eisverteilung der einzelnen Gletscher ab.

- Zukünftige Veränderungen im mittleren Jahresabfluss sind, aufgrund der hohen Unsicherheit bei Niederschlagsprojektionen, sehr unsicher. Tendenziell werden eher geringe Änderungen erwartet, da der Anstieg der Verdunstung durch höhere Niederschläge kompensiert werden kann. Viele Simulationen zeigen aber, v.a. für die fernere Zukunft und für Gebiete im Süden Österreichs, einen leichten Rückgang im Jahresabfluss.
- Saisonal zeigen fast alle Simulationen eine Verstärkung des beobachteten Trends zu höheren Winterabflüssen und niedrigeren Sommerabflüssen, wobei die Ausprägung stark von der Höhenlage und dem Einfluss der Schneeprozesse abhängt.
- Die Vorhersage detaillierter Veränderungen in der Erzeugung in Laufkraftwerken aufgrund des Klimawandels ist, wie für den Abfluss, unsicher. In der näheren Zukunft können geringe Zunahmen oder Abnahmen im Bereich weniger Prozent nicht ausgeschlossen werden. Für die fernere Zukunft zeigen die verfügbaren Studien im Falle eines stärkeren Klimawandels tendenziell geringe Abnahmen der Erzeugung. Übereinstimmend zeigen alle Ergebnisse einen Anstieg der Produktion im Winter und einen Rückgang im Sommer.
- Für Speicherkraftwerke hängen die zukünftigen Änderungen von den lokalen Veränderungen im Niederschlag, von der Höhenlage und vom noch vorhandenen Gletschervolumen ab. In Gebieten mit noch relevanter Vergletscherung kann mit einer Zunahme der Erzeugung aufgrund des höheren Gletscherabflusses gerechnet werden, solange noch ausreichend Eisvolumen vorhanden ist. Saisonal kommt es zu früheren Schmelzzuflüssen im Frühling und geringeren Zuflüssen im Sommer, wobei diese Veränderung je nach Speichervolumen einen stärkeren oder geringeren Einfluss auf die saisonal für die Energieerzeugung verfügbaren Wassermengen hat.

Diese Ergebnisse erlauben eine Einschätzung in Bezug auf drei untersuchte Hypothesen:

- „Die Tendenz in den Jahresabflussfrachten ändert sich nicht, bei der Gesamtproduktion sind keine signifikanten Änderungen zu erwarten“:
 - Wenige Veränderungen können für die nächsten Jahre und Jahrzehnte erwartet werden. Für eine fernere Zukunft bei fortschreitendem Klimawandel ist tendenziell mit einem Rückgang des Abflusses rechnen. Die meisten Simulationen ergeben nur geringe zukünftige Änderungen, einzelne Klimamodelle weisen aber auch auf die Möglichkeit drastischerer Änderungen hin.

- „Wasserkraft wird in Zukunft eine noch wichtigere Bedeutung haben, weil es zwar in den Sommermonaten zu weniger Wasserkraftproduktion kommen kann, dafür aber im ohnehin produktionsarmen Winter zu Steigerungen“:
 - Diese Hypothese kann eindeutig bestätigt werden. Sowohl beobachtete Trends als auch Zukunftsprojektionen zeigen ansteigenden Winterabfluss und Winterproduktion und abnehmenden Sommerabfluss und Sommerproduktion an. Mit fortschreitender Erwärmung in einer fernerer Zukunft wird der saisonale Ausgleich immer stärker.
- „Die Konzentration der Niederschläge wird zunehmen. Speicher können dazu beitragen, diesen Konzentrationseffekt abzufedern und die Flexibilität im System zu bewahren.“
 - Speicherkraftwerke tragen auf verschiedenen zeitlichen Skalen zur Flexibilität im Stromsystem bei, wobei in Bezug auf den Klimawandel sowohl kurzfristigerer als auch längerfristiger Ausgleich relevant ist:
 - Die Häufigkeit von Starkregenereignissen nimmt aufgrund des Klimawandels zu. Kurze Starkregenereignisse im Einzugsgebiet der Speicher können durch die Speicher zurückgehalten werden und das Wasser kann zu späteren Zeitpunkten abgearbeitet werden, beispielsweise bei geringer Wind- und Photovoltaik-Erzeugung.
 - In den untersuchten Beobachtungsdaten zeigt sich bisher kein Hinweis auf eine stärkere Variabilität der Abflüsse von Jahr zu Jahr. An der Donau zeigen sich in den letzten Jahrzehnten aber erstmals Niederwasserphasen in Sommer und Herbst. Für die Zukunft kann im Sommerhalbjahr mit längeren Trockenperioden und langfristig auch mit längeren Niederwasserperioden in Sommer und Herbst gerechnet werden. Abgaben aus den großen alpinen Speichern können grundsätzlich, wie derzeit in den Niederwasserphasen im Winter, auch im Sommer eine Aufhöhung des Abflusses herbeiführen und dadurch eine ausreichende Stromerzeugung sicherstellen. Für die Donau ist der mögliche Einfluss der alpinen Speicher aber zeitlich limitiert – für substantielle Abflusserhöhung während längerer, mehrere Wochen dauernde Niederwasserphasen wäre das verfügbare Speichervolumen zu gering.

Abstract

This report summarizes the current state of knowledge about climate change and its impact on water availability and hydropower production in Austria. The presented analyses consider changes that have already been observed in the past as well as expected future changes. Past changes are evaluated based on available observational data and published trend analyses. Future changes under climate change conditions are analysed considering climate projections and climate impact simulations from published data sets and studies.

Both, observed historical and simulated future changes, show a relatively high uncertainty related with changes in mean annual river discharge and hydropower production and a relatively clear pattern of change related with seasonal changes in discharge and hydropower production.

In the annual mean, evaporation increases due to higher temperatures, but this has been compensated, and might further be compensated in the future, by slightly increasing precipitation. Therefore, only minor changes in the range of a few percent are expected for mean annual discharge and hydropower production. The sign of change in projections for discharge for the next decades can be positive or negative, depending on the expected increase in the relatively uncertain rainfall projections. With stronger warming in a more distant future, climate impact projections show a stronger tendency towards minor decreases in water availability and hydropower production.

Seasonally, past trends and future projections agree on showing increases in winter discharge and hydropower production, and decreases in summer discharge and hydropower production. Substantial decreases in summer discharge in a more distant future might entail summer drought and low flow events, during which water released from alpine reservoirs could support energy production, as currently during winter low flow periods.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Ziele

Aufgrund der Dürreereignisse des Jahres 2022 und der damit verbundenen Mindererzeugungen von Wasserkraft in den Sommermonaten kam es vermehrt zu medialer Aufmerksamkeit zum Thema Zukunft der Wasserkraft in Verbindung mit dem Klimawandel.

Österreichs Energie hat deshalb beschlossen, ein Projekt zu beauftragen, in dem die tatsächlichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserkraft untersucht und dargestellt werden sollen.

Dabei sollten vor allem auch folgende Hypothesen geprüft werden:

- „Die Tendenz in den Jahresabflussfrachten ändert sich nicht, bei der Gesamtproduktion sind keine signifikanten Änderungen zu erwarten.“
- „Wasserkraft wird in Zukunft eine noch wichtigere Bedeutung haben, weil es zwar in den Sommermonaten zu weniger Wasserkraftproduktion kommen kann, dafür aber im ohnehin produktionsarmen Winter zu Steigerungen.“
- „Die Konzentration der Niederschläge wird zunehmen. Speicher können dazu beitragen, diesen Konzentrationseffekt abzufedern und die Flexibilität im System zu bewahren.“

1.2 Gewählte Vorgangsweise

In der vorliegenden Studie, die diese Hypothesen überprüfen soll, werden einerseits hydro-meteorologische Beobachtungsdaten und Daten der Wasserkrafterzeugung untersucht, um den bereits erkennbaren Einfluss des Klimawandels auf das Wasserdargebot und die Wasserkrafterzeugung der vergangenen Jahre und Jahrzehnte zu evaluieren. Zusätzlich werden bereits erfolgte Untersuchungen über bereits beobachtete Trends und Veränderungen analysiert und zusammengefasst.

Andererseits werden die zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels untersucht, indem Ergebnisse von Klimamodellen sowie Klimafolgenmodellen analysiert und dargestellt werden. Dafür werden internationale und nationale Veröffentlichungen herangezogen. Es werden keine eigenen Simulationen durchgeführt, aber teilweise auf die Rohdaten früherer eigener Klimafolgensimulationen zurückgegriffen.

Der Schwerpunkt der Auswertungen von vergangenen und zukünftigen Veränderungen hydro-meteorologischer Variablen liegt dabei auf den für das Wasserdargebot und damit für die Wasserkraft relevanten Größen:

- Niederschlag

- Temperatur
- Schnee- und Gletscherverhältnisse
- Abflussverhältnisse

Veränderungen in Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit werden nur grob und auf Basis bestehender Studien und Publikationen bewertet.

Ausgewertet werden dabei die mittleren Verhältnisse und langfristigen Trends, sowie Variabilität und Schwankungen, saisonale Verschiebungen und (soweit dies die Datenbasis zulässt) Häufigkeiten/Ausprägung von Extremereignissen.

Die Analyse erfolgt regional differenziert, wobei eine für die Wasserkraft sinnvolle Unterscheidung von Regionen getroffen wird.

In Bezug auf Veränderungen in der Wasserkrafterzeugung wird zunächst analysiert, wie stark sich die in der Vergangenheit beobachteten Schwankungen des Klimas auf die Wasserkrafterzeugung ausgewirkt haben. In weiterer Folge werden auf der Grundlage der Auswertungen zum Wasserdargebot und unter Berücksichtigung bereits veröffentlichter Studien die Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftige Wasserkrafterzeugung analysiert. Beurteilt wird dabei die Gesamtproduktion sowie das saisonale Erzeugungsmuster, wobei eine differenzierte Auswirkungsanalyse für Speicher- und Laufwasserkraft erfolgt.

Schließlich wird die mögliche ausgleichende Rolle von Speicherkraftanlagen bei der Dämpfung von Extremereignissen, insbesondere von Trockenheit und Niedrigwasser, qualitativ bewertet und diskutiert.

Die hier untersuchten Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserkraft beschränken sich auf die rein physikalischen Auswirkungen der Änderungen im Klimageschehen und der daraus folgenden Änderungen im Wasserdargebot. Andere, indirekte Auswirkungen des Klimawandels auf das Energiesystem und damit auf die Wasserkrafterzeugung, wie z.B. aufgrund des Ausbaus der Erzeugung aus Wind- und Solarenergie, oder einer CO₂-Besteuerung, oder von Veränderungen in der Stromnachfrage, werden in diesem Bericht nicht behandelt.

2 Beobachtete Veränderungen

2.1 Wasserdargebot

In einer Analyse von Beobachtungsdaten der letzten Jahrzehnte wurden Veränderungen untersucht, die bereits stattgefunden haben. Dabei wurden Beobachtungsgrößen analysiert, die mit dem Wasserdargebot in Zusammenhang stehen.

Als Datengrundlage wurden für die Analyse von bereits erfolgten Veränderungen im Wasserdargebot die in Tabelle 1 gelisteten Beobachtungsgrößen berücksichtigt. Abbildung 1 gibt eine Übersicht über die Lage aller Stationen, die in dieser Studie als Datenquelle verwendet wurden.

Tabelle 1: Beobachtungsgrößen und Datenquelle

Beobachtungsgröße	Quelle
Abfluss	eHYD, viadonau
Niederschlag	GeoSphere Austria / ZAMG (HISTALP)
Temperatur	GeoSphere Austria / ZAMG (HISTALP)
Schnee	Olefs et al. (2020), GeoSphere Austria / ZAMG
Gletscher	The Austrian Glacier Inventory (Fischer et al., 2015)
Wind	Vautard et al. (2010)
Strahlung	GeoSphere Austria / ZAMG (HISTALP)

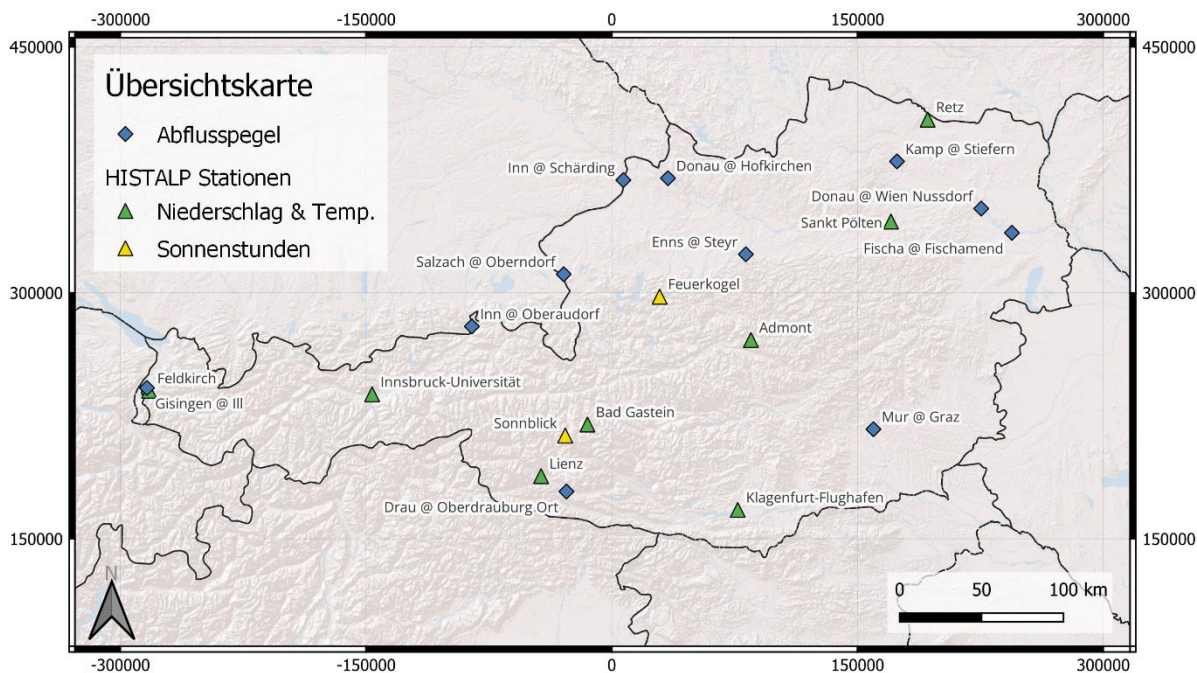


Abbildung 1: Übersichtskarte der verwendeten HISTALP Station und Abflusspegel.

2.1.1 Temperatur

Als Datengrundlage für die Analyse von Temperatur und Niederschlag wurden Zeitreihen aus dem HISTALP-Datensatz (GeoSphere Austria, Böhm et al. 2009) verwendet. Aufgrund der sehr langen und homogenisierten Stationszeitreihen eignet sich dieser Datensatz optimal für die Analyse vergangener Trends. Insgesamt wurden 8 Stationen ausgewählt, wobei jeweils zwei Standorte eine Region Österreichs repräsentieren:

- Nord: Retz, Sankt Pölten
- Zentral: Admont, Bad Gastein
- Süd: Klagenfurt, Lienz
- West: Innsbruck, Feldkirch

Ein Überblick der ausgewählten Standorte ist in Abbildung 1 zu dargestellt. Die zwei Referenzperioden umfassen jeweils einen Zeitraum von 30 Jahren, wobei das Klima der Vergangenheit durch die Periode von 1961–1990 und das der Gegenwart von 1991–2020 repräsentiert wird.

Die Auswertungen der durchschnittlichen jährlichen Lufttemperatur zeigt einen signifikanten positiven Trend für alle acht ausgewählten Stationen. Abbildung 2 zeigt die Anomalien der einzelnen Stationen von 1961–2022 im Vergleich zum jeweiligen langjährigen Mittelwert der Station. Zu erkennen ist eine positive Anomalie unabhängig von Höhenlage oder Standort. Speziell ab den 90er Jahren finden sich kaum noch Jahre, die unter dem langjährigen Mittel liegen. Dieser Anstieg der Temperatur spiegelt sich in einer erhöhten Verdunstung, längeren Vegetationsperiode sowie einer früheren Schneeschmelze wider.

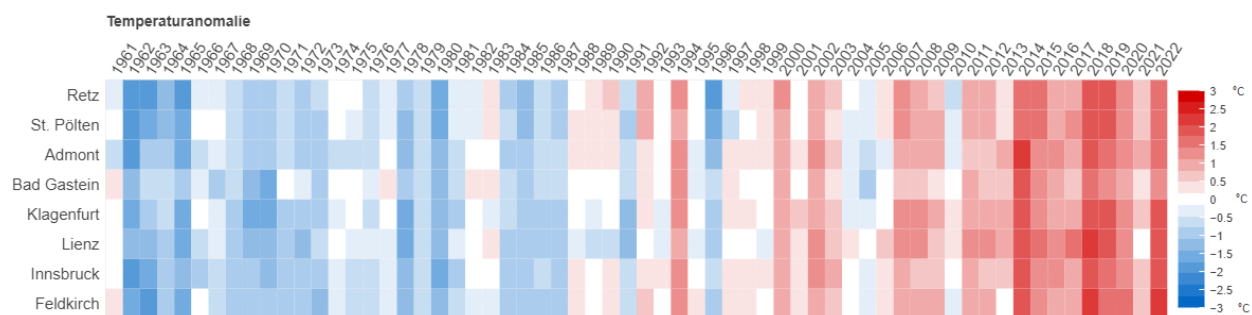


Abbildung 2: Temperaturanomalie pro Jahr (in °C) im Vergleich zum langjährigen Mittel jeder Station von 1961 – 2022. Rot markiert überdurchschnittlich heiße Jahre wohingegen die Farbe Blau auf eher kühlere Jahre hindeutet.

Detaillierte Trendanalysen der einzelnen Stationen befinden sich in Anhang A 2.1.1.

2.1.2 Niederschlag

Ein weniger klares Bild ist bei der Auswertung des Niederschlages zu erkennen (Abbildung 3). Generell lässt sich ein leichter Anstieg der gemessenen jährlichen Niederschlagssummen feststellen, wobei dieser Trend nicht bei allen Stationen signifikant ist. Gegliedert nach Regionen lassen sich folgende Änderungen feststellen:

Nord:

Die Station Retz, im Norden des Weinviertels nicht weit der Grenze zu Tschechien, zeigt keine signifikante Veränderung der Niederschlagssummen. In Sankt Pölten, etwas weiter südlich, ist ein positiver Trend zu beobachten. Weiters nimmt hier auch die interannuelle Variation zu.

Süd:

Im Süden Österreichs verzeichnet keine der beiden gewählten Stationen (Lienz und Klagenfurt Flughafen) einen signifikanten Anstieg des Niederschlages. Die Variabilität der Niederschlagssummen zwischen den einzelnen Jahren nimmt minimal zu.

Zentral:

In Admont, gelegen im Norden der Obersteiermark im Bezirk Liezen, sowie im Salzburger Ort Bad Gastein ist ein deutlicher Anstieg des Jahresniederschlag, bei gleichbleibender Variabilität, zu beobachten.

Westen:

Im Inntal, Station Innsbruck-Universität, zeigt sich ein positiver Trend im Niederschlag. Im Vorarlberger Feldkirch hingegen, ist ein minimaler, aber nicht signifikanter Rückgang zu beobachten.

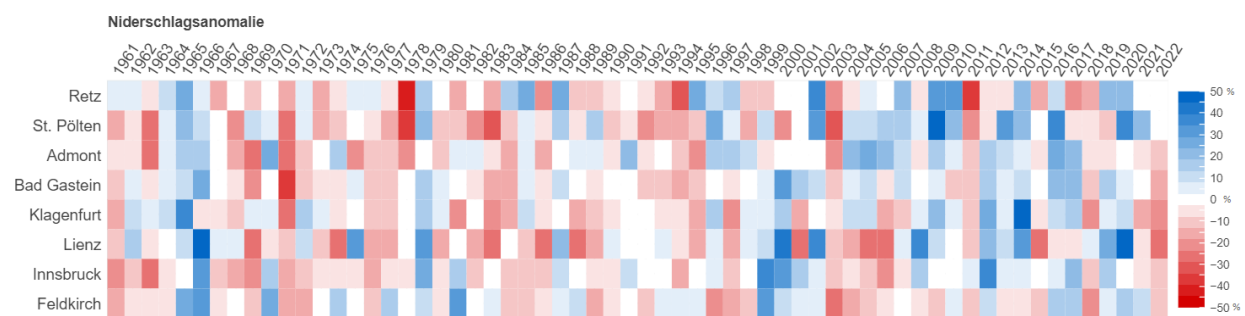


Abbildung 3: Niederschlagsanomalie pro Jahr (in %) im Vergleich zum langjährigen Mittel jeder Station von 1961 – 2022. Die Farbe Rot deutet auf ein eher trockenes Jahr hin. In Blau sind Jahre mit überdurchschnittlichem Niederschlag.

Detaillierte Trendanalysen der einzelnen Stationen befinden sich in Anhang A 2.1.1.

Die hier für einzelne Stationen durchgeführte Analyse deckt sich mit Ergebnissen von Chimani et al. (2016, Abbildung 4) für ganz Österreich, wobei die betrachteten Referenzperioden leicht voneinander abweichen. In vielen Teilen Österreichs gab es über die letzten Jahrzehnte eine Zunahme des Niederschlags. Davon ausgenommen sind lediglich Regionen im Süden sowie in Vorarlberg, wo keine signifikante Veränderung zu beobachten ist.

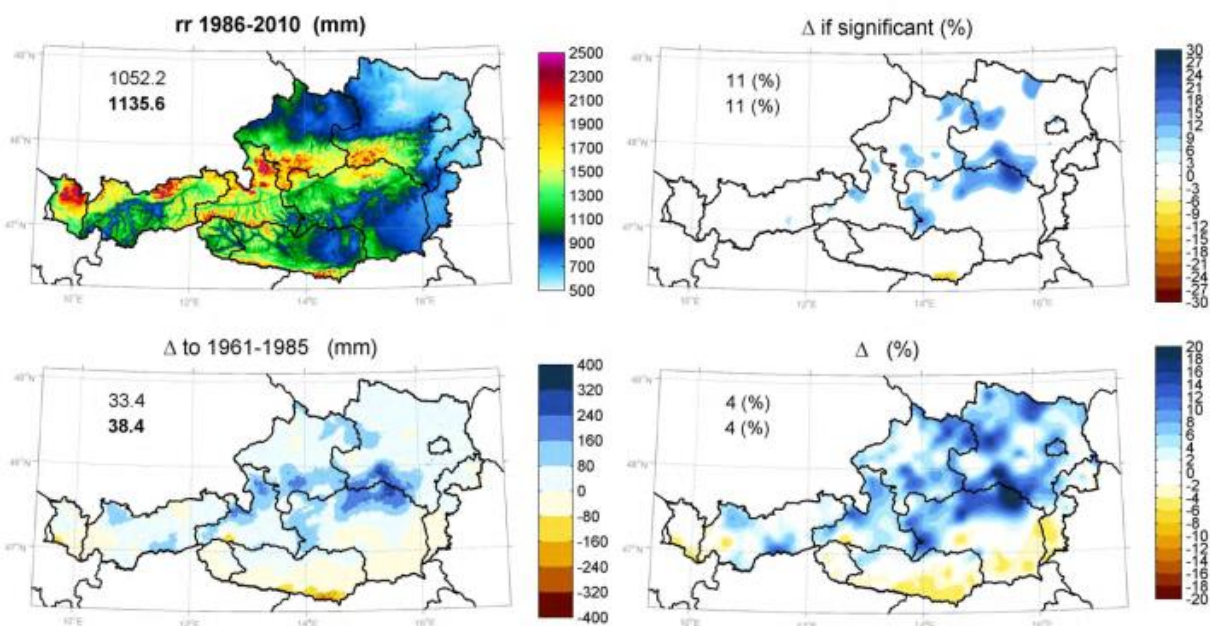


Abbildung 4: Beobachtete Veränderung des Niederschlags in Österreich (Chimani et al. 2016). Durchschnittlicher Jahresniederschlag für die Periode 1986 - 2010 (links oben); Unterschied des durchschnittlichen Jahresniederschlags (1986 - 2010) zur Periode 1961 - 1985 (links unten); Unterschied der zwei Perioden wenn Signifikant (rechts oben); Unterschied der zwei Perioden in Prozent (rechts unten).

Die Variabilität in den Niederschlagssummen der einzelnen Jahre ist an den Stationen im Norden sowie im Süden angestiegen, nicht aber in Zentral- und Westösterreich. Insgesamt zeigt sich kein deutlicher Trend zu extremeren Schwankungen zwischen feuchten und trockenen Jahren in den Niederschlagsdaten.

In den Niederschlagsintensitäten der Tagesniederschläge zeigt sich in vielen Gebieten der Alpen und Mitteleuropas bereits ein signifikanter ansteigender Trend (Zeder und Fischer 2020). An österreichischen Stationen sind Trends in den Niederschlagsmaxima weniger eindeutig und nicht signifikant. Saisonal zeigen sich tendenzielle keine Änderung der jährlichen Niederschlagsmaxima im Herbst und Winter, jedoch gebietsweise im Frühling und Sommer (regional auch signifikant, tendenziell mit Zunahmen im Norden und Abnahmen im Süden Österreichs siehe Abbildung 40 in Anhang A 2.1.1 aus Chimani et al. 2016). Über das Gesamtjahr hat in den letzten Jahrzehnten in Österreich die Häufigkeit von schwachen oder moderaten

Niederschlagstagen abgenommen und jene von starken bis extremen Niederschlagstagen zugenommen (Abbildung 5, Chimani et al. 2016).

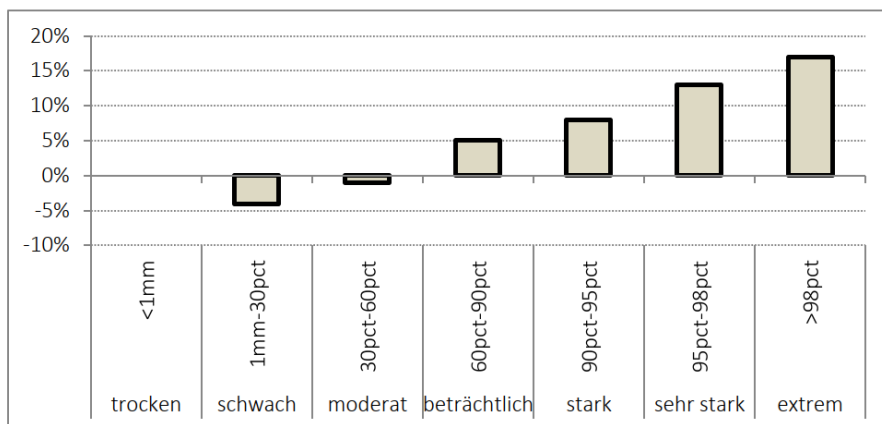


Abbildung 5: Beobachtete Veränderung der Häufigkeit von Niederschlagstagen unterschiedlicher Intensität zwischen 1961-1985 und 1986-2010 in Österreich (Quelle: Chimani et al. 2016).

2.1.3 Schnee

Die Menge, aber auch die Dauer, über die Wasser in Form von Schnee an der Oberfläche gespeichert wird, hat große Auswirkungen auf das gesamte hydrologische System in Österreich. Durch die natürliche Speicherwirkung trägt der im Winter als Schnee gefallene Niederschlag erst in den wärmeren Monaten zum Abfluss bei. Ein Rückgang der Schneedecke würde somit zu einer saisonalen Verschiebung des Abflusses führen. Aber auch für den Energiehaushalt ist eine langanhaltende Schneedecke von großer Bedeutung. Weißer Schnee reflektiert einen hohen Prozentanteil der Sonneneinstrahlung und verhindert dadurch, dass diese Energie von der Erdoberfläche adsorbiert wird. In hochalpinen Regionen profitieren Gletscher bis weit in den Sommer hinein von diesem natürlichen Strahlungsschutz.

Betrachtet man die Entwicklung der Temperatur über die letzten Jahrzehnte überrascht es wenig, dass die Dauer und die mittlere Höhe der saisonalen Schneedecke in Österreich rückläufig ist. In Abbildung 6 veranschaulicht ist der saisonale Trend der mittleren Schneehöhe über die Monate November bis April.

Bis auf wenige sehr hoch gelegene Regionen zeigt sich ein einheitlicher negativer Trend in ganz Österreich, größtenteils signifikant. Keine einzige Beobachtungszeitreihe (1962-2020) der untersuchten Stationen zeigt einen signifikanten positiven Trend und somit einen Anstieg der mittleren Schneehöhe (Abbildung 6 und Abbildung 41 in Anhang A 2.1.3). Die Stärke der negativen Änderung nimmt mit zunehmender Seehöhe ab. Grund dafür ist, dass mit zunehmender Seehöhe der Einfluss der Lufttemperatur auf die Entwicklung der winterlichen Schneedecke abnimmt – weil in den entsprechenden

Regionen immer noch sehr lange Zeiträume mit Temperaturen unter 0°C auftreten – und die Niederschlagssumme an Bedeutung gewinnt (Abbildung 42 in Anhang A 2.1.3).

Für die Abflussbildung bedeutet die kürzere Schneedecke einerseits ein früheres Einsetzen der Schneeschmelze im Frühling, andererseits höhere Abflussbeiträge an flüssigem Niederschlag im Herbst.

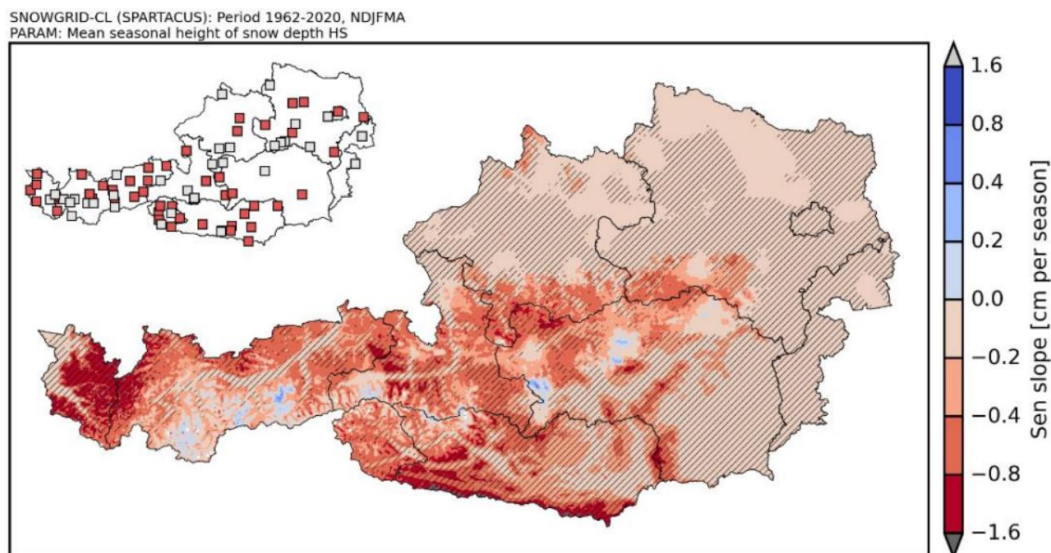


Abbildung 6: Berechnete Karte des Trends der mittleren saisonalen (November bis April) Schneehöhe in Österreich von 1962 – 2020. Gestreift schattierte Flächen markieren einen signifikanten Trend. Die kleinere Karte links oben zeigt beobachtete Trends der einzelnen Stationen für die gleiche Periode (SNOWPAT Datensatz), wobei rot eingefärbte Stationen einen signifikanten Trend markieren. (Quelle: Olefs et al., 2020)

2.1.4 Gletscher

Aufgrund der Tatsache, dass der Anteil der Gletscherschmelze am Gesamtabfluss nicht (oder nur mit sehr komplexen Methoden) gemessen werden kann, ergeben sich relevante Unsicherheiten bei der Einschätzung dieser Größe. Koboltschnig und Schöner (2011) geben eine Übersicht über verschiedene Abschätzungen (Abbildung 7). Im langjährigen Mittel beträgt der Gletscherschmelzebeitrag am Jahresabfluss zwischen 5% für stark vergletscherte Einzugsgebiete und nur geringfügigen Beiträgen unter 1% für die gesamten Einzugsgebiete von Inn und Salzach. Kling et al. (2011) zeigen in Simulationen für Inn und Donau im langjährigen Mittel einen Anteil der Gletscherschmelze ab August-Abfluss von 5% für den Inn (am Pegel Oberaudorf) bzw. weniger als 2% für die Donau (bei Wien). In trockenen, heißen Sommermonaten erhöht sich dieser Anteil am August-Abfluss laut Kling et al. (2011) auf bis zu 20%. Koboltschnig und Schöner (2011) zeigen für den extrem heißen und trockenen Sommer 2003 einen Gletscherabflussbeitrag zum August-Abfluss der Salzach von über 50% (am Pegel Mittersill mit ca. 5% Gletscherflächenanteil).

Grundsätzlich hängt der Beitrag der Gletscherschmelze also vom Anteil der Gletscherfläche im Gebiet, von der Höhenlage der Gletscher, aber auch von Niederschlag (Schneebedeckung) und Temperatur im betrachteten Zeitraum ab. Obwohl insgesamt und im langjährigen Mittel der Beitrag der Gletscherschmelze auf den Abfluss, auch für alpine Flüsse, als sehr gering eingeschätzt werden kann, hat die Gletscherschmelze doch eine relevante Bedeutung im Sommer. Vor allem in heißen, trockenen Sommermonaten (wie z.B. 2003) kann der dann höhere Beitrag der Gletscher den geringeren Abfluss aus Schneeschmelze und Regenfällen kompensieren.

Im Verlauf der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts hat die Bedeutung des Gletscherabflusses aufgrund der steigenden Temperaturen tendenziell zugenommen, mit dem fortschreitenden Rückgang der Gletscherflächen wird die Bedeutung in den nächsten Jahrzehnten aber wieder abnehmen (Kling et al. 2011). Ab wann es zu einer Abnahme des Gletscherabflusses kommen wird im Zusammenhang mit Projektionen für die Zukunft in Kapitel 3.1.4 diskutiert.

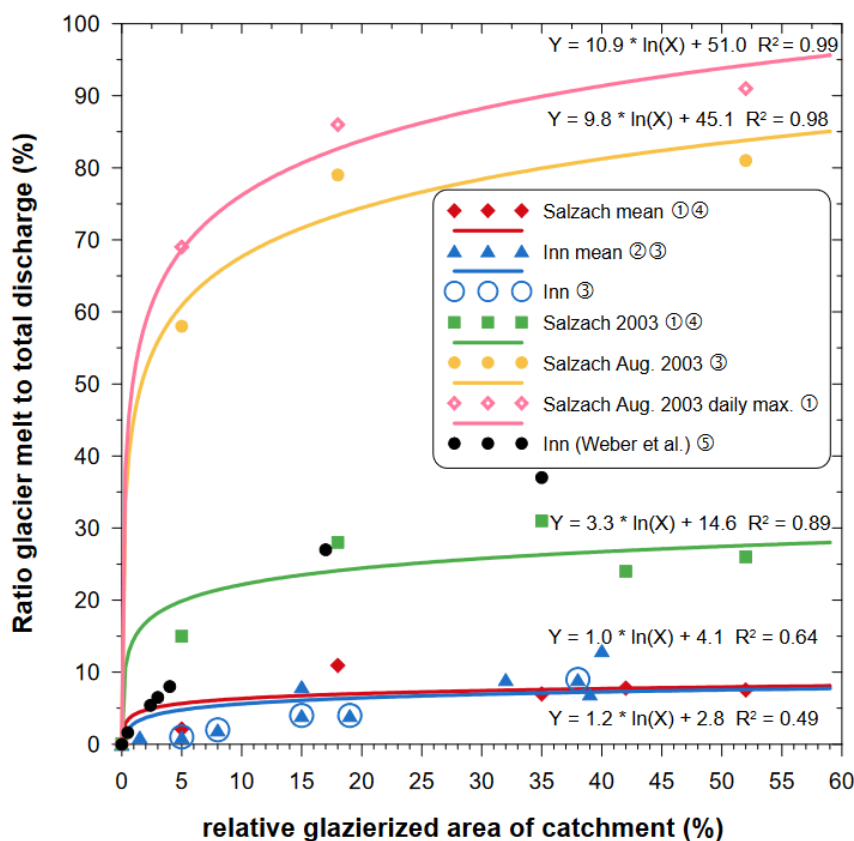


Abbildung 7: Verhältnis zwischen dem Anteil vergletschelter Fläche (% , x-Achse) und dem Beitrag der Gletscherschmelze zum Abfluss (% , y-Achse), aus verschiedenen Quellen für Salzach und Inn für verschiedene Perioden: Salzach im langjährigen Mittel (rot), Inn im langjährigen Mittel (blau), Salzach im Jahr 2003 (grün), Salzach im August 2003 (gelb), Maximalwert für die Salzach im August 2003 (rosa), Werte von Weber et al. 2009 (schwarz) sind deutlich höher als die anderen Schätzungen.

Fakt ist, dass die Gletscherflächen über die letzten Jahrzehnte bereits stark zurückgegangen sind. Abbildung 8 zeigt die noch vergletscherte Fläche der Großglocknergruppe (45.6 km², Stand 2015) und die bereits verlorenen (23.3 km², seit 1969). In Tabelle 2 gelistet ist die Entwicklung der Gletscherflächen ausgewählter Regionen in Österreich über die letzten 50 Jahre, wobei alle Analysen einen deutlichen Rückgang zeigen. Abbildungen zu den gelisteten Gebirgsregionen finden sich im Anhang A 2.1.4. Es kann davon ausgegangen werden, dass die erhöhte Gletscherschmelze in diesen Gebieten, mit beobachtetem Rückgang der Gletscherflächen, zu höheren Abflüssen in den Sommermonaten geführt hat (wobei das Ausmaß der zusätzlichen Beiträge in jedem Gebiet unterschiedlich und vom Grad der Vergletscherung und den spezifischen Gletscherverhältnissen abhängt).

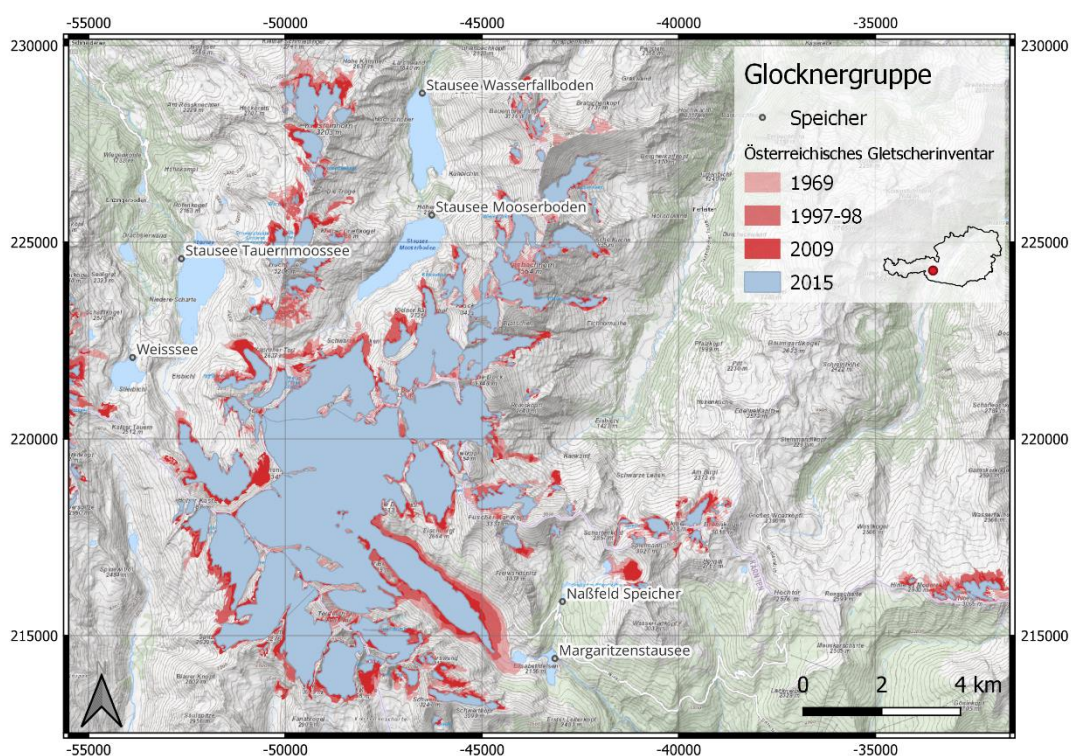


Abbildung 8: Rückgang der Gletscherflächen im Großglockner-Gebiet von 1969 bis 2015 (The Austrian Glacier Inventory; Fischer et al., 2015).

Tabelle 2: Gletscherflächen (in km²) ausgewählter Regionen in Österreich und deren Entwicklung über die letzten Dekaden. Die Flächen wurden abgeleitet aus den Daten des Austrian Glacial Inventory (Fischer et al., 2015)

Name	GI 1 (1969)	GI 2 (1997-98)	GI 3 (2006-12)	GI 4 (2015)
Ankogel-Hochalmspitzgruppe	19.4	16.2	12.1	9.5
Sonnblickgruppe	12.8	9.8	8.1	5.4
Glocknergruppe	68.9	59.8	51.7	45.6
Zillertaler Alpen	65.6	50.6	45.2	34.5
Ötztaler Alpen	187.7	159.7	137.4	113.1

2.1.5 Strahlung und Wind

2.1.5.1 Strahlung

Die Analyse der Sonnenscheindauer an zwei ausgewählten Standorten (Feuerkogel, Sonnblick) zeigt eine ähnliche Entwicklung wie die der Temperatur. An beiden Standorten ist eine deutliche Zunahme der Sonnenscheindauer zu beobachten. Die Daten zeigen eine erste leichte Zunahme in den Nachkriegsjahren der späten 1940er und frühen 1950er-Jahre. Anschließend an diese Periode lässt sich ein Rückgang in den Jahressummen des Sonnenscheins beobachten, der auf das Phänomen des „Global Dimming“ zurückgeführt werden kann, d.h. auf den Anstieg von Partikeln aufgrund der steigenden Luftverschmutzung. Global nimmt mit dem Rückgang der Luftverschmutzung in den 1980er-Jahren die Sonneneinstrahlung seit ca. 1990 wieder zu. An den untersuchten österreichischen Stationen gab es rund um 1990 besonders viel Sonnenschein und seither einen deutlichen Anstieg, wobei die Jahre 2003 und 2011 herausragen. Seit ca. 2010 gibt es keinen weiteren Anstieg der langjährigen mittleren Sonneneinstrahlung mehr.

Der Anstieg der Strahlung hat weitreichende Auswirkungen auf den Naturraum. Speziell in höheren Lagen wird die Schneeschmelze und in weiterer Folge auch das Abschmelzen der Gletscher beschleunigt. In tieferen Lagen führt die erhöhte Strahlung in Kombination mit dem Anstieg der Temperatur zu einer höheren Verdunstungsrate, was sich in bestimmten Einzugsgebieten bereits im Abflussvolumen widerspiegelt.

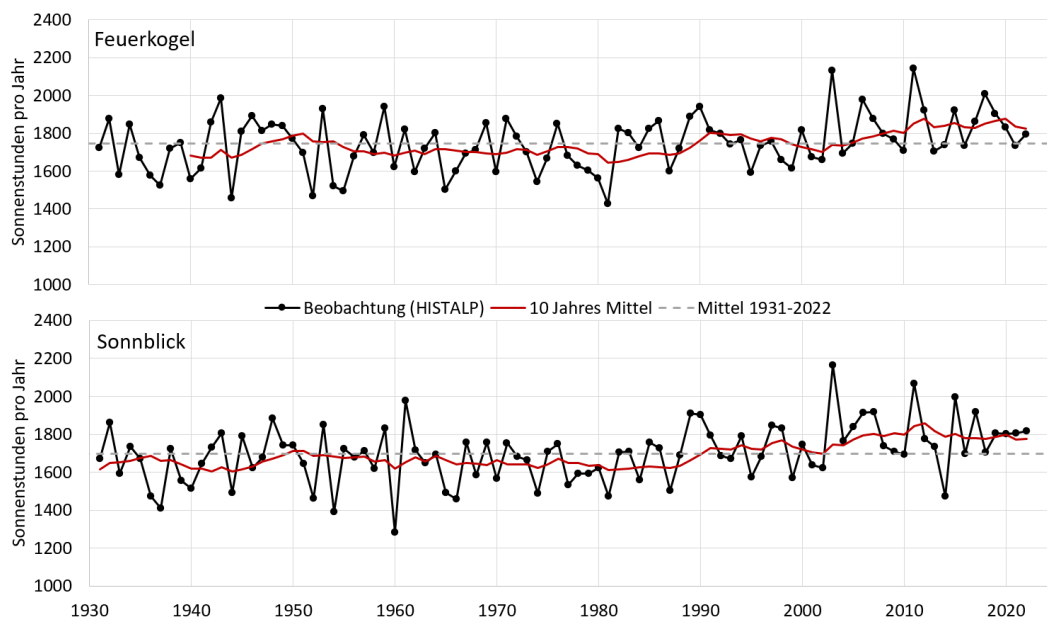


Abbildung 9: Beobachtete Sonnenstunden pro Jahr von 1930 bis 2022 an den HISTALP Stationen Feuerkogel (oben) und Sonnblick (unten). Speziell in den letzten 35 Jahren ist ein deutlicher Anstieg an beobachteten Sonnenstunden zu erkennen. Beide Stationen zeigen in den Jahren 2003 und 2011 Werte weit über dem langjährigen Mittel.

2.1.5.2 Wind

Konträr zur positiven Entwicklung der Temperatur oder der Strahlung gab es in der 30-jährigen Periode von 1979-2008 einen deutlichen Rückgang der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit über Land in der nördlichen Hemisphäre (gemessen in 10 m über Grund, Vautard et al., 2010). Lange Messreihen weisen auf eine längerfristige Abnahme seit etwa 1960 hin. Parallel zu den mittleren zeigt sich auch ein negativer Trend bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten. Diese generelle Reduktion führen Vautard et al. (2010) auf eine Zunahme der Oberflächenrauigkeit aber auch auf eine Änderung der atmosphärischen Zirkulation zurück. Auswertungen von Messungen in höheren Lagen (etwas über 1500 m Seehöhe oder auf der 850-hPa-Druckfläche und darüber) über West- und Nordeuropa zeigen hingegen eine leichte Zunahme der Windgeschwindigkeiten. Abbildung 47 in Anhang A 2.1.5 zeigt den Trend für die analysierten Messstationen.

2.1.6 Abfluss

Im beobachteten Abfluss der letzten Jahrzehnte zeigen sich im Jahresmittel grundsätzlich nur geringe Trends. Schöner et al. (2008, Abbildung 22) zeigten für die Periode 1976-2007 geringe Abnahmen des lokalen Abflusses im Süden Österreichs und im nördlichen Alpenvorland, und geringe Zunahmen in den zentralen alpinen Regionen. Eine Auswertung über die Periode 1951-2000 von Fürst et al. (2008) zeigte dieselben räumlichen Muster (Abbildung 48 in Anhang A 2.1.6).

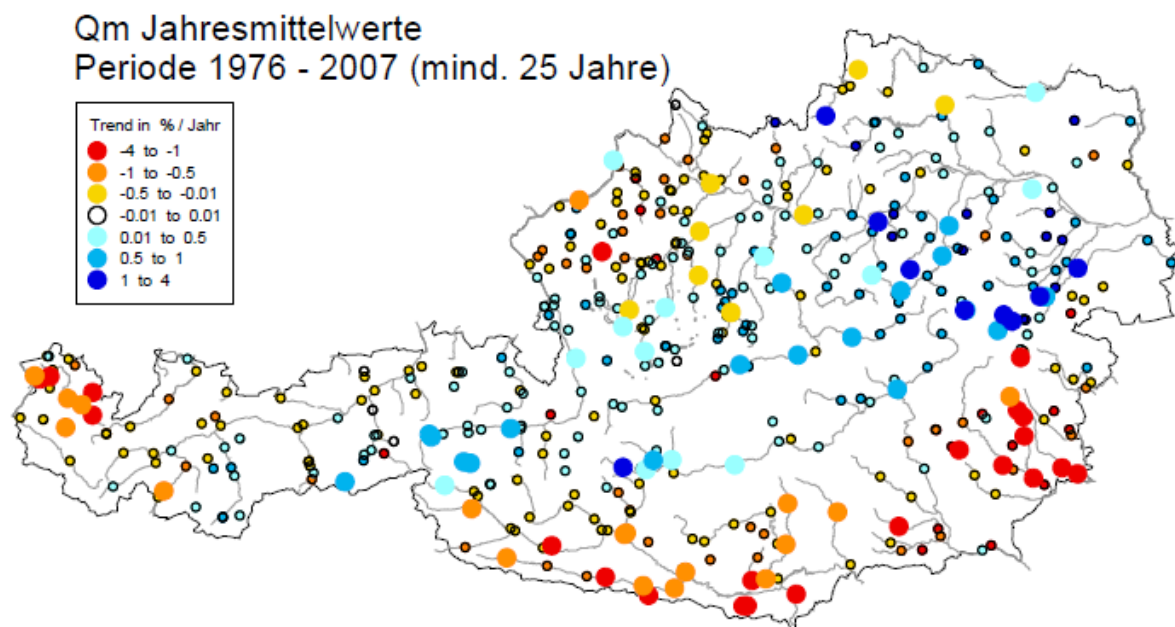


Abbildung 10: Trends im beobachteten Abfluss 1976-2007. Blautöne markieren einen positiven, Rottöne einen negativen Trend. (Quelle: Schöner et al. 2008)

In den regenreicheren Regionen in Zentral- und Südösterreich passen die regionalen Unterschiede im Wesentlichen mit den Trends im Niederschlag (Abbildung 4) zusammen, in den nördlichen Vorlandgebieten scheint die Zunahme der Verdunstung die sehr geringen Zunahmen in den Niederschlägen übertroffen zu haben.

An den Pegeln größerer Flüsse, für die nun Beobachtungsdaten bis 2019 ausgewertet wurden, zeigen sich ebenfalls nur sehr geringe historische Veränderungen (Tabelle 3, Abbildung 11 und Abbildung 49 und Abbildung 50 in Anhang A 2.1.6).

An der Donau bis Wien, die Abflüsse der Gebiete nördlich der Alpen sammelt, waren die Abflüsse der letzten beiden Jahrzehnte relativ niedrig, sodass sich ein geringer (nicht-signifikanter) Trend der Abnahme zeigt (Abbildung 11 oben). Zwischen den Mittelwerten der Perioden 1961-1990 und 1991-2019 betrug der Rückgang rund 2.4% (Tabelle 3). An den österreichischen alpinen Zubringern Inn, Salzach und Enns zeigten sich in denselben Zeiträumen sehr geringe Zunahmen; an der deutschen Donau bei Hofkirchen zeigten sich dementsprechend etwas höhere Abnahmen des Abflusses (Tabelle 3 und Abbildung 49 in Anhang A 2.1.6).

An der Drau, südlich der Alpen, zeigt das Bild ab 1951 (Abbildung 11 unten) einen relativ deutlichen abnehmenden Trend (entsprechend den Ergebnissen von Fürst et al. (2008)). An der Drau waren aber v.a. die 50er- und 60er-Jahre sehr abflussreich, und in den Jahren nach 2000 gab es wieder eine größere Zahl an Jahren mit höheren Abflüssen. Im Vergleich der Perioden 1961-1990 mit 1991-2019 zeigt sich daher nur eine geringe Abnahme von 0.6% (Tabelle 3).

Für Ill, Kamp und Fischa, die als kleinere Flüsse Gebiete im Westen, Norden und Osten Österreichs repräsentieren, entsprechen die Veränderungen bis 2019 den Trends der Periode 1951-2000 aus Fürst et al.: keine Veränderung an der Ill, Abnahme des Abflusses am Kamp, Zunahme des Abflusses an der Fischa (Tabelle 3 und Abbildung 49 und Abbildung 50 in Anhang A 2.1.6).

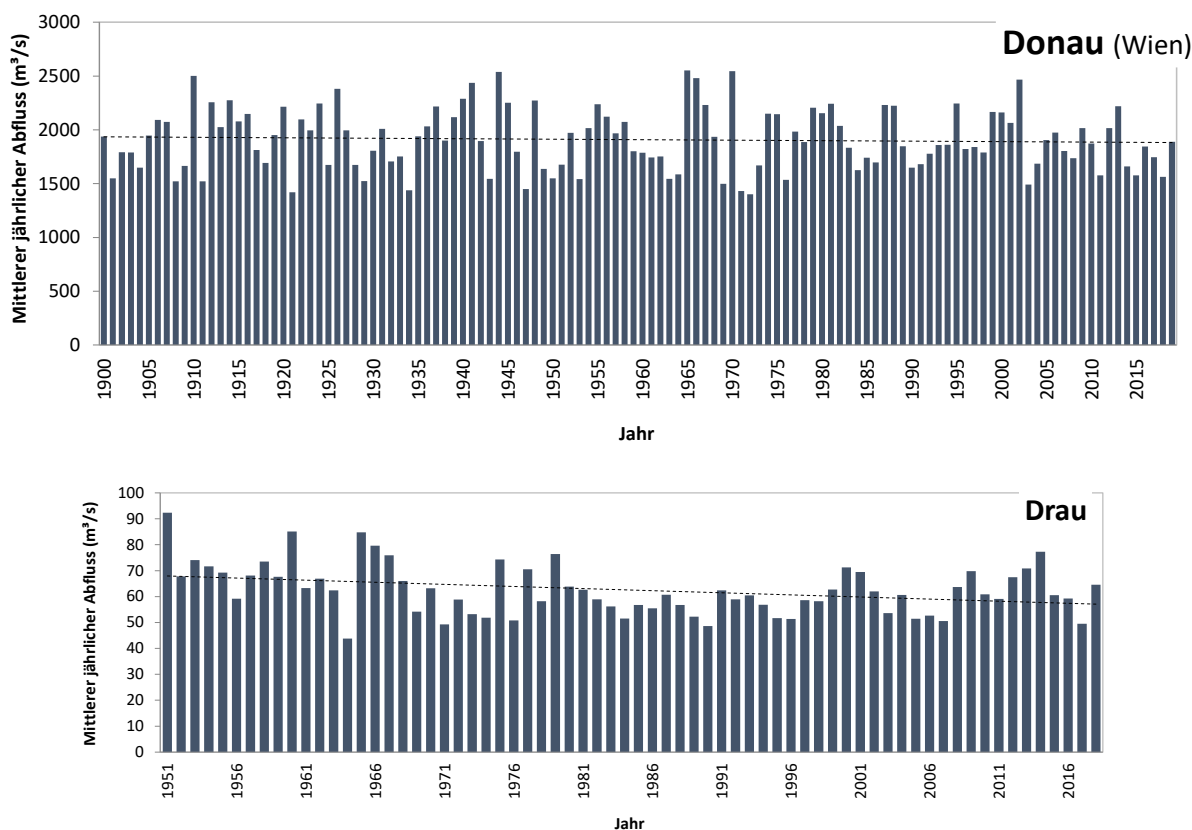


Abbildung 11: Mittlere jährliche Abflüsse an Donau (bei Wien, Pegel Nussdorf/Korneuburg, oben, 1900-2019) und Drau (Pegel Oberdrauburg, unten, 1951-2019) und linearer Trend über die gesamte Periode

Tabelle 3: Änderungen im beobachteten mittleren Abfluss

Fluss (Pegel)	Einzugsgebiet (km ²)	MQ 1961-1990 (m ³ /s)	MQ 1991-2019 (m ³ /s)	Δ MQ (m ³ /s)	Δ MQ (%)
Donau (Wien)	101,73	1918.7	1872.9	-45.8	-2.4
Donau (Hofkirchen)	47,52	652.9	624.3	-28.6	-4.4
Inn (Oberaudorf)	9,71	306.1	300.2	-6.0	-2.0
Inn (Schärding)	25,66	717.9	729.4	11.4	+1.6
Drau (Oberdrauburg)	2,11	60.9	60.5	-0.4	-0.6
Mur (Graz)	6,99	106.4	109.3	3.0	+2.8
Enns (Steyr Ortskai)	5,92	202.4	205.8	3.4	+1.7
Salzach (Oberndorf)	6,12	239.9	241.8	2.0	+0.8
Ill (Gisingen)	1,28	66.0	65.4	-0.6	-0.9
Kamp (Stiefern)	1,49	9.2	8.7	-0.4	-4.8
Fischa (Fischamend)	535	7.4	8.0	0.5	+7.0

Deutlichere und vor allem räumlich einheitlichere Trends zeigen sich in den saisonalen Abflüssen. Fürst et al. (2008) zeigen für das Sommerhalbjahr für fast alle Regionen Österreichs einen Rückgang in den beobachteten Abflüssen der Periode 1951-2000, im Winterhalbjahr einen Anstieg des Abflusses überall außer in den südlichsten und nördlichsten Einzugsgebieten (Abbildung 51 in Anhang A 2.1.6). Diese Veränderungen zeigen sich auch in den Grafiken der Monatsmittelwerte des Abflusses für die Donau und die Drau (Abbildung 13) sowie für alle anderen untersuchten Flüsse (Abbildung 12), mit der Ausnahme der Fischa (Abbildung in Anhang A 2.1.6, der Kamp wurde aufgrund der Beeinflussung des saisonalen Abflusses durch den Speicherbetrieb hier nicht berücksichtigt): zwischen einer Periode in der Vergangenheit und den letzten Jahrzehnten nahmen die Sommerabflüsse ab und die Winterabflüsse zu.

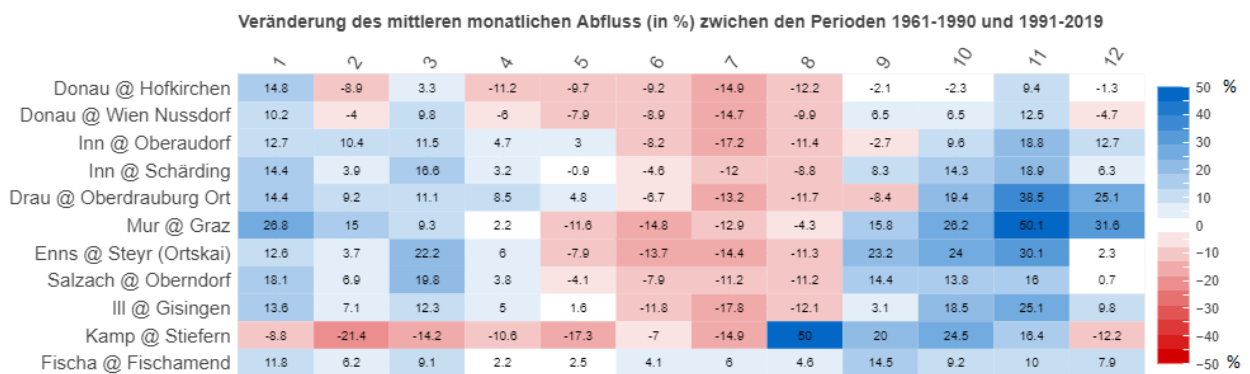


Abbildung 12: Änderung der mittleren monatlichen Abflüsse (in %) ausgewählter Pegel in Österreich zwischen den Perioden 1960 – 1990 und 1991 – 2019. Die überwiegend rot eingefärbten Sommermonate deuten auf einen deutlichen Rückgang des Abflusses hin wohingegen in den restlichen Monaten ein leichter Anstieg zu erkennen ist. Abweichung der Referenzperiode für Enns @ Steyr (1965 – 1990) und Mur @ Graz (1966 – 1990).

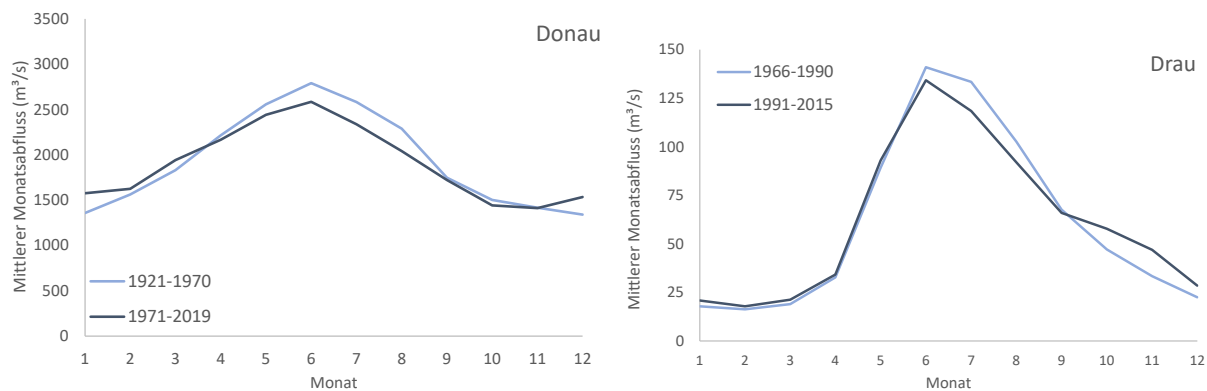


Abbildung 13: Mittlere Monatsbflüsse an Donau (Pegel Nussdorf/Korneuburg, links, für die Perioden 1921-1970 und 1971-2019) und Drau (Pegel Oberdrauburg, rechts, für die Perioden 1966-1990 und 1991-2015). Frühere Perioden in hellblau und spätere in schwarz.

Die Variabilität von Jahr zu Jahr hat an allen untersuchten Pegeln abgenommen, in der Vergangenheit zeigt sich also keine Trend zu einer extremeren Abfolge von trockeneren und feuchteren Jahren.

Im Hochwasser zeigt sich, nach einer Trendauswertung der mittleren Jahreshochwässer in der Periode 1976-2014 bei Blöschl et al. (2018), eine signifikante Zunahme in 29% der kleineren Einzugsgebiete (<500 km²) und in 17% der größeren Einzugsgebiete. Signifikante Abnahmen traten nur an jeweils drei Pegeln kleinerer und größerer Flüsse auf, im Westen und Süden Österreichs. Generell zeigen sich nur in diesen Gebieten abnehmende Hochwasserabflüsse (auch nicht-signifikante, siehe Abbildung 53 in Anhang A 2.1.6).

Im Niederwasser können ebenso an den meisten Pegeln ansteigende Trends in der Periode 1976-2014 beobachtet werden (Blöschl et al. 2018), vor allem in den alpinen Gebieten und Einzugsgebieten über 900 m Seehöhe. In diesen Regionen mit typischerweise im Winter auftretenden Niederwasserereignissen führen höhere flüssige Anteile am Winterniederschlag zu Zunahmen im Niederwasser. In den niedrigeren Regionen traten Rückgänge im Niederwasser vor allem in Oberösterreich auf.

2.2 Auswirkungen auf die Wasserkraft

Im folgenden Kapitel wird die Auswirkung des Wasserdargebots auf die Wasserkraft untersucht. Für die Laufkraftwerke zeigt sich eine starke Abhängigkeit zwischen generierter Leistung und der Menge an Abfluss in einem Jahr. Nichtsdestotrotz zeigen die hier untersuchten Kraftwerke (KW Greifenstein an der Donau und KW Paterion an der Drau), dass sowohl sehr feuchte, aber auch sehr trockene Jahre energetisch gut genutzt werden können. Die Turbinenkonfigurationen erlauben eine hohe Flexibilität, die Hochwasser-Verluste bei hohen Abflüssen minimal hält und ebenfalls sehr geringe Wassermengen mit gutem Wirkungsgrad noch energetisch nutzen kann.

Für die ausgewählten Pumpspeicherkraftwerksgruppen lässt sich kein Trend im Zufluss beobachten. Erkennbar hingegen ist der Einfluss der geografischen Lage (Nordstau- oder Südstau-Lage) die im weiteren Sinne maßgebend für die Menge an verfügbarem Wasser ist.

2.2.1 Laufkraftwerke

Für die generierte Leistung eines Laufkraftwerks ist in erster Linie die Menge an verfügbarem Wasser ausschlaggebend. Bei nahezu konstanter Fallhöhe steht der durch die Turbinen abgeführte Abfluss in direkter Beziehung zur generierten Leistung (Abbildung 14). Diese einfache Beziehung, sowie die Kenntnis über die Eigenschaften des Kraftwerkes, erlaubt eine Abschätzung der Auswirkungen von Wasserverfügbarkeit auf die generierte Leistung.

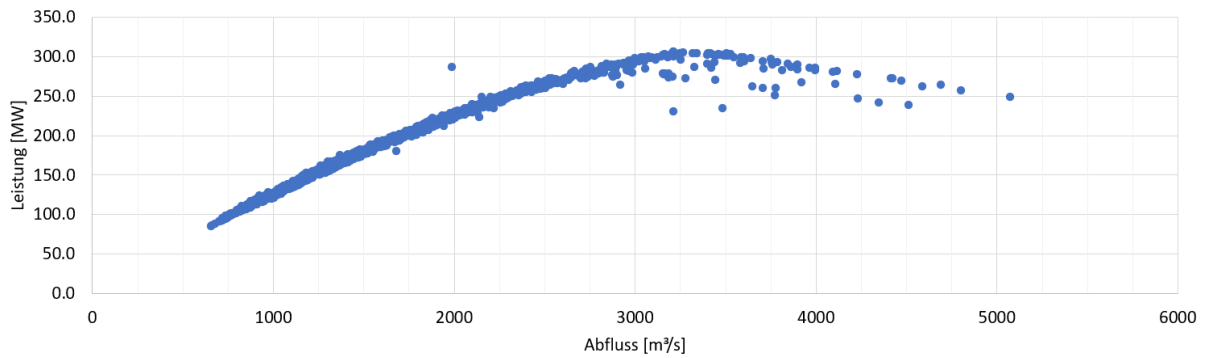


Abbildung 14: Beziehung zwischen durchschnittlich täglichem Abfluss (Pegel Donau @ Kienstock) und der durchschnittlich täglich generierten Leistung des Donaukraftwerks Greifenstein (entso-e Erzeugungsdaten). Die generierte Leistung steigt mit zunehmendem Abfluss bis der Ausbaudurchfluss von 3150 m³/s erreicht ist. Der anschließende Leistungsabfall ist auf den Wehrbetrieb im Hochwasserfall und der damit einhergehenden Änderung der Fallhöhe zurückzuführen.

Energetisch genutzt werden kann die Menge an Wasser, die maximal durch alle verbauten Turbinen abgeführt werden kann. Übersteigt der natürliche Abfluss diesen Wert, muss das restliche Wasser über die Hochwasserentlastungsanlage abgeführt werden. Sehr hohe Abflüsse führen meist zu einer geringeren Produktion, da durch den Wehrbetrieb im Hochwasserfall die Fallhöhe reduziert wird (Abbildung 14, Abflüsse > 3500 m³/s). Der minimal nutzbare Abfluss ist von der Turbinenanzahl sowie Art und Geometrie der Turbineneinheit abhängig.

Die folgenden Grafiken (Abbildung 15 und Abbildung 16) zeigen den theoretisch energetisch nutzbaren Abfluss für die Kraftwerke Greifenstein (Donau) und Paternion (Drau) in Abhängigkeit zur Abweichung des durchschnittlich jährlichen Abflusses zum langjährigen Mittel. Erkennbar ist eine starke Korrelation zwischen energetisch nutzbarer und der zur Verfügung stehenden Menge an Wasser in jedem Jahr. Diese Korrelation deutet darauf hin, dass diese Kraftwerke sowohl sehr feuchte als auch sehr trockene Jahre gut nutzen können und nur sehr wenig Wasser ungenutzt abgeben müssen. Diese Flexibilität zeigt sich vor allem an den Donaukraftwerken, hier am Beispiel Greifenstein (Abbildung 15). Die 9 Turbinen zu je 350 m³/s erlauben einen durchgehenden Betrieb in trockenen Jahren und minimieren die Verluste in sehr feuchten. Ein Trend zu mehr oder weniger Abfluss ist an keinem der Standorte erkennbar.

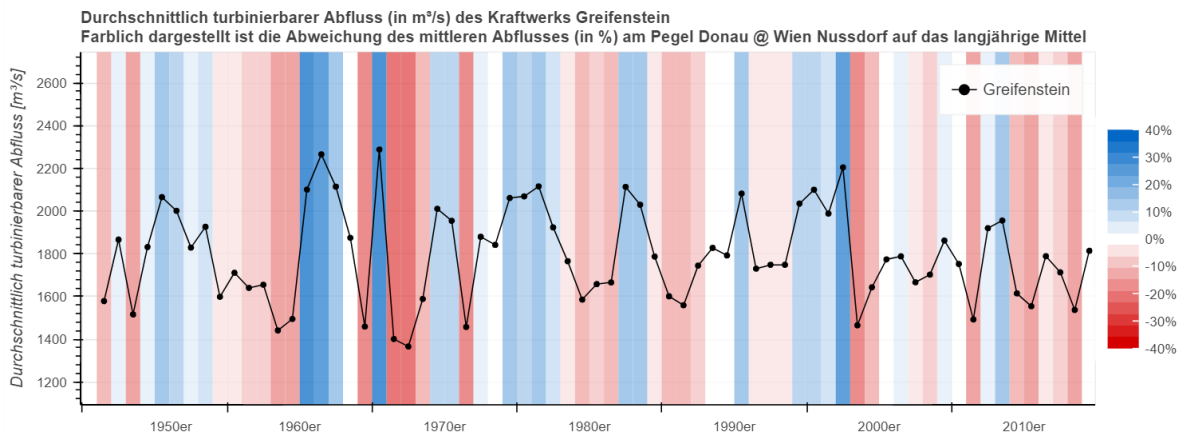


Abbildung 15: Theoretisch energetisch nutzbarer Abfluss des Kraftwerks Greifenstein (Ausbaudurchfluss: 3150 m³/s) mit der farblich dargestellten Abweichung des durchschnittlichen jährlichen Abflusses zum langjährigen Mittel der Donau am Pegel Wien Nussdorf.

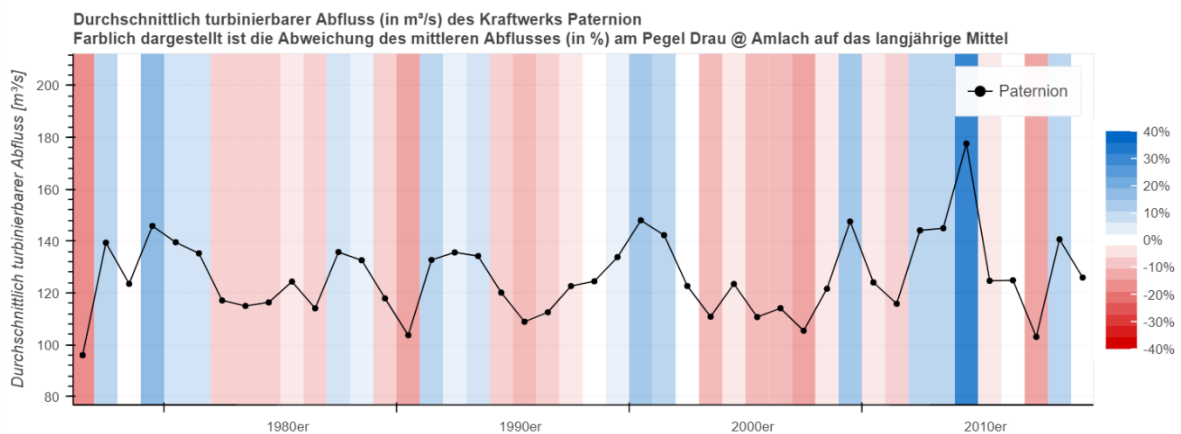


Abbildung 16: Theoretisch energetisch nutzbarer Abfluss des Kraftwerks Paternion (Ausbaudurchfluss: 320 m³/s) mit der farblich dargestellten Abweichung des durchschnittlichen jährlichen Abflusses zum langjährigen Mittel der Drau am Pegel Amlach.

Daten der Menge an tatsächlich energetisch genutztem Wasser (Durchfluss durch Turbinen) standen nur für das Kraftwerk Langkampfen am Inn zur Verfügung (Abbildung 17). Dargestellt mit der jährlichen Abweichung zum langjährigen Mittel am Pegel Oberaudorf lässt sich eine sehr hohe Korrelation zwischen genutztem Abfluss und Gesamtabfluss erkennen. Ein Trend im Wasserdargebot ist auch an diesem Standort nicht zu erkennen. Interessant ist, dass die Abweichungen auf das langjährige Mittel im letzten Jahrzehnt sehr gering sind, und somit auf durchschnittliche Abflussmengen hindeuten. Betrachtet man den Abfluss an der Donau über denselben Zeitraum, zeigt sich, dass hier die Abflüsse zumeist unter dem langjährigen Mittel liegen. Dieser Unterschied könnte auf die höheren Temperaturen und der damit höheren Verdunstung zurückzuführen sein, die sich speziell in den flacheren Regionen der Donau-Einzugsgebiete im Abfluss bemerkbar macht.

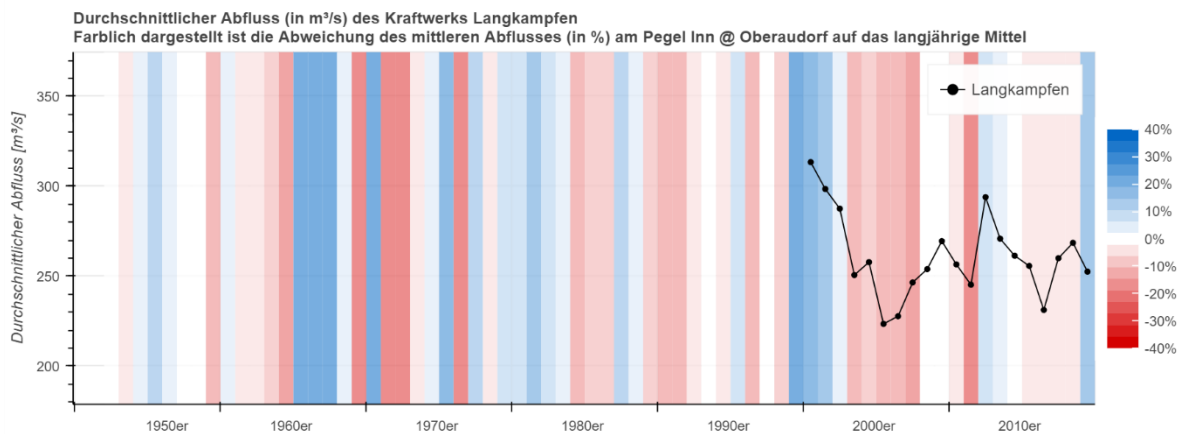


Abbildung 17: Tatsächlich energetisch genutzter Abfluss des Kraftwerks Langkampfen (Daten: TIWAG) mit der farblich dargestellten Abweichung des durchschnittlichen jährlichen Abflusses zum langjährigen Mittel des Inn am Pegel Oberaudorf.

2.2.2 Speicherkraftwerke

Die großen Speicher- und Pumpspeicherkraftwerksketten sind ein essenzieller Teil der österreichischen Energieversorgung. Durch ihre große Speicherkapazität und Flexibilität im Betrieb, helfen sie dabei das Stromnetz zu stabilisieren, Niederwasser für die unterhalb liegenden Laufkraftwerke zu erhöhen und überschüssigen Strom in Form von kinetischer Energie zu speichern. Trotz der großen Speicherkapazität und Überleitungen aus Nachbartälern sind auch die größten Speicher von dem Wasserdargebot abhängig.

Ähnlich wie bei den Laufkraftwerken zeigen die folgenden Abbildungen (Abbildung 18, Abbildung 19 und Abbildung 20) den durchschnittlich jährlichen Abfluss an der Hauptstufe der jeweiligen Kraftwerksgruppe (Zemm-Ziller, Kaprun, Malta). Repräsentativ für die verfügbare Menge an Wasser ist die farblich dargestellte Abweichung auf das langjährige Mittel an ausgewählten Ersatzpegel. Die Ersatzpegel befinden sich in unmittelbarer Nähe der Einzugsgebiete und verfügen über eine lange Beobachtungsreihe, die Langzeittrends ersichtlich macht. Um sicherzustellen, dass die Ersatzpegel repräsentativ sind, wurden sie mit kürzeren Zuflussdaten der einzelnen Kraftwerksgruppen korreliert (Anhang A 2.2). Für die folgende Analyse wurden die Jahreswerte auf das hydrologische Jahr bezogen (1. Oktober bis 30. September).

Ähnlichkeit im Wasserdargebot ist zwischen der Zemm-Ziller (Abbildung 18) und der Kaprun-Gruppe (Abbildung 19) zu erkennen. Beide Einzugsgebiete sind Täler nördlich des Alpenhauptkammes. Das Malta-Tal (Abbildung 20) hingegen liegt in Südostalage, wo meist feuchte Luft aus Italien den Regen bringt. Ein klarer Trend zu mehr oder weniger Abfluss ist in keinem der Gebiete zu erkennen.

Schwächer, aber vorhanden, ist eine Korrelation zwischen feuchten und trockenen Jahren mit dem gemessenen Abfluss an der Hauptstufe. Anhand der vorliegenden Daten für Kaprun (Abbildung 19) ist gut zu erkennen, dass sich in normalen bis feuchten Jahren ein Abfluss von ca. 9 m³/s einstellt. In trockenen Jahren wird dieser meist nicht

ganz erreicht. Das Jahr 2003 sticht mit einem besonders hohen Abfluss heraus, der wahrscheinlich auf Arbeiten an einem neuen Druckrohrschacht zurückzuführen ist. Einen ähnlich hohen Wert verzeichnet die Malta-Hauptstufe in diesem Jahr. Der Grund dafür ergibt sich aus den zur Verfügung stehenden Daten allerdings nicht.

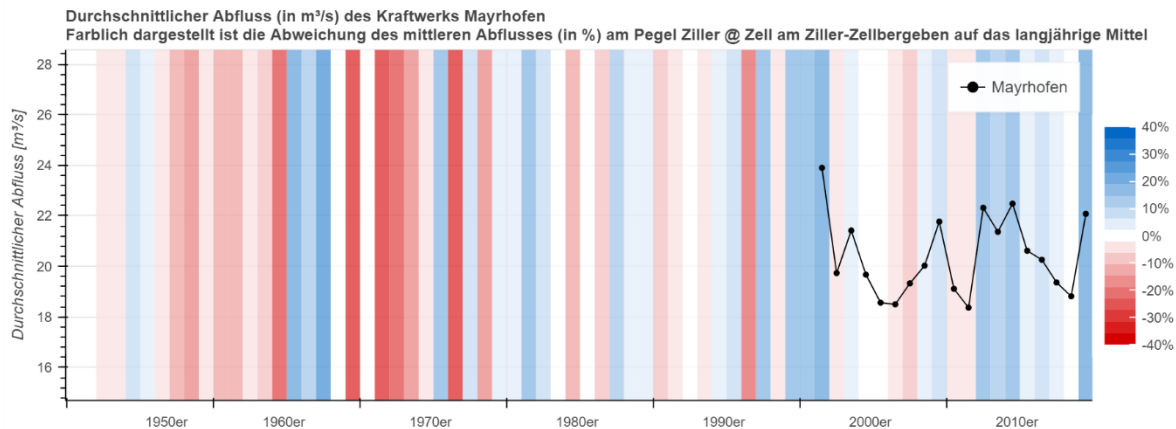


Abbildung 18: Abfluss des Kraftwerks Mayrhofen (Hauptstufe) mit der farblich dargestellten jährlichen Abweichung des Zuflusses zum langjährigen Mittel an dem Ersatzpegel Zell and Ziller (Ziller). Der Ersatzpegel repräsentiert den natürlichen Zufluss zu den Speichern der Zemm-Ziller Kraftwerksgruppe. Jahreswerte beziehen sich auf ein hydrologisches Jahr (Okt. – Sep.).

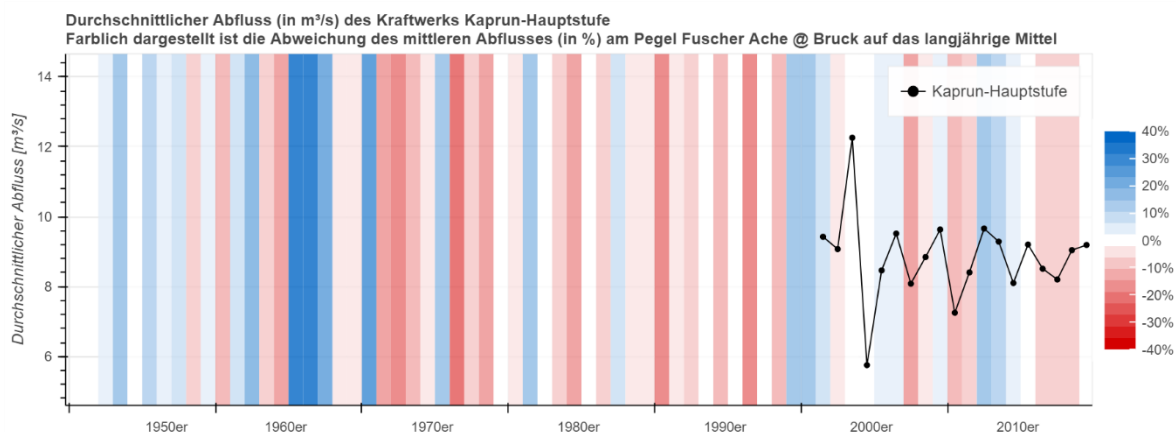


Abbildung 19: Abfluss an der Hauptstufe Kaprun mit der farblich dargestellten jährlichen Abweichung des Zuflusses zum langjährigen Mittel an dem Ersatzpegel Bruck (Fuscher Ache). Der Ersatzpegel repräsentiert den natürlichen Zufluss zu den Speichern der Kraftwerksgruppe Kaprun. Jahreswerte beziehen sich auf ein hydrologisches Jahr (Okt. – Sep.). Der hohe Abfluss im Jahr 2003 ist vermutlich zurückzuführen auf Arbeiten im Zuge der Inbetriebnahme eines neuen Druckrohrschachtes im Jahr 2004.

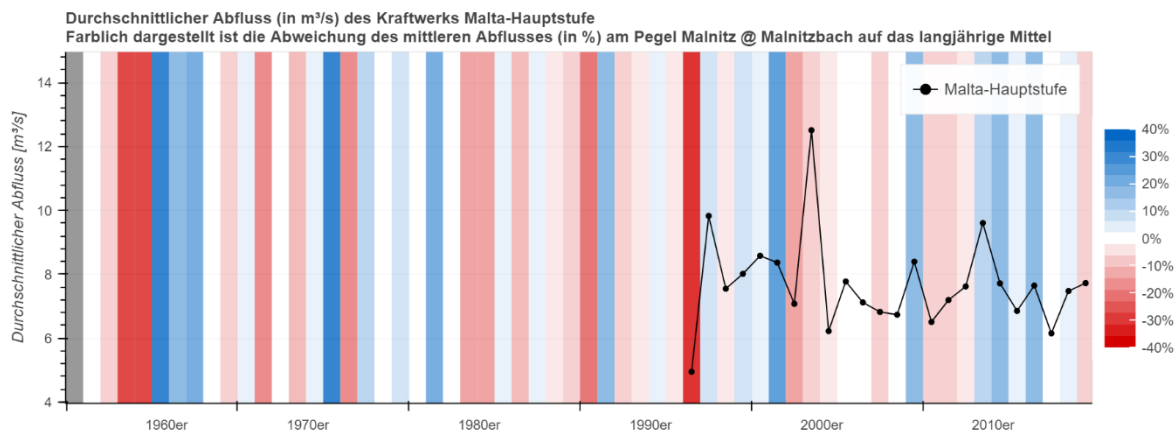


Abbildung 20: Abfluss an der Hauptstufe der Malta-Kraftwerksgruppe mit der farblich dargestellten jährlichen Abweichung des Zuflusses zu langjährigen Mittel an dem Ersatzpegel Malnitz (Malnitzbach). Der Ersatzpegel repräsentiert den natürlichen Zufluss zu den Speichern der Malta Kraftwerksgruppe. Jahreswerte beziehen sich auf ein hydrologisches Jahr (Okt. – Sep.).

Insgesamt zeigen die Darstellungen für die Speicherkraftwerke einen etwas geringer ausgeprägten Zusammenhang zwischen natürlichem Wasserdargebot (an den Ersatzpegeln) und Abfluss aus den Kraftwerken, als bei den Laufkraftwerken. Teilweise können die großen alpinen Speicher also einen Ausgleich zur natürlichen Variabilität ermöglichen. Zusätzlich zur menschlichen Speicherbewirtschaftung bieten die Gletscher in den Einzugsgebieten eine Wasserreserve, die in heißen und trockenen Phasen als natürlicher Ausgleich wirkt (siehe auch die Gletscher-Kapitel 2.1.4 und 3.1.4).

Betrachtet man die Saisonalität der Zuflüsse zu den Speichern der Kraftwerksgruppe Kaprun (Abbildung 21) erkennt man eine nur geringe Änderung zwischen den Perioden 1991 – 2005 und 2006 – 2020. Diese geringe Veränderung hängt einerseits mit den kurzen Betrachtungszeiträumen zusammen, andererseits aber auch mit der großen Höhe des Einzugsgebiets, in dem die deutlichen Temperaturanstiege noch immer nicht zu sehr deutlichen Änderungen der Schneeprozesse führen. Das typische Muster der saisonalen Verschiebung ist aber erkennbar: die zweite (aktuellere) Periode weist einen leicht höheren Abfluss zu Beginn der Schneeschmelze auf, und einen niedrigeren in den Sommermonaten. Dies ist zurückzuführen auf die früher einsetzenden und dann auch früher abgeschlossene Schneeschmelze. Die geringeren Abflüsse aufgrund von Schneeschmelze im Juli und August können im langjährigen Mittel nicht durch höhere Abflüsse aus Gletscherschmelze ausreichend kompensiert werden.

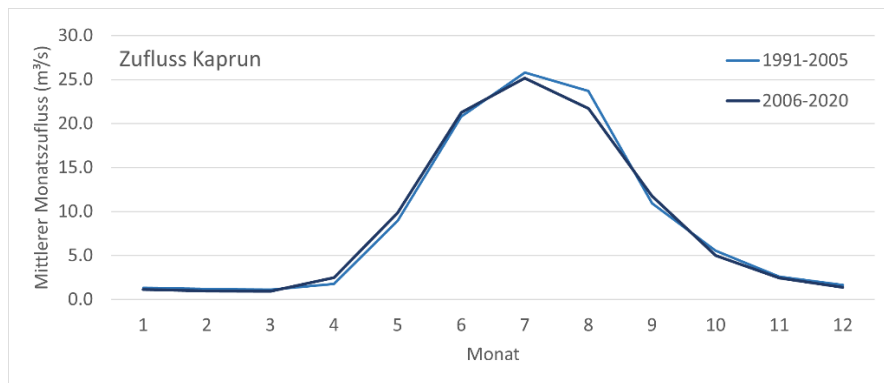


Abbildung 21: Saisonale Veränderungen der mittleren monatlichen Zuflüsse zur Kraftwerksgruppe Kaprun zwischen den Perioden 1991 - 2005 und 2006 - 2020.

3 Klimaprojektionen

Zukünftige Veränderungen im Klima können mithilfe von Klimamodellen simuliert werden. Dabei werden die wesentlichen physikalischen Vorgänge in den Ozeanen und in der Atmosphäre numerisch abgebildet. Um das globale Klima simulieren zu können sind Globale Klimamodelle (Global Climate Models GCMs) notwendig. Die simulierten Änderungen im Klimasystem hängen dabei von den angenommenen Treibhausgasemissionen und -konzentrationen ab. Zusammen mit GCMs werden auch kleinere Regionale Klimamodelle (RCMs) mit höherer räumlicher Auflösung für ein begrenztes Gebiet (oft einzelne Kontinente) eingesetzt. Um die Unsicherheiten in der Klimamodellierung zu berücksichtigen werden typischerweise mehrere Klimamodelle verschiedener Institutionen analysiert, wobei man die Sammlung mehrerer vergleichbarer Modelle als Modell-„Ensemble“ bezeichnet.

Die Daten aus Klimamodellen können in Klimafolgenmodellen eingesetzt werden, um z.B die Auswirkungen auf das terrestrische Wasserdargebot und die Wasserkrafterzeugung zu simulieren. Vor der Anwendung von Klimamodelldaten in nachfolgenden Modellen sind üblicherweise Anpassungen an die tatsächlichen lokalen Klimaverhältnisse nötig („downscaling“ und „bias correction“), da diese in den großskaligen Klimamodellen nur ungenügend abgebildet werden. Die fortlaufende Entwicklung neuer Klimamodelle zielt zu einem wesentlichen Teil darauf ab, regionale und lokale Klimaphänomene besser abbilden zu können. Die typische Abfolge dieser Simulationschritte in der Klima- und Klimafolgenmodellierung ist in Abbildung 22 schematisch dargestellt.

Aufgrund der andauernden Entwicklung in der Klimasimulation und -forschung gibt es verschiedene Generationen von globalen Klimamodellen (zuletzt CMIP3, CMIP5, CMIP6) und regionalen Klimamodellen (zuletzt ENSEMBLES und CORDEX), auf die sich verschiedene Informationsquellen beziehen können. Damit einher gehen verschiedene Bezeichnungen für verschiedene Treibhausgas-Emissionszenarien. Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die Bezeichnungen von GCMs, RCMs und Emissionsszenarien der häufig verwendeten Klimamodell-Ensembles.

Tabelle 4: Häufig verwendete Klimamodellensätze, zugrundeliegende Emissionsszenarien und die Bandbreite der Projektionen der mittleren Klimaerwärmung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (ΔT)

GCM- Ensemble	RCM- Ensemble	Emissions- Szenarien	Höhere Emissionen	ΔT (°C)	Niedrigere Emissionen	ΔT (°C)
CMIP3	ENSEMBLE	SRES	A1B, A2	2 - 5	B1	1 - 3
CMIP5	CORDEX	RCP	RCP8.5, RCP6.0	2 - 5	RCP4.5, RCP2.6	1 - 3
CMIP6	-	SSP	SSP5-8.5, SSP3-7.0	3 - 7	SSP2-4.5, SSP1-2.6	1 - 4

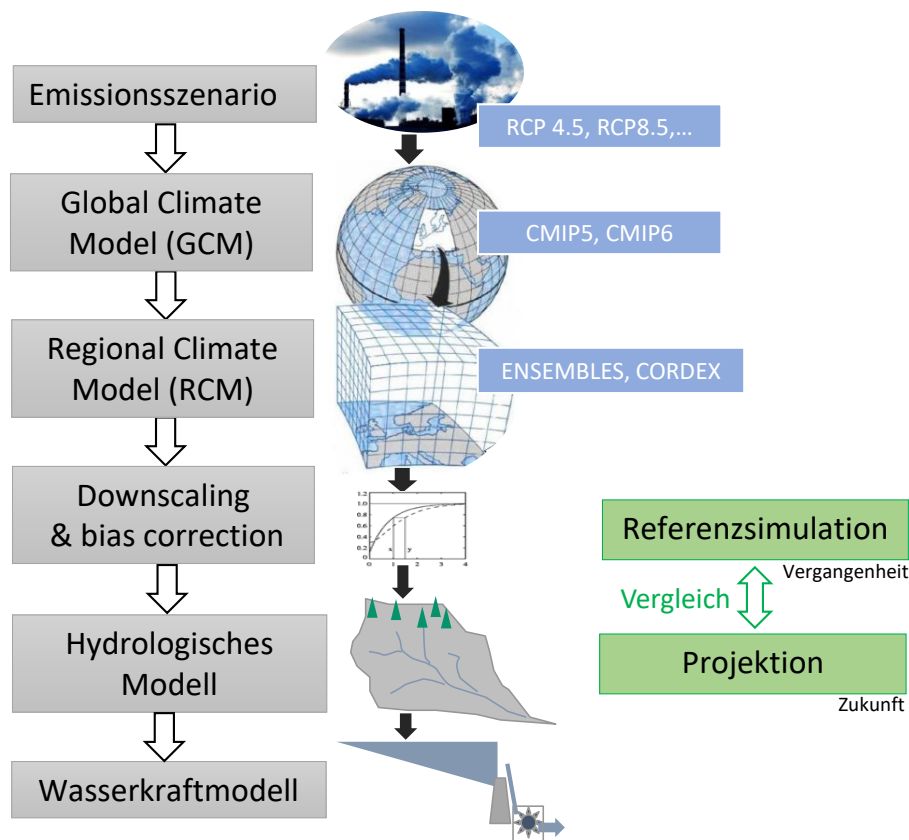


Abbildung 22: Vorgangsweise Klima- und Klimafolgenmodellierung

In den Analysen für die vorliegende Studie wurde angestrebt, jeweils Informationen über einen mittelfristigen Zeithorizont (Mitte des 21. Jahrhunderts) und einen langfristigen Zeithorizont (Ende des 21. Jahrhunderts) zu verwenden. In Bezug auf die Treibhausgasszenarien sollten, soweit möglich, Aussagen über die zu erwartende Klimaentwicklung für verschiedene zukünftige Emissionspfade getroffen werden (typischerweise ein optimistischeres Szenario mit niedrigeren Emissionen und ein pessimistischeres Szenario mit höheren Emissionen). Bei der Referenz auf publizierte Auswertungen konnten dabei natürlich nur die Perioden und Emissionsszenarien aus der jeweiligen Veröffentlichung berücksichtigt werden, so dass eine grundsätzliche Festlegung auf bestimmte Perioden und Szenarien nicht möglich war.

Als Quellen für Klimamodelldaten wurden veröffentlichte Daten und Karten der aktuellsten und räumlich am höchsten aufgelösten Klimaszenarien für Österreich, der ÖKS15 verwendet (Chimani et al. 2016). Zusätzlich wurde auf das Online-Portal des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), den IPCC WGI Interactive Atlas zugegriffen (<https://interactive-atlas.ipcc.ch/>). Ergebnisse von Klimafolgen-simulationen wurden aus nationalen und internationalen Veröffentlichungen sowie aus

einem Online-Portal des Schwedischen Hydrometeorologischen Dienstes (SMHI, <https://hypeweb.smhi.se/>) entnommen.

Ein wesentlicher Punkt in der Analyse von Klimaprojektionen ist, wie bereits erwähnt, die Berücksichtigung der Unsicherheit. Die hohe Unsicherheit folgt (1) aus der unbekanntem zukünftigen Entwicklung der Treibhausgasemissionen, (2) aus der naturgemäß hohen Variabilität des Klimageschens und (3) aus den Fehlern der Klimamodelle bei der Abbildung dieses Klimageschens. Diese drei Dimensionen der Unsicherheit werden typischerweise berücksichtigt durch die Analyse (1) von Ergebnissen mit verschiedenen Emissionsszenarien, (2) der statistischen Eigenschaften langer Zeiträume und (3) der Ergebnisse vieler verschiedener Klimamodelle (Ensembles). Nicht in allen hier analysierten Daten und Darstellungen konnten alle Dimensionen der Unsicherheit adäquat berücksichtigt werden – es wurde aber versucht, in den Texten zu den verschiedenen Auswertungen auf möglichst viele Aspekte der Unsicherheit einzugehen. In vielen hier reproduzierten Karten der ÖKS15 gibt es eine Auswertung der Modellunsicherheit in der Form einer Analyse der Signifikanz von Trends in den Daten einzelner Klimamodell, zusammen mit einer Analyse der Übereinstimmung der Vorzeichen der Trends verschiedener Klimamodelle (Chimani et al. 2016). Entsprechend der in Abbildung 23 erläuterten Kategorisierung Daraus ergeben sich drei Kategorien: „significant/signifikante Änderung/dunkelgrün“, „no change/keine signifikante Änderung/hellgrün“ und „unreliable/mangelnde Modellübereinstimmung/grau“.

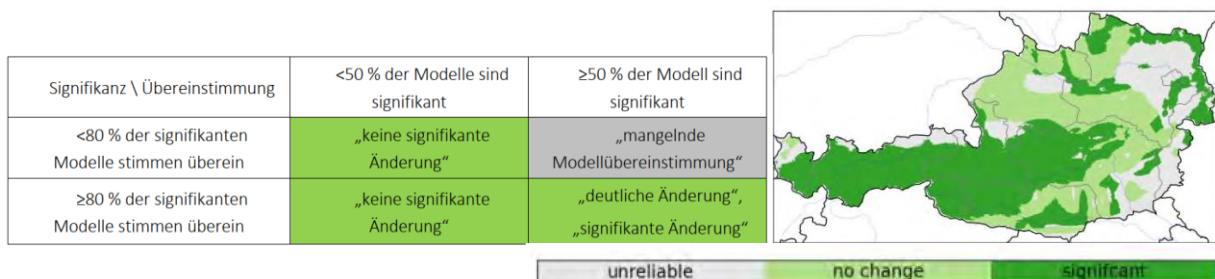


Abbildung 23: Kategorisierung der Modellunsicherheit in den ÖKS15 (Quelle: Chimani et al. 2016)

3.1 Wasserdargebot

Für die Analyse erwarteter zukünftiger Änderungen im Wasserdargebot wurden für dieselben Einflussgrößen wie bei der Untersuchung der Vergangenheit Projektionen von Klimamodellen und Klimafolgenmodellen ausgewertet.

3.1.1 Temperatur

Klimaprojektionen für die Temperatur zeigen einen eindeutigen Trend zur weiteren Klimaerwärmung.

Unterschiede zwischen verschiedenen Regionen sind relativ gering (siehe Karten für Europa in Abbildung 59 in Anhang A 3.1.1), wobei tendenziell – wie bei der bereits beobachteten Erwärmung – der Temperaturanstieg im Alpenraum höher erwartet wird als in anderen Regionen. Dies zeigt sich auch deutlich in der Karte für RCP8.5 für das Ende des 21. Jahrhunderts für Österreich in Abbildung 24. Für die alpinen Gebiete liegt der Mittelwert der Modellprojektionen über dem österreichischen Mittelwert von 4°C (Erwärmung gegenüber dem Mittelwert von 1971-2000), für die Gebiete im Osten und Norden von Österreich unter 4°C. Für RCP4.5 zeigen die ÖKS15-Projektionen eine Erwärmung von 2.3°C im österreichischen Mittel für die fernere Zukunft. Für eine nähere Zukunftsperiode um 2035 sind die Ergebnisse beider Emissionsszenarien sehr ähnlich, mit einem österreichischen Mittelwert um 1.4°C (Karten in Abbildung 58 in Anhang A 3.1.1).

Die rechte Karte in Abbildung 24 zeigt die hohe Übereinstimmung und Signifikanz der Modellergebnisse für Temperatur (ganz Österreich „significant“).

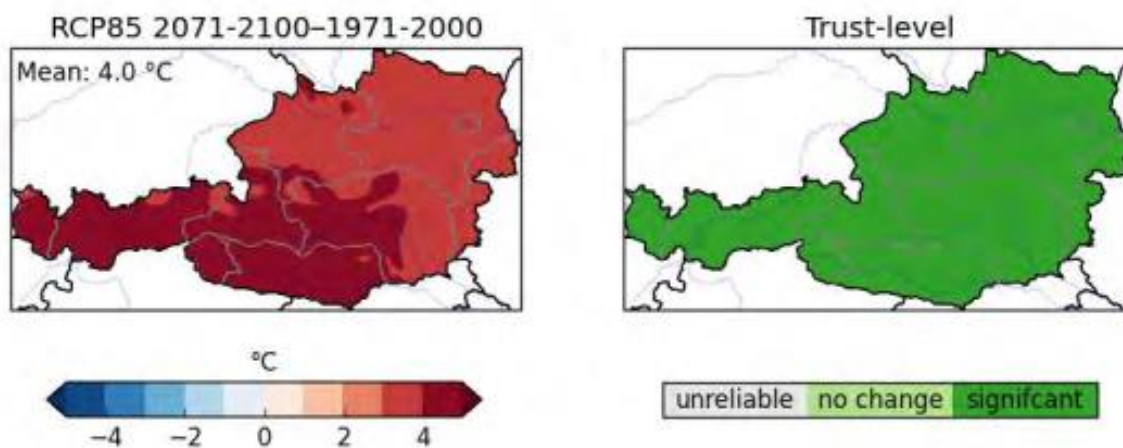


Abbildung 24: ÖKS15 Klimaprojektionen für Temperatur für Österreich für RCP8.5 und die ferne Zukunft; links: Ensemble-Mittelwert, rechts: Bewertung des Vertrauensgehalts (Quelle: ÖKS 2022)

Die Darstellung in Abbildung 25, der Entwicklung der mittleren Temperatur im Einzugsgebiet der Donau in einzelnen Klimamodellprojektionen, zeigt dies etwas detaillierter: es gibt einen sehr eindeutig übereinstimmenden Trend der Zunahme, aber auch relevante Unterschiede zwischen den Ergebnissen verschiedener Modelle (bis zu rund 2°C innerhalb desselben Emissionszenarios). Unterschiede aufgrund der RCP-Emissionsszenarien zeigen sich erst ab der Mitte des 21. Jahrhunderts deutlich.

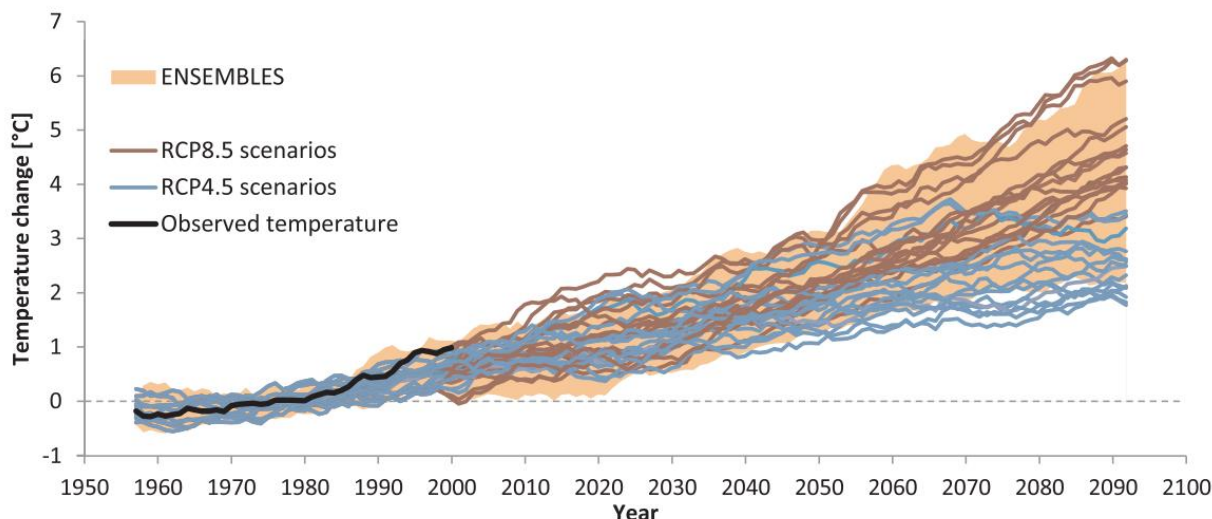


Abbildung 25: Historische Simulationen und Projektionen der mittleren Temperaturänderung im Einzugsgebiet der Donau bis Wien; CORDEX RCMs mit RCP4.5 und RCP8.5 und Schwankungsbreite der ENSEMBLES RCMs (Quelle: Stanzel und Kling 2018)

Abbildung 25 zeigt auch die gute Übereinstimmung der Ergebnisse der CORDEX-RCMs (RCPs) mit der vorangegangenen Generation an Regionalen Klimamodellen (ENSEMBLES). Die neueste Generation an GCMs (CMIP6) zeigen nun eine etwas höhere Erwärmung an als die vorangegangene (CMIP5, die auch die Grundlage für die CORDEX-RCMs bildet). Für Österreich liegt der CMIP6-Ensemble-Mittelwert für RCP8.5 und eine ferne Zukunft um rund 0.7°C über jenem mit CMIP5. Regionale Klimamodelle auf der Grundlage von CMIP6 liegen noch nicht vor. Die höheren Werte mit CMIP6 werden derzeit noch wissenschaftlich analysiert, es kann aber davon ausgegangen werden, dass die zukünftige Erwärmung bisher tendenziell etwas zu niedrig eingeschätzt wurde.

Die fortdauernde Erwärmung hat direkte Auswirkungen auf Prozesse, die das Wasserdargebot beeinflussen: ansteigende Verdunstung, längere Dauer der Vegetationsperiode, Form des Niederschlags im Winter (weniger Schnee, mehr Regen), kürzere Schneebedeckung, geringere Schneedecke, frühere und raschere Schmelzprozesse (Schnee/Gletscher).

Für die potentielle Verdunstung zeigt Galí Reniu (2017) für Österreich, dass bei einem Temperaturanstieg zwischen rund 3°C und 5°C ein Anstieg in der potentiellen Verdunstung von rund 7% bis 25% erwartet werden kann (d.h. ein Anstieg zwischen ca. 3% und 5% pro °C Erwärmung). Veränderungen in Wind und Strahlung haben dabei auch Einfluss auf die Verdunstung, diese werden aber vergleichsweise gering angenommen (siehe auch Kapitel 3.1.5).

Projektionen der Veränderungen bei Schnee und Gletschern werden in den Kapiteln 3.1.3 und 3.1.4 diskutiert.

3.1.2 Niederschlag

Projektionen für Niederschlag weisen sowohl eine höhere Unsicherheit als auch größere räumliche Unterschiede auf als jene für Temperatur. Außerdem zeigen sich saisonale Unterschiede in den Projektionen.

Abbildung 26 zeigt, rechts, dass im ÖKS15-Ensemble sogar für die ferne Zukunft und im Szenario mit den stärksten Veränderungen die Trends in den Projektionen in manchen Gebieten Österreichs nicht signifikant sind (hellgrün), und dass die Änderungssignale verschiedener Modelle teilweise unterschiedliche Vorzeichen aufweisen (grau). In den Karten links sieht man, dass tendenziell ein Anstieg im Jahresniederschlag erwartet wird. Allerdings gibt es deutliche saisonale Unterschiede, mit einem Rückgang im Niederschlag in vielen Gebieten im Sommer, und einem deutlichen Anstieg im Winter. Generell zeigen die Projektionen im Mittelwert für die außeralpinen Gebiete im Norden und Osten eine stärkere Zunahme des Niederschlags.

Für die nahe Zukunft und das RCP4.5-Szenario mit geringeren Emissionen zeigen sich ähnliche räumliche Muster, aber geringere Veränderungen und noch geringere Signifikanz der Ergebnisse (Abbildung 60 in Anhang A 3.1.2).

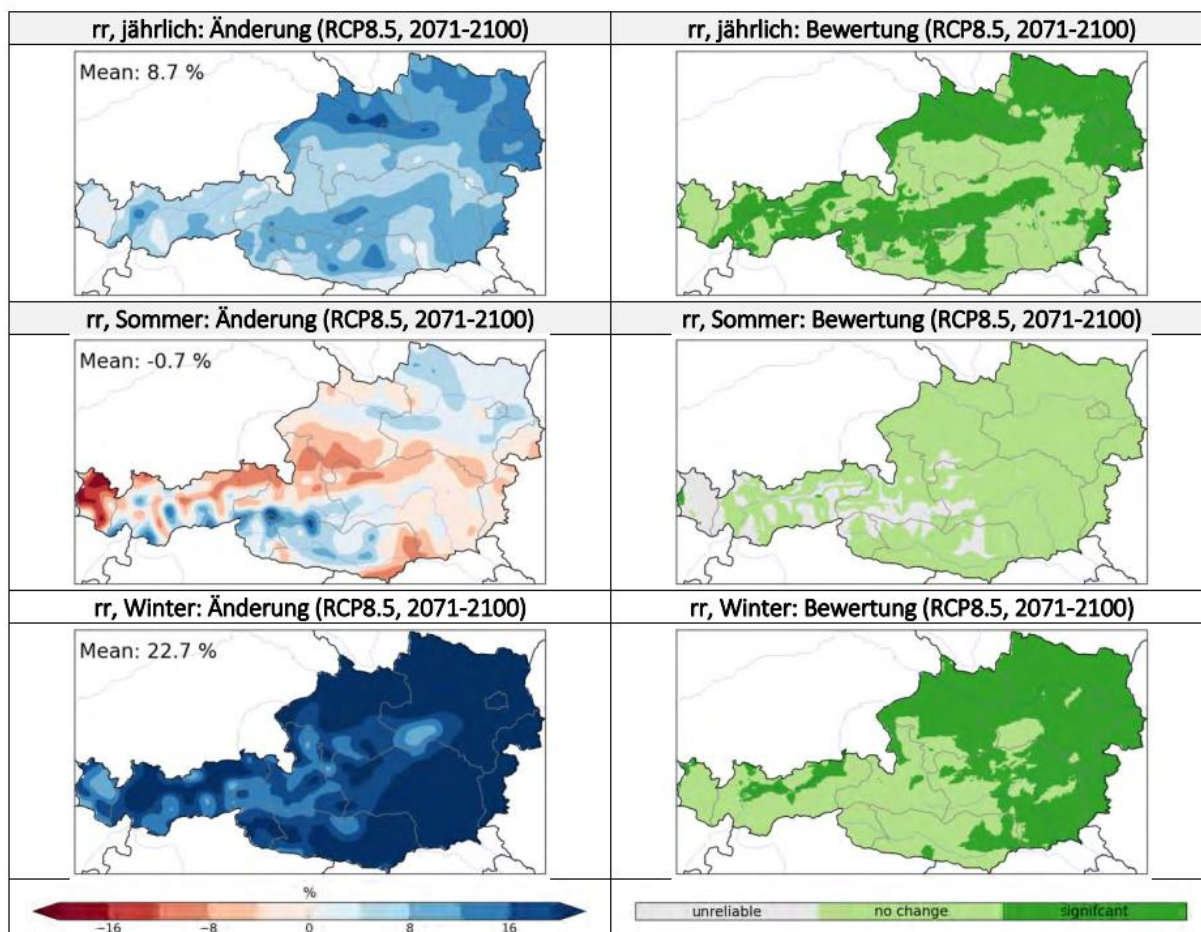


Abbildung 26: ÖKS15 Klimaprojektionen für Niederschlag für Österreich (jährlich und saisonal) für RCP8.5 und die ferne Zukunft; links: Ensemble-Mittelwert, rechts: Bewertung des Vertrauensgehalts (Quelle: ÖKS 2022)

Die Zeitreihen der Modellprojektionen für den Jahresniederschlag im Donaeinzugsgebiet (Abbildung 27) bestätigen das Bild der größeren Unsicherheit, mit relativ großen Schwankungen zwischen den einzelnen Modellen zwischen geringer Niederschlagsabnahme und deutlicher Zunahme, und einer deutlichen Mehrheit an Modellen mit Projektionen ansteigenden Niederschlags.

Die großen Schwankungen zwischen den Modellprojektionen hängen einerseits mit der hohen (natürlichen) raum-zeitlichen Variabilität in Niederschlagsprozessen zusammen, andererseits aber auch mit anhaltenden Schwierigkeiten, diese in den Klimamodellen adäquat abzubilden. Da besonders daran geforscht wird, ergeben sich auch Unterschiede zwischen verschiedenen Modellgenerationen: die älteren ENSEMBLES-Ergebnisse in Abbildung 27 waren deutlich „trockener“ als die neueren CORDEX-Ergebnisse. Die neuesten CMIP6-Ergebnisse zeigen für Mitteleuropa für den Sommer einen noch stärkeren Rückgang im Niederschlag an als die älteren CMIP5-Ergebnisse (Abbildung 61 in Anhang A 3.1.2).

Großräumig ergeben die Projektionen aber über verschiedene Modellarten und -generationen hinweg aber ein konsistentes Bild: eine Zunahme des jährlichen Niederschlags nördlich der Alpen und ein Rückgang im südlichen Europa (Abbildung 61 in Anhang A 3.1.2). Dieses Muster zeigt sich, wenn auch nur schwach, auch in den bereits beobachteten Trends. Für die alpinen Gebiete Österreichs, die genau in der Übergangszone zwischen den gegenläufigen Trends liegen, entsteht daraus eine hohe Unsicherheit in den erwarteten Änderungen im mittleren und saisonalen Niederschlag.

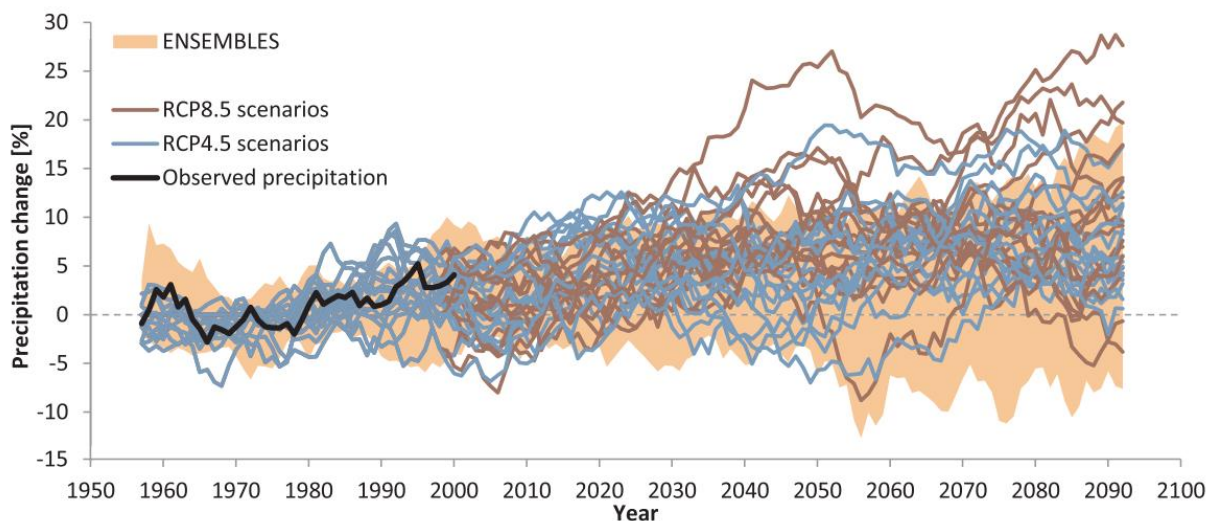


Abbildung 27: Historische Simulationen und Projektionen der mittleren Niederschlagsänderung im Einzugsgebiet der Donau bis Wien; CORDEX RCMs mit RCP4.5 und RCP8.5 und Schwankungsbreite der ENSEMBLES RCMs (Quelle: Stanzel und Kling 2018)

Eindeutiger sind Klimamodellergebnisse für Extremniederschläge. Hier gibt es eine hohe Übereinstimmung der Modelle, die im Mittel einen deutlichen Anstieg vorhersagen, von 10-20%, je nach Periode und Szenario (siehe Abbildung 62 in Anhang A 3.1.2). Trotz starker Schwankungen in den Ergebnissen zwischen den Modellen einzelner Klimamodelle ist die Verlässlichkeit des grundsätzlichen Trends trotzdem relativ hoch, einerseits aufgrund des bereits beobachteten Anstiegs der Niederschlagsintensitäten, andererseits aufgrund des grundlegenden physikalischen Zusammenhangs, dass wärmere Luft mehr Wasserdampf aufnehmen kann – und bei Starkregenereignissen daher auch mehr abgeben kann.

Auch für die Dauer von zukünftigen Trockenperioden ergeben Klimaprojektionen ein recht eindeutiges Bild, mit einem abnehmenden Trend für Winter und Frühling (also kürzere Trockenperioden) und einer Zunahme (längere Trockenperioden) in Sommer (Abbildung 63 in Anhang A 3.1.2) und Herbst. Aufgrund der hohen natürlichen Variabilität bei Extremereignissen sind die (im Anhang) dargestellten Ergebnisse der ÖKS15 für Extremniederschlag und Trockenperioden in vielen Gebieten nicht statistisch signifikant.

3.1.3 Schnee

Die fortschreitende Erwärmung hat eindeutige Auswirkungen auf Schneeprozesse: einen geringeren Anteil an Schnee am Niederschlag, damit geringere Schneehöhen, eine frühere Schneeschmelze und eine kürzere Dauer der Schneedecken.

Die konkreten Auswirkungen hängen dabei stark vom Ausmaß der Erwärmung und der Seehöhe ab. Abbildung 58 zeigt Ergebnisse einer Klimafolgenmodellierung unter Verwendung der ÖKS15-Klimadaten (Gobiet et al. 2022), für das Ende des 21. Jahrhunderts. Für alle Emissionsszenarien und Höhenzonen werden deutliche Rückgänge in der Schneehöhe erwartet. Während diese allerdings im sehr optimistischen Szenario RCP2.6 nur um 20% bis 40% (in den tiefsten Lagen) abnimmt, ergeben die Projektionen für RCP8.5 einen Rückgang der Schneehöhen von um die 80% (und noch höher für die tiefsten Lagen). Nur in den höchsten Zonen von über 2000 m und v.a. über 2500 m verbleiben deutlich höhere Anteile der bisherigen Schneehöhen.

Diese deutlichen Änderungen in den Schneeprozessen werden weiterhin und zunehmend auch den Abfluss und v.a. dessen Saisonalität beeinflussen (frühere Schneeschmelze, weniger Schneespeicherung, mehr Abfluss im Winter).

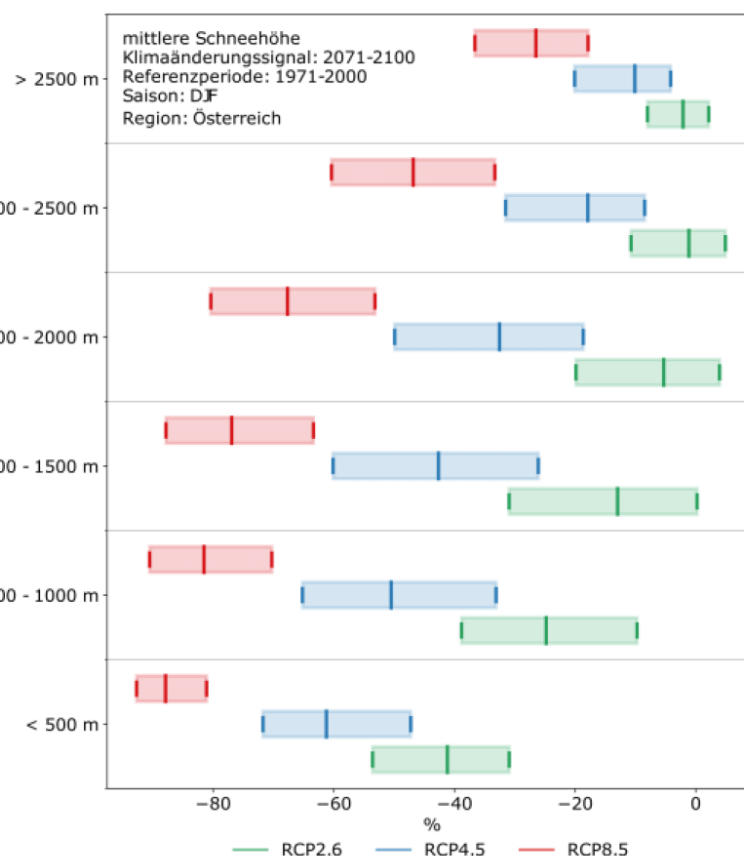


Abbildung 28: Änderung der mittleren Schneehöhe, Projektionen mit ÖKS15-Klimamodell für 2071-2100 (im Vergleich mit 1971-2000) für die drei Emissionsszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 (Quelle: Gobiet et al. 2022)

3.1.4 Gletscher

In vergletscherten Gebieten kommt es durch die anhaltende Erwärmung zu folgenden typischen Veränderungen, die auch in den Simulationsergebnissen in Abbildung 29 (mit fortschreitendem Temperaturanstieg von der ersten zur letzten Periode) aufgezeigt werden: Die Schneeschmelze beginnt früher, und durch die schnellere Schmelze der geringeren Schneemengen kommt es zu einer früheren Ausaperung. Der daraus folgende Anstieg des Gletscherabflusses kann dann zuerst den Rückgang des Schneeschmelzabflusses kompensieren (und auch den fehlenden Niederschlag in besonders heißen, trockenen Sommern). Ab einem bestimmten Rückgang des Eisvolumens geht dann allerdings auch der Abfluss aus der Gletscherschmelze zurück und damit auch, noch deutlicher, der Gesamtabfluss (vor allem auch in heißen, trockenen Sommern).

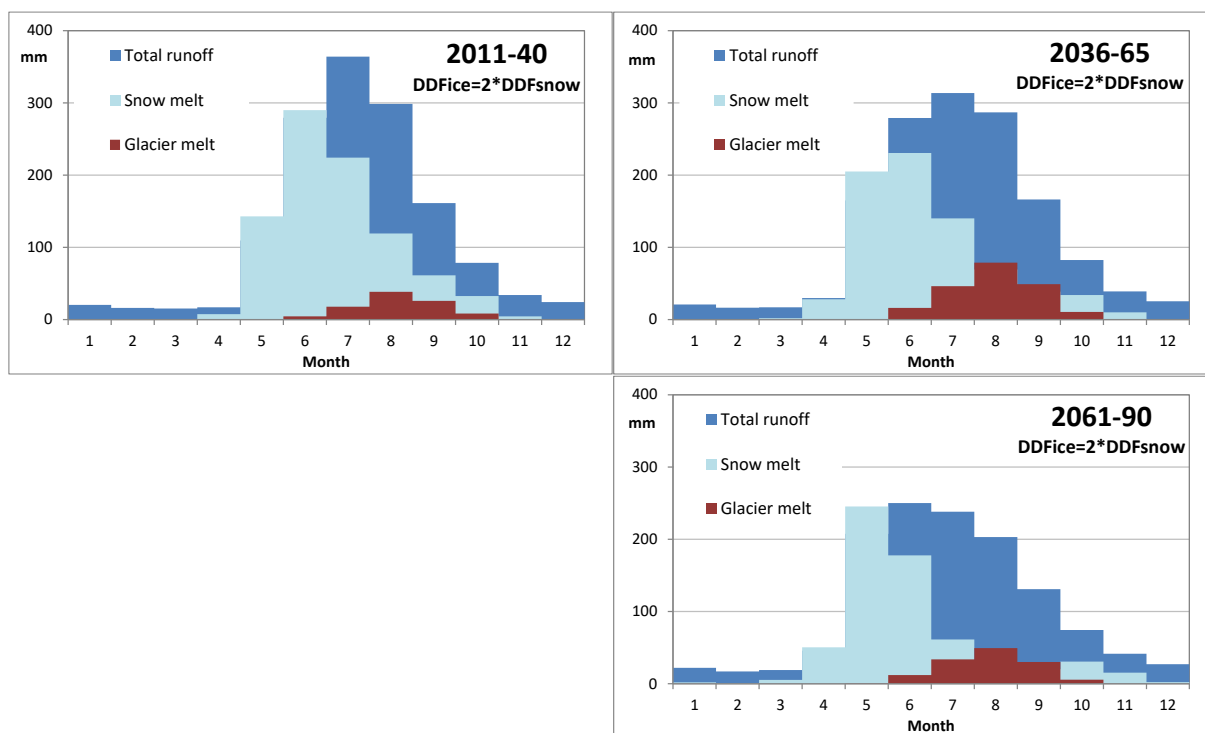


Abbildung 29: Änderungen im mittleren monatlichen Abfluss aus Schnee- und Gletscherschmelze im Einzugsgebiet des Gepatsch-Speichers, Projektionen mit einem RCM (REMO-UBA) unter der Annahme hoher Emissionen (Szenario A1B) und hoher Eisschmelzfaktoren (Quelle: Nachtnebel et al. 2012): Gesamtabfluss dunkelblau, Schneeschmelze hellblau, Gletscherschmelze braun.

Wann dieser Zeitpunkt erreicht wird (manchmal „peak water“ genannt, vgl. Huss und Hock 2018), hängt von den jeweiligen Gletscher-Verhältnissen ab (Höhenlage, Eisvolumen), aber auch von den Annahmen zur zukünftigen Entwicklung der Lufttemperatur, des Niederschlags und der Zusammenhänge zwischen den

verschiedenen klimatischen Einflussfaktoren. In den hydrologischen Klimaprojektionen von Kling et al. (2011) ergeben sich für die Gletscher des Donaeinzugsgebiets für eine nahe Zukunftsperiode (2021-2050) für die meisten untersuchten Klimamodelle noch ansteigende Gletscherbeiträge (im Vergleich zu einer Referenzperiode 1961-1990, siehe Abbildung 64 in Anhang A 3.1.4). Erst später im 21. Jahrhundert fällt der Beitrag der Gletscherschmelze wieder ab. Auch in den in Abbildung 29 gezeigten Simulationen von Nachtnebel et al. (2012) für das Einzugsgebiet des Gepatsch-Speichers steigt der Gletscherabfluss in der nahen Zukunft noch an. Wallner (2022) zeigt hingegen, auf der Grundlage von Daten aus globalen hydrologischen und Gletscher-Simulationen von Huss und Hock (2015), dass „peak water“ im Donaugebiet bereits erreicht wurde oder unmittelbar bevorsteht und der Gletscherabfluss bereits in der nahen Zukunft (2016-2045) zurückgeht (im Vergleich zu einer Referenzperiode 1986-2015, siehe Abbildung 65 in Anhang A 3.1.4).

Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die derzeit noch relativ hohen Beiträge der Gletscherschmelze zum Abfluss in vergletscherten alpinen Einzugsgebieten in Zukunft zurückgehen werden. Wie in Abbildung 29 gezeigt, können in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts nur noch deutlich geringere sommerliche Abflussbeiträge aus Schnee- und Gletscherschmelze erwartet werden. Der Zeitraum und das Ausmaß dieser Abnahme ist dabei unsicher und stark von den jeweiligen Verhältnissen abhängig, wobei davon ausgegangen werden kann, dass der Rückgang umso später beginnt, je höher gelegen und stärker vergletschert ein Gebiet ist (Wallner 2022).

3.1.5 Strahlung und Wind

Sonneneinstrahlung und Wind beeinflussen die Verdunstung, und damit das Wasserdargebot. Darüber hinaus sind Veränderungen in diesen Parametern für die Stromerzeugung aus Wind- und Solarkraftwerken relevant. Allerdings weisen Klimamodellprojektionen für diese Parameter nur geringe Änderungssignale auf, die in manchen Gebieten auch unterschiedliche Vorzeichen haben (siehe Abbildung 66 in Anhang A 3.1.5 für Wind, graue Gebieten mit unterschiedlichen Vorzeichen, und Abbildung 68 in Anhang A 3.1.5 für Strahlung, karierte Gebiete mit unterschiedlichen Vorzeichen).

Sowohl für Strahlung wie für Wind ergeben die Mittelwerte der Klimamodell-Ensembles tendenziell einen leichten Rückgang im 21. Jahrhundert, im Bereich von ca. 1-3%.

3.1.6 Abfluss

Die beschriebenen Veränderungen in Niederschlag, Temperatur, Verdunstung, Schnee- und Gletscherprozessen führen zu Veränderungen im Wasserdargebot, in der Abflussbildung und schließlich im Abfluss der Flüsse. Ganz allgemein können dabei die folgenden Auswirkungen erwartet werden:

- Höhere Temperaturen führen zu höherer Verdunstung und verringern den Abfluss.
- Veränderungen im Niederschlag führen zu gleichartigen Veränderungen im Abfluss (Anstieg/Rückgang).
- Mehr flüssiger Niederschlag im Winter führt zu höheren Abflüssen im Winter.
- Eine geringere Schneedecke und ein früherer Beginn der Schneeschmelze führen zu früheren und kürzeren Schneeschmelzabflüssen.
- Abflussbeiträge aus Gletscherschmelze treten früher auf und sind je nach Größe der verbliebenen Eisflächen höher oder geringer.

Die komplexen Überlagerungen des Einflusses der verschiedenen Prozesse und ihre räumliche und saisonale Verteilung können nur mit hydrologischer Klimafolgenmodellierung ermittelt werden, die Klimamodelldaten als Eingangswerte verwendet (siehe Abbildung 22).

Für Europa und Österreich liegen eine Vielzahl an Publikationen zu hydrologischer Klimafolgenforschung vor. Im Folgenden wird anhand von Ergebnissen einer Auswahl dieser Studien der derzeitige Kenntnisstand sowie die verbliebenen Unsicherheiten zusammengefasst.

3.1.6.1 *Mittlerer Jahresabfluss*

Aufgrund des starken Einflusses der Niederschlagsmengen auf die Abflussmengen bilden die großräumigen Veränderungen im mittleren Abfluss jene im mittleren Niederschlag ab: nördlich der Alpen kann tendenziell eher eine Zunahme des Abflusses erwartet werden, südlich der Alpen eher eine Abnahme (siehe Ergebnisse europaweiter Klimafolgensimulationen in Abbildung 30 und Abbildung 31). Das Ausmaß des Trends sowie die Grenzen der Bereiche der Zunahme und Abnahme unterscheiden sich dabei zwischen verschiedenen Klimamodellgenerationen und Emissionsszenarien und einzelnen Modellen. Wie beim Niederschlag gibt es im Übergangsbereich der beiden Veränderungstendenzen nur geringe Änderungssignale und zum Teil keine gute Übereinstimmung der Modelle, und dies betrifft viele Gebiete in Österreich.

Die in Abbildung 31 dargestellten Auswertungen des schwedischen hydro-meteorologischen Dienstes SMHI zeigen einerseits relativ robuste Ergebnisse, weil Mittelwerte mit vier bzw. fünf verschiedenen Klimamodellen der neuesten RCM-Generation dargestellt sind. Andererseits können die hydrologischen Modelle bei solchen kontinentalen Anwendungen die lokalen Verhältnisse zum Teil nicht adäquat abbilden. Die SMHI-Simulationen zeigen für Österreich für die nähere Zukunft im Osten und Norden leichte Zunahmen, sonst nur geringe Veränderungen. Die Projektionen für die fernere Zukunft hängen stark vom Emissionsszenario ab, mit tendenziell geringen Zunahmen im RCP4.5 (geringe Emissionen) und geringen Abnahmen im RCP8.5 (hohe Emissionen).

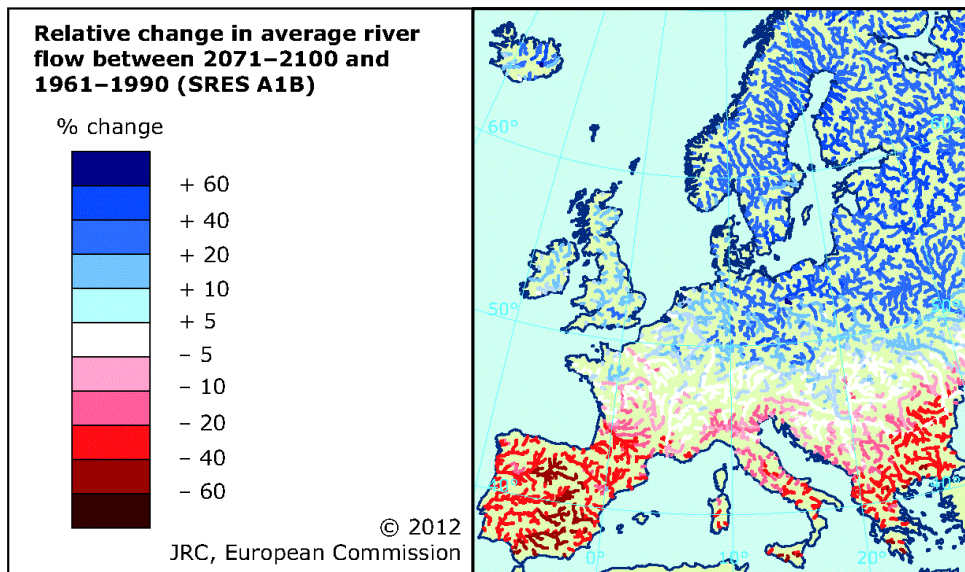


Abbildung 30: Änderung im mittleren Jahresabfluss für Europa für SRES A1B und die Periode 2071-2100 (im Vergleich zu 1961-1990) (Quelle: JRC 2012, Simulationen veröffentlicht in Alfieri et al. 2015)

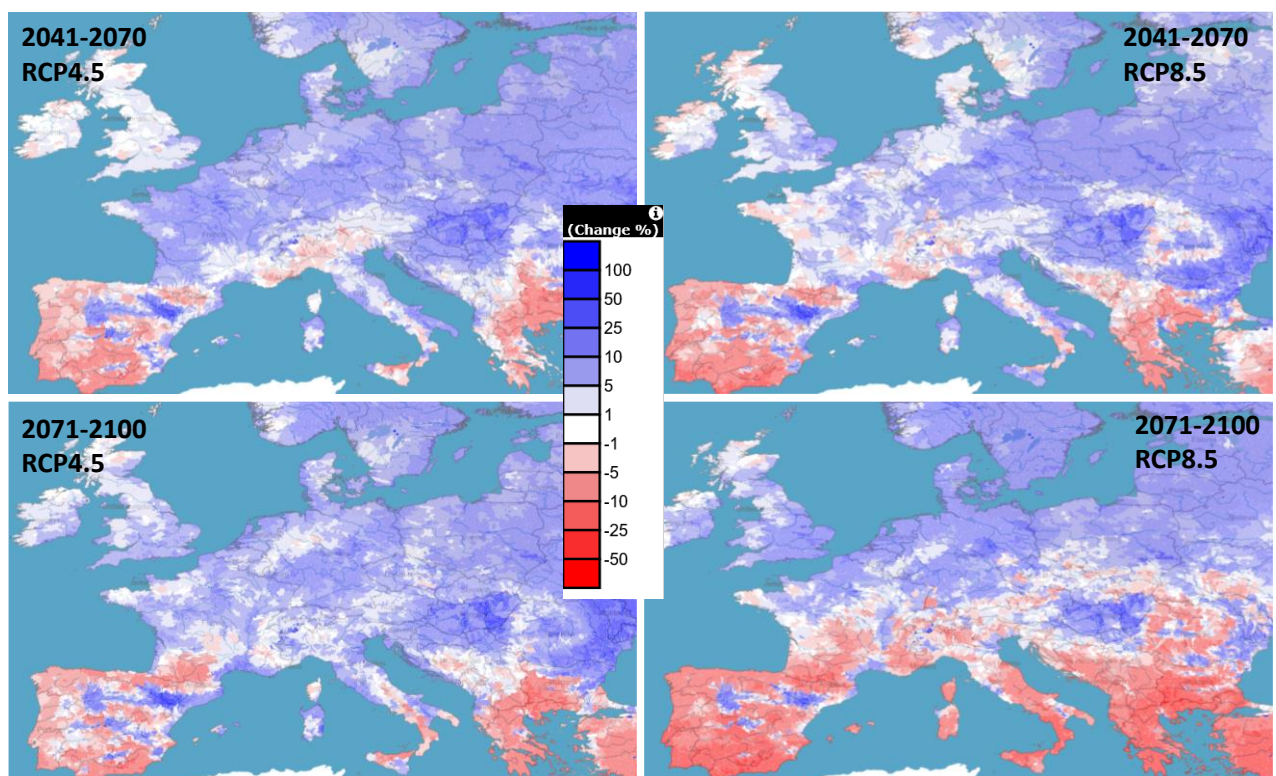


Abbildung 31: Relative Änderung (%) im mittleren Jahresabfluss für Europa im Mittel von fünf CORDEX-Modellen unter RCP4.5 (links) und vier CORDEX-Modellen unter RCP8.5 (rechts) für die Perioden 2041-2070 (oben) und 2071-2100 (Quelle: SMHI Hypeweb, <https://hypeweb.smhi.se/>)

Detaillierte Auswertungen von Projektionen der Abflussänderung für ganz Österreich, mit besser kalibrierten hydrologischen Modellen, liegen von Stanzel und Nachtnebel (2010, Abbildung 30 in Anhang A 3.1.6) und Blaschke et al. (2011, Abbildung 70 in Anhang A 3.1.6) vor. Allerdings liegen beiden Auswertungen jeweils nur Klimadaten eines einzelnen Klimamodells zugrunde, außerdem in beiden Fällen Modelle einer früheren Modellgeneration, was aufgrund der Unterschiede der verschiedenen Modelle auch keine verlässliche Einschätzung der zukünftigen Entwicklung erlaubt. Beide Auswertungen spiegeln aber die großräumige Tendenz wider, mit Abflusszunahmen im Norden und -abnahmen im Süden Österreichs. Der Unterschied in den Projektionen für zwei verschiedene Emissionsszenarien bei Stanzel und Nachtnebel (2010) bestätigen aber auch das Bild in den SMHI-Projektionen, mit deutlichen Abflussabnahmen nur bei höheren Treibhausgasemissionen.

Flächendeckende Abflusssimulationen speziell für Österreich mit größeren Ensembles neuer Klimamodellgenerationen liegen nicht vor – diese Forschungslücke sollte unter Anwendung der derzeit erstellten und bald veröffentlichten neuesten CORDEX-RCMs, angetrieben mit CMIP6-GCMs, bald geschlossen werden.

Detailliertere Abfluss-Simulationen mit mehreren Klimamodellen liegen aber für einzelne Einzugsgebiete in Österreich vor. Diese zeichnen zwar eher ein Bild von erwartbaren Abnahmen in vielen Gebieten Österreichs, bestätigen aber auch die große Unsicherheit in Bezug auf die Änderungen im mittleren Abfluss.

Goler et al. (2016) verwendeten drei Regionale Klimamodelle, unter dem SRES-Szenario A1B, die für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts für die Einzugsgebiete der Ybbs, Gurk und Salzach überwiegend keine wesentlichen Änderungen oder Abnahmen des Abflusses ergeben – mit der Ausnahme der Ybbs (nördlich der Alpen), für die zwei Klimamodelle eine geringe Zunahme zum Ende des Jahrhunderts anzeigen (siehe Abbildung 71 in Anhang A 3.1.6). Nachtnebel et al. (2012) errechneten mit fast demselben Klimamodell-Ensemble (ein zusätzliches viertes RCM) Veränderungen an Enns, Mur, Drau und Ager, mit abnehmendem Abfluss für alle drei Flüsse für das Ende des 21. Jahrhunderts (Abbildung 72 in Anhang A 3.1.6), aber nur geringen Änderungen und teilweise auch Abflusszunahmen in früheren Perioden.

Hanus et al. (2021) wendeten 14 CORDEX-Modelle für mehrere alpine Einzugsgebiet an. Ihre Ergebnisse zeigen für zwei Emissionsszenarien grundsätzlich leichte Zunahmen des Abflusses (Abbildung 73 in Anhang A 3.1.6), mit der Ausnahme des Gailtals (südliche Alpen) und des Feistritztals (östliche Alpen, eher niedrig gelegen), in denen die Medianwerte der RCP8.5-Projektionen geringfügige Abnahmen des Abflusses ergeben. Die Darstellungen der Verteilung der Ergebnisse als Box Plots zeigt die relativ große Schwankungsbreite zwischen einzelnen Ergebnissen mit verschiedenen Klimamodellen.

Stanzel und Kling (2018) verwendeten 16 CORDEX-Modelle in Simulationen für das Donau-Einzugsgebiet bis Wien, mit resultierenden Medianwerten, die keine wesentliche Änderung im mittleren Jahresabfluss bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts anzeigen, und dann geringe Abnahmen von 1-5% zum Ende des Jahrhunderts. Einzelne Modelle ergaben dabei aber viel deutlichere Veränderungen, im Bereich von Zunahmen von mehr als 10% und Abnahmen von mehr als 20%. Erste Testsimulationen mit den neuesten Globalen Klimasimulationen der CMIP6-Generation für die Donau (Stanzel et al. 2020) zeigten, aufgrund etwas höherer Temperaturanstiege und etwas niedrigerer Niederschläge etwas stärkere Abnahmen des Abflusses, v.a. in Sommer und Herbst. Eine systematische Anwendung aller CMIP6-Modelle erfolgt derzeit im Forschungsprojekt STREAM, das auch die atmosphärenphysikalischen Grundlagen der jeweiligen Projektionen untersucht und damit die sehr deutlichen Schwankungen zwischen einzelnen Modellen erklären helfen soll.

Die hier beschriebenen Ergebnisse für Änderungen im mittleren Jahresabfluss in Österreich zeigen also grundsätzlich eine große Abhängigkeit von den verwendeten Klimamodellen und Emissionsszenarien, und damit eine hohe Unsicherheit. Tabelle 5 gibt einen Überblick über wesentliche Ergebnisse der angeführten Studien, wenn diese Angaben zum mittleren Abfluss machen (viele Studien konzentrieren sich auch nur auf saisonale Änderungen, wie z.B. Stagl und Hattermann 2015 für die Donau).

Tabelle 5: Projektionen von Änderungen im mittleren Abfluss (Δ MQ) in verschiedenen Flussgebieten aus verschiedenen Studien

Fluss (Pegel)	Quelle	Zukunftsperiode	Referenzperiode	Emissions-szenario	Δ MQ Ensemble-Bandbreite	Δ MQ Ens.-Mittel
Donau (Wien)	Kling et al. 2012	2021-2050	1961-1990	A1B	-12 / 8 %	-3.9 %
Donau (Wien)	Kling et al. 2012	2071-2100	1961-1990	A1B	-17 / +42 %	-12.0
Donau (Wien)	Stanzel & Kling 2018	2021-2050	1961-1990	RCP4.5	-13 / +13 %	-1.8 %
Donau (Wien)	Stanzel & Kling 2018	2021-2050	1961-1990	RCP8.5	-12 / +17 %	+1.3 %
Donau (Wien)	Stanzel & Kling 2018	2071-2100	1961-1990	RCP4.5	-16 / +13 %	-1.4 %
Donau (Wien)	Stanzel & Kling 2018	2071-2100	1961-1990	RCP8.5	-27 / +16 %	-5.1 %
Ybbs	Goler et al. 2016	2051-2080	1981-2010	A1B	-50 / -200 mm	
Ybbs	Goler et al. 2016	2081-2100	1981-2010	A1B	+50 / -180 mm	
Enns (Steyr)	Nachtnebel et al. 2012	2061-2090	1961-1990	A1B	-2 / -16 %	
Mur (Mureck)	Nachtnebel et al. 2012	2061-2090	1961-1990	A1B	-8 / -11 %	
Drau (Villach)	Nachtnebel et al. 2012	2061-2090	1961-1990	A1B	-8 / -13 %	
Ager	Nachtnebel et al. 2012	2061-2090	1961-1990	A1B	-1 / -19 %	
Gurk	Goler et al. 2016	2051-2080	1981-2010	A1B	+10 / -100 mm	
Gurk	Goler et al. 2016	2081-2100	1981-2010	A1B	0 / -100 mm	
Obere Salzach	Goler et al. 2016	2051-2080	1981-2010	A1B	-60 / -250 mm	
Obere Salzach	Goler et al. 2016	2081-2100	1981-2010	A1B	-100/-300mm	
Gail	Hanus et al. 2021	2071-2100	1981-2010	RCP4.5	-20 / +10 %	+5%
Gail	Hanus et al. 2021	2071-2100	1981-2010	RCP8.5	-30 / +15 %	+/-0%

Insgesamt zeigen sich in den meisten Klimafolgensimulationen eher geringe Änderungen im Bereich einer Zunahme oder Abnahme um wenige Prozent. Für eine fernere Zukunft mit einer stärkeren Klimaerwärmung sowie für Gebiete im Süden Österreichs ergibt sich tendenziell eher ein leichter Rückgang im Abfluss.

3.1.6.2 *Saisonaler Abfluss*

Die Unsicherheit in Projektionen zukünftiger Änderungen im saisonalen Abfluss ist – wie bei den bereits beobachteten Änderungen – viel geringer und es zeigen sich sehr eindeutige Trends, die im Wesentlichen eine Fortsetzung bzw. Verstärkung der bereits beobachteten Veränderungen sind: Sommerabflüsse nehmen ab, Winterabflüsse nehmen zu.

Für Frühling und Herbst hängen die Veränderungen mit der Höhenlage und dem Einfluss von Schneeprozessen und Verdunstungsprozessen zusammen. Aufgrund der Zunahme an flüssigen Niederschlägen und der früheren Schneeschmelze nehmen die Abflüsse im Frühling tendenziell zu. In hochgelegenen Gebieten mit dominanten Schneeprozessen treten die saisonalen Abflussspitzen der Schneeschmelze früher auf und sind tendenziell niedriger. Im Herbst sind die Veränderungen am geringsten, in hochgelegenen Gebieten nehmen die Abflüsse aufgrund eines in Zukunft geringeren Anteils an Schneefall im Niederschlag eher zu, in tieferen Lagen kann eher eine Abnahme aufgrund der höheren Verdunstung und der trockeneren Böden nach den trockeneren Sommern erwartet werden.

Während das Ausmaß dieser Veränderungen in Projektionen verschiedener Modelle schwankt, stimmen die grundsätzlichen Trends in den allermeisten Modellen überein, wie z.B. die Auswertungen eines großen Modellensembles von Stanzel und Kling (2018) in Abbildung 32 für die Donau zeigen. Der Grund dafür ist, dass die saisonalen Veränderungen im Wesentlichen vom Temperaturanstieg angetrieben werden. Die Änderungen im Niederschlag, die wie oben beschrieben deutlich unsicherer sind, können diese Tendenz dann verstärken oder abmildern (wobei die Abnahme des Sommerniederschlags und die Zunahme des Winterniederschlags für die meisten Gebiete in den meisten Modellen eher zu einer Verstärkung führt).

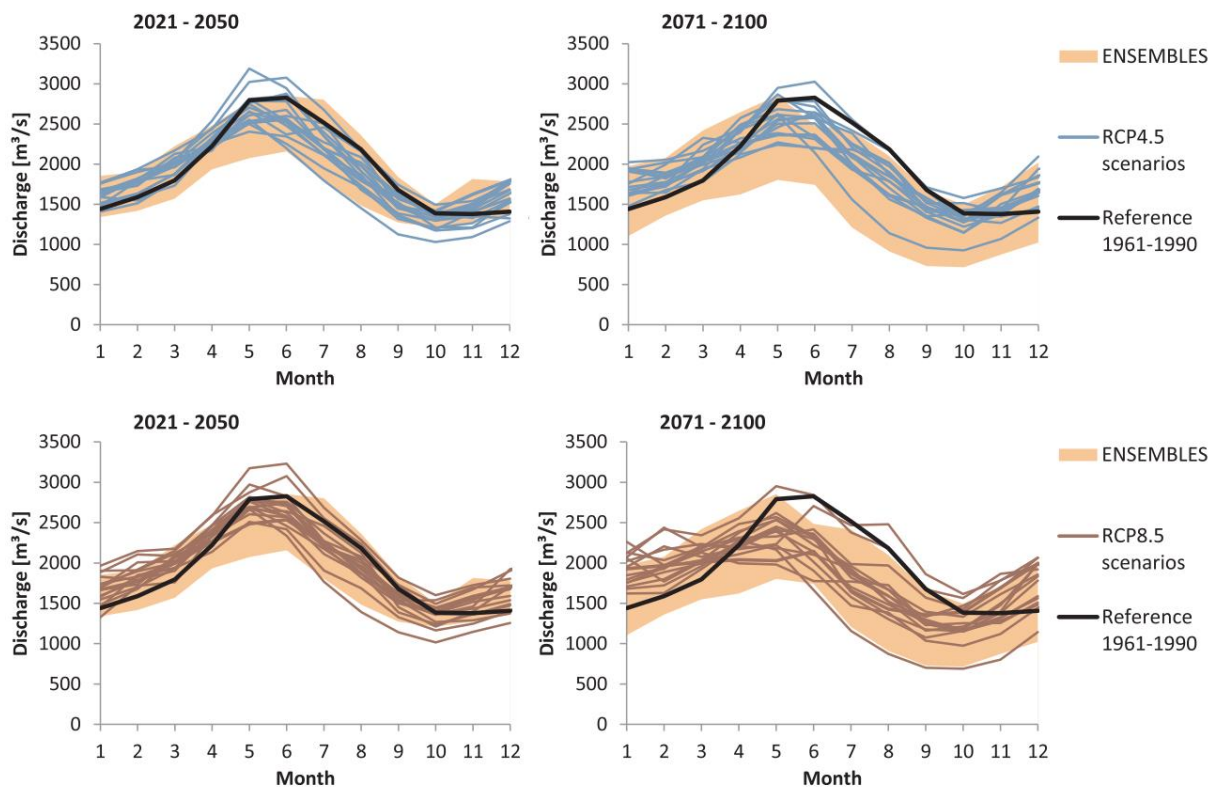


Abbildung 32: Änderung des mittleren Monatsabflusses der Donau in Wien für 2021-2050 (links) und 2071-2100 (rechts), Projektionen mit Daten des CORDEX-Ensembles mit den Emissionsszenarien RCP4.5 (blau, oben) und RCP8.5 (rot, unten), gegenüber 1961-1990 (Quelle: Stanzel und Kling 2018)

Die unterschiedlichen Ausprägungen der saisonalen Veränderungen in verschiedenen Flussgebieten, die wie beschrieben vor allem mit Höhenlage des Einzugsgebiets und dem damit einhergehenden Einfluss von Schneeprozessen zusammenhängen, sind im Anhang dargestellt, in Abbildung 74 (in Anhang A 3.1.6) für den Oberen Inn (hochalpin), die Naab (deutscher Vorland-Zubringer der Donau) und die Traun (nördliche Alpen und Alpenvorland), in Abbildung 75 (in Anhang A 3.1.6) für die Mur und die Drau, und in Abbildung 76 (in Anhang A 3.1.6) für kleinere alpine Einzugsgebiete verschiedener Höhenlagen. Insgesamt zeigt sich in diesen verschiedenen Auswertungen eindrucksvoll die hohe Übereinstimmung in den saisonalen Abflüssen in allen Gebieten, die zumindest teilweise von Schneeprozessen im Winter beeinflusst sind.

3.1.6.3 Extreme: Hochwasser und Niedrigwasser

Projektionen für Hochwasser sind mit besonders hohen Unsicherheiten behaftet, da die Klimamodellerggebnisse für Niederschläge, wie beschrieben, sehr unsicher sind. Für Starkregenereignisse wird zwar tendenziell ein allgemeiner Anstieg erwartet, allerdings führen höhere Starkregenereignisse nur in kleineren Einzugsgebieten direkt zu höheren

Hochwasserabflüssen. Blöschl et al. (2011) haben zusätzlich zum Anstieg der (konvektiven) Starkregenereignisse die folgenden Prozesse als Einflussfaktoren für zukünftige Änderungen im Hochwasserabfluss definiert: saisonale Änderungen im Niederschlag, Änderungen in Schneeprozessen und höhere Verdunstung. Für plausible Annahmen für jeden dieser Prozesse haben sie regionale Tendenzen der Veränderung abgeleitet (Abbildung 77 in Anhang A 3.1.6), die für die Bereiche des nördlichen Alpenrandes (westliches Österreich und Zentralraum) geringe Abnahmen des Hochwassers in der Zukunft erwarten lassen, im übrigen Österreich eher geringe Zunahmen. Blöschl et al. (2011) betonen aber die hohe Unsicherheit („weiche Aussagen“). Insgesamt fassen Blöschl et al. (2018, in einem Update der Studie aus 2011) die mögliche prozentuelle Veränderung des HQ100 aufgrund des Klimawandels für 2021-2050 (im Vergleich zu 1976-2007) wie folgt zusammen: für Gebiete im Rhein-, Donau- und Elbe-Einzugsgebiet -4% bis +10%, im Drau- Mur- und Raab-Einzugsgebiet +1% bis +5%.

Für Niederwasser sind die zukünftigen Änderungen stärker von Änderungen in der Temperatur und den damit verbundenen Änderungen in Schnee- und Verdunstungsprozessen abhängig und damit weniger unsicher. In alpinen Gebieten mit Winterniederwässern wird die fortschreitende Erwärmung zu weniger festen und mehr flüssigen Niederschlägen im Winter führen, und die Niederwasserabflüsse werden sich daher tendenziell erhöhen. In den flachen Regionen des Nordens und Ostens, in denen Niederwässer im Sommer auftreten, kann ein Rückgang des Niederwasserabflusses erwartet werden, wie Klimafolgensimulationen mit zwei Klimamodellen in Blöschl et al. 2018 zeigen (Abbildung 78 in Anhang A 3.1.6). Für die Donau zeigen Kling et al. (2012) für eine nahe Zukunft – wie Blöschl et al. (2018) – keine wesentlichen Änderungen im Niederwasserabfluss, aber deutliche Abnahmen für eine fernere Zukunft am Ende des 21. Jahrhunderts. Dies ist v.a. mit einer zeitlichen Verschiebung des Auftretens der niedrigsten Abflüsse verbunden, die dann aufgrund des Rückganges des Abflusses über den Sommer bereits im Spätsommer und Frühherbst auftreten. Haslinger et al. (2023) zeigen auf der Grundlage von CORDEX-Klimamodellen, dass extreme Dürresituationen wie im Jahr 2003 – die auch mit ausgeprägtem Niederwasser verbunden sind – in Zukunft deutlich häufiger zu erwarten sind. Aufgrund der Projektionen einer noch stärkeren Erwärmung und noch geringerer Niederschläge im Sommer in den neuesten CMIP6-Klimamodellen könnten häufigere Niederwassersituationen im Sommer und Frühherbst an der Donau bereits früher als bisher erwartet verstärkt auftreten (dies wird im laufenden ACRP-Forschungsprojekt STREAM untersucht). Dadurch könnte es sinnvoll werden, auch im Sommer und Herbst auftretende Niederwasserperioden durch vermehrte Abgabe von Wasser aus Speichern abzufedern, wie in Kapitel 4 diskutiert.

3.2 Auswirkungen auf die Wasserkraft

3.2.1 Laufkraftwerke

Wie in Kapitel 2.2.1 gezeigt gibt es für Laufkraftwerke einen direkten Zusammenhang zwischen natürlichem Zufluss und Energieproduktion. Dementsprechend können die erwartbaren Veränderungen in der Produktion an Laufkraftwerken aus den Projektionen für den Abfluss abgeleitet werden, so dass tendenziell eine geringfügige Abnahme oder Zunahme im Bereich weniger Prozent erwartet werden kann.

Es gibt aber auch eine Reihe von publizierten Klimafolgenstudien, die direkt Aussagen über die Energieproduktion v.a. an Laufkraftwerken machen, wobei die verfügbaren österreichischen Publikationen auf Auswertungen einzelner oder weniger Klimamodelle beruhen und daher nicht gut die gesamte Unsicherheit in den Niederschlagsprojektionen berücksichtigen. Weitere Unsicherheiten ergeben sich durch Verschiedenheiten in Ausbau und Betrieb der Laufkraftwerke und der Art der Abbildung dieser Charakteristika in den Klimafolgensimulationen. Stanzel und Nachtnebel (2010) errechneten auf der Grundlage der Projektionen eines Klimamodells unter drei Emissionsszenarien eine Abnahme der Gesamtproduktion aus Wasserkraft um rund -10% im Verlauf des 21. Jahrhunderts, wobei diesen Berechnungen keine explizite Modellierung der Wasserkraft zugrunde liegt. Koch et al. (2011) zeigten für das Donaeinzugsgebiet bis Achleiten für drei ausgewählte A1B-Klimaprojektionen Rückgänge in der hydroelektrischen Energieerzeugung zwischen -2% und -7% bis 2060. Totschnig et al. (2017) berichten von einem simulierten Rückgang der Wasserkrafterzeugung von -5.5% im Mittel von drei Zukunftsprojektionen aus der ENSEMBLES-Generation unter A1B-Emissionsszenarien. Auch Wagner et al. (2016) wählten vier ENSEMBLES-Klimaprojektionen unter dem A1B-Emissionsszenario aus, die sie entsprechend der Haupteigenschaften des Klimaänderungssignals bezeichneten (Abbildung 33). Ihre Ergebnisse schwanken zwischen geringen Anstiegen bis 3% und geringen Abnahmen bis -4% bis 2050.

Alle genannten Autoren deuten auch übereinstimmend auf die klaren Veränderungen in der saisonalen Erzeugung hin, mit deutlichen Zunahmen der Wasserkraftproduktion im Winterhalbjahr und deutlichen Abnahmen im Sommerhalbjahr (siehe Abbildung 33 unten und Abbildung 79 in Anhang A3.2, in der Größenordnung von 10% bis 20% Zunahme im Winter und Abnahme im Sommer bei Stanzel und Nachtnebel 2010 und Koch et al. 2011).

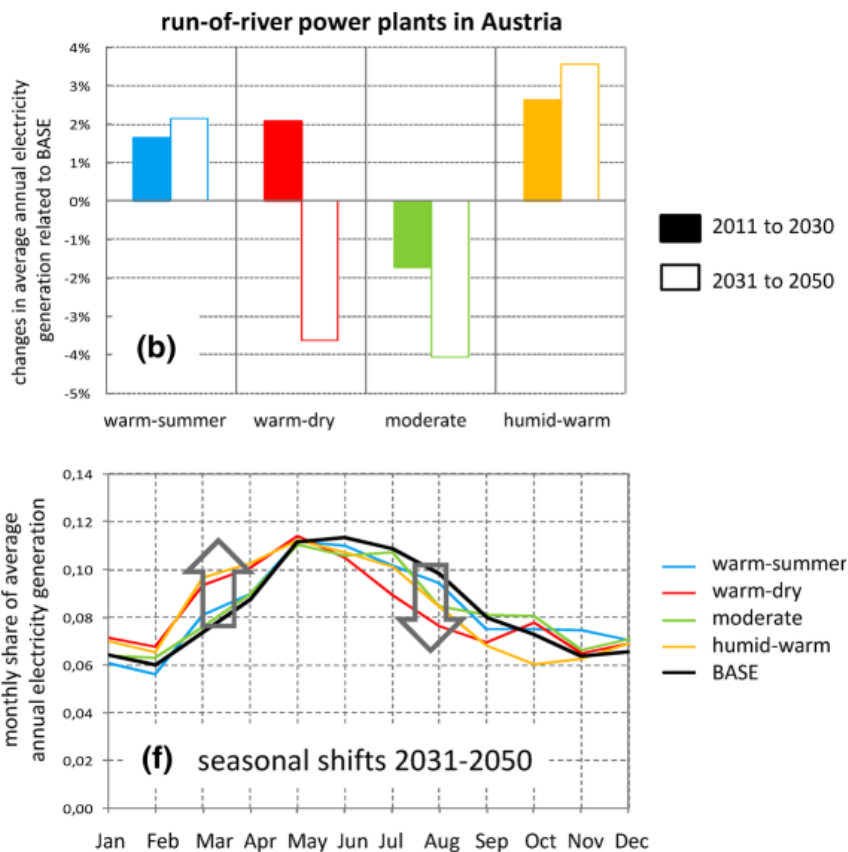


Abbildung 33: Mittlere jährliche (oben) und monatliche (unten) Veränderung in der Energieerzeugung an Laufkraftwerken in Österreich für die Perioden 2011-2030 (nur oben) und 2031-2050 (oben und unten) in vier verschiedenen Klimaprojektionen in einem A1B-Emissionsszenario (Quelle: Wagner et al. 2016)

Für Österreich liegen keine Simulationen der Wasserkrafterzeugung mit neueren Klimamodellen und größeren Modellensembles vor. Für die Schweiz wurde kürzlich eine neue Arbeit veröffentlicht (Wechsler et al. 2023), die Projektionen der Erzeugung für 21 Laufkraftwerke erstellt, basierend auf einem großen Ensemble der CH2018-Szenarien, die auf den CORDEX-Modellen und drei Emissionsszenarien (RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5) beruhen. Die Ergebnisse sind sehr ähnlich wie jene der älteren österreichischen Auswertungen: im Jahresmittel wird je nach Periode und Emissionsszenario eine geringe Abnahme der Produktion in den Schweizer Laufkraftwerken zwischen 0% und -7% erwartet. Die saisonale Veränderung wird als noch eindeutiger angeführt, mit einer Zunahme im Winter (+2% bis +9%) und einer Abnahme im Sommer (-2% bis -22%, siehe Abbildung 80 in Anhang A3.2).

Insgesamt zeigt sich, wie bei den Ergebnissen für den Abfluss, eine relativ große Unsicherheit zwischen den Projektionen. Einige prognostizieren eine geringe Zunahme, andere eine geringe Abnahmen der zukünftigen Produktion in Laufkraftwerken. Ganz deutlich stimmen aber die Ergebnisse zur saisonalen Veränderung überein, mit zunehmender Winterproduktion und abnehmender Sommerproduktion. Diese saisonale Verschiebung wird immer ausgeprägter für weiter in der Zukunft liegende Perioden mit stärkeren klimatischen Veränderungen.

3.2.2 Speicherkraftwerke

Wie in Kapitel 2.2.2 gezeigt können Speicherkraftwerke aufgrund der hohen Speichervolumina der alpinen Speicher saisonal oder über einzelne Jahre die Schwankungen des natürlichen Wasserdargebots ausgleichen. Schwankungen des Wasserdargebots aufgrund des Klimawandels können damit abgepuffert werden, einerseits für das Energiesystem, andererseits potenziell für die flussab liegenden Fließgewässer, wie in Kapitel 4 diskutiert wird.

Langfristig hängt aber auch die Produktion in Speicherkraftwerken vom natürlichen Wasserdargebot und dessen zukünftigen Veränderungen ab. Der Anstieg der Temperatur führt zu höherer Verdunstung, in hochalpinen Gebieten vor allem in wenigen Monaten im Sommerhalbjahr. Zunahmen in den Niederschlägen könnten die höhere Verdunstung kompensieren, wobei wie beschrieben die Projektionen für Niederschlag sehr unsicher sind. Tendenziell werden in den alpinen Gebieten Österreichs eher leichte Zunahmen im Niederschlag erwartet, vor allem im Winterhalbjahr. Mit hoher Sicherheit wird es aber zu deutlichen saisonalen Verschiebung kommen, durch früheren Beginn und früheres Ende der Schneeschmelze, und damit auch ein früheres Ausapern und potenziell mehr Gletscherschmelze (wie bereits in Kapitel 3.1.4. beschrieben). Aufgrund der relativ kleinen Einzugsgebiete der alpinen Speicher kann dabei erwartet werden, dass die Veränderungen relativ spezifisch für das jeweilige Gebiet sind, sowohl in Bezug auf die lokalen Veränderungen im Niederschlag, als auch in Bezug auf den zeitlichen Verlauf und die Ausprägung der saisonalen Veränderungen (die vor allem von topografischen Verhältnissen und den lokalen Eigenschaften der Gletscher abhängen).

Die meisten Forschungsarbeiten zu Klimaprojektionen für alpine Speicher betrachten dementsprechend auch nur einzelne Gebiete und Systeme, und ihre Ergebnisse können nur teilweise verallgemeinert werden. Nachtnebel et al. (2012) zeigen für den Gepatschspeicher die in Abbildung 29 in Kapitel 3.1.4 dargestellten zukünftigen saisonalen Veränderungen der Zuflussanteile. Ähnlich starke saisonale Veränderungen im Zufluss simulieren Anghileri et al. (2018) für den Zufluss zum südschweizer Mattmark-System unter einem A1B-Klimaszenario (Abbildung 34).

Die früher einsetzende Schnee- und Gletscherschmelze und die damit höheren Zuflüsse im Frühling und geringeren Zuflüsse in Sommer und Herbst können tendenziell zu höheren Speicherständen im Frühling und niedrigeren Speicherständen im Herbst führen, wie Bombelli et al. (2019) für das System des Valtellina-Tals in den italienischen Alpen simulieren (Abbildung 35 oben). Dadurch ist in den Sommermonaten eine höhere Erzeugung möglich, im Herbst und zu Beginn des Winters verringert sich die Erzeugung aber (Abbildung 35 unten). Je nach Speicherkapazität können in alpinen Speichern die saisonalen Verschiebungen des Zuflusses stärkeren oder nur sehr geringen Einfluss auf die Saisonalität der Produktion haben.

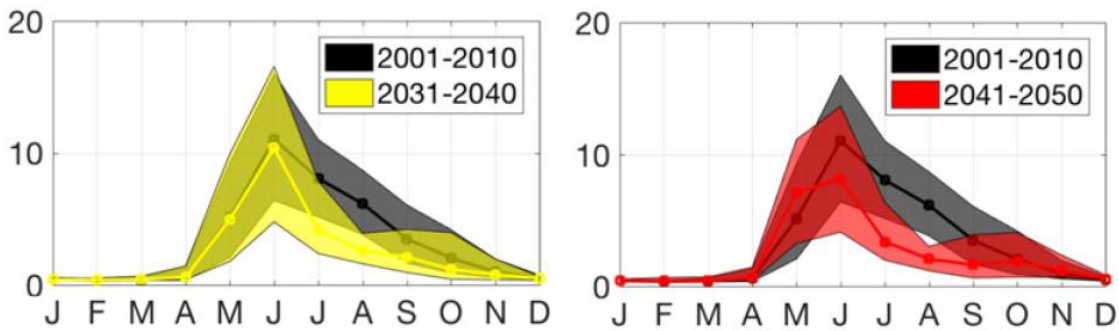


Abbildung 34: Mittlerer monatlicher Zufluss zum Mattmark-System, in der Referenzsimulation sowie in den Zukunftsperioden 2031-2040 (links) und 2041-2050 (rechts), unter stochastisch generierten Wetterszenarien auf der Grundlage einer Klimaprojektion des RCM REMO in einem A1B-Emissionsszenario (Quelle: Anghileri et al. 2018)

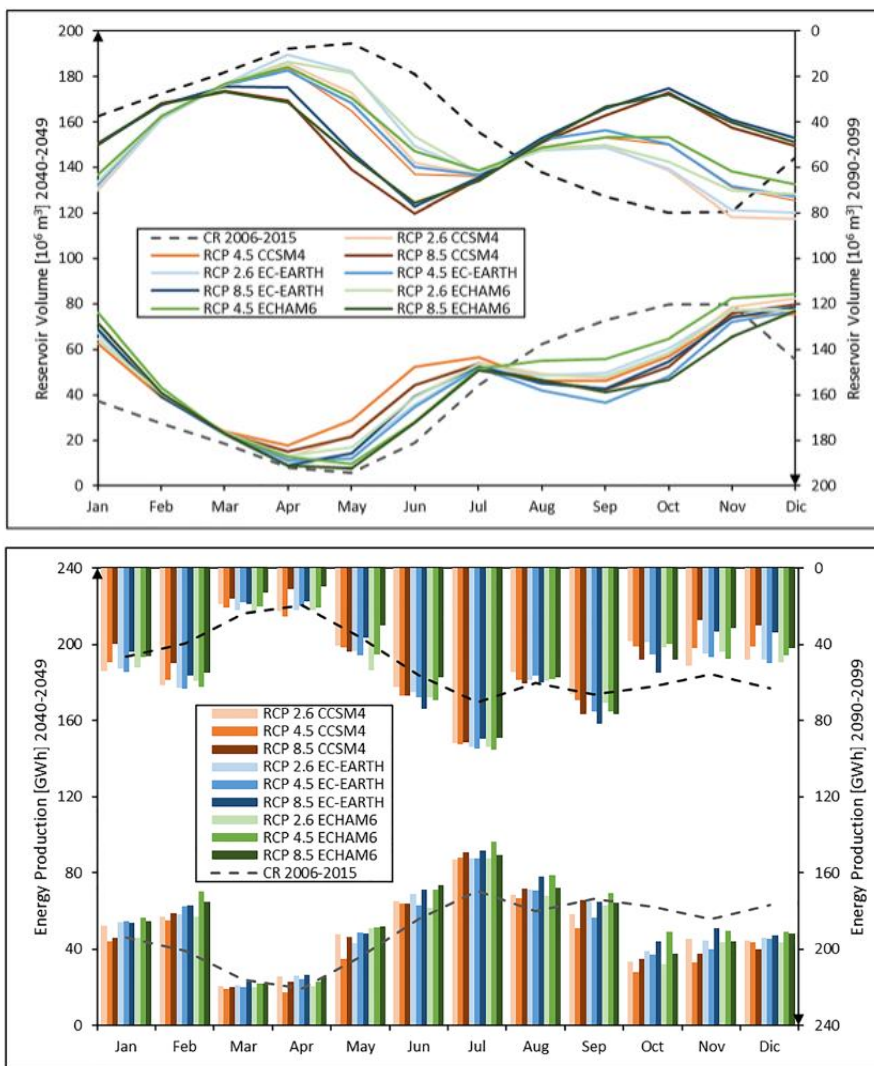


Abbildung 35: Mittlere monatliche Speicherstände (oben) und Energieerzeugung (unten) im Valtellina-System, in der Referenzsimulation (strichlierte Linie) sowie in den Zukunftsszenarien (bunte Linien bzw. Balken, für drei Emissionsszenarien und drei Klimamodelle) für 2040-2049 (jeweils untere Darstellung) und 2090-2099 (jeweils obere Darstellung, mit umgedrehter y-Achse); Quelle: Bombelli et al. (2019)

Die starken individuellen Unterschiede verschiedener Speichersysteme in verschiedenen Einzugsgebieten betonen auch Otero et al. (2023) in ihren Klimafolgensimulationen für fünf verschiedene Speichersysteme in den Schweizer Alpen. Die simulierten heißen und trockenen Bedingungen, wie sie in ungünstigen Klimaszenarien in Zukunft öfter auftreten werden, führen bei kleineren und mittleren Speichern ohne Gletscher zu einem Rückgang der Produktion. Bei größeren Speichern mit hohem Gletscheranteil im Einzugsgebiet kommt es aufgrund der Gletscherschmelze zu einem Anstieg der Produktion.

Wie lange die noch vorhandenen Gletschervolumina für eine starke sommerliche Gletscherschmelze noch ausreichen, ist ebenfalls von Gebiet zu Gebiet stark unterschiedlich, hängt von der Höhenlage und Gletscherform und -volumen ab, und ist zumeist unbekannt (siehe auch Diskussion des „peak water“ in Kapitel 3.1.4). Für die alpinen Speicher in Österreich wird dies derzeit im laufenden ACRP-Projekt HyMELT-CC erforscht.

4 Bereitstellung von Flexibilität und Ausgleich von Niederwasser aufgrund sommerlicher Trockenperioden durch Speicherkraftanlagen

Die dritte zu überprüfende Hypothese bezieht sich auf eine erwartete zukünftig höhere Variabilität im Niederschlag und in der Wasserverfügbarkeit und lautet: „Die Konzentration der Niederschläge wird zunehmen. Speicher können dazu beitragen, diesen Konzentrationseffekt abzufedern und die Flexibilität im System zu bewahren.“ Bei der Analyse dieser Hypothese soll vor allem die mögliche ausgleichende Rolle von Speicherkraftanlagen zum Ausgleich von Trockenheit und Niederwasser untersucht werden.

Speicherkraftwerke stellen Flexibilität für das österreichische Stromsystem bereit. Diese Flexibilität, und dadurch die Stabilisierung des Stromsystems, kann auf unterschiedlichen zeitlichen Skalen erbracht werden. Neben kurzfristigen Systemdienstleistungen (Regelenergie) können Speicher zum Ausgleich von Schwankungen der täglichen bis hin zur saisonalen Stromerzeugung eingesetzt werden. Für das gesamte Stromsystem ist unter anderem die Überbrückung von Zeiten geringer Wind- und Photovoltaik-Erzeugung durch Flexibilitätsoptionen relevant. In Bezug auf den Klimawandel können Speicher dazu beitragen, den Effekt von (1) Konzentrationseffekten in Niederschlägen (regionale Starkregenereignisse gefolgt von Trockenperioden) und (2) langanhaltenden Trockenperioden zu reduzieren.

(1) Kurze Starkregenereignisse im Einzugsgebiet der Speicher können durch die Speicher zurückgehalten werden und das Wasser kann zu späteren Zeitpunkten abgegeben werden. Dabei wird lokal zudem die Hochwassersituation entspannt.

(2) Für die Wasserkrafterzeugung ist insbesondere die Überbrückung von Niederwasserperioden relevant. Im Folgenden wird auf diese Form der Flexibilitätsoptionen näher eingegangen.

Bei Niederwasser handelt es sich um natürliche Phänomene im Jahresgang einer hydrologischen Zeitreihe, wobei die Abflüsse auf minimale Werte zurückfallen können. Wenn Grenzwerte unterschritten werden, kann es zur Beeinträchtigung der Energieerzeugung kommen, insbesondere bei Laufwasserkraftwerken oder thermischen Kraftwerken aufgrund fehlender Kühlwasserverfügbarkeit. Es können aber auch andere Sektoren, wie zum Beispiel die Schifffahrt oder Industrie, beeinträchtigt werden.

In den mehrheitlich alpin geprägten Flüssen Österreichs treten Niederwasserperioden bisher vor allem im Winter auf. Klimawandelprojektionen zeigen, dass es in Zukunft zu weniger festen und mehr flüssigen Niederschlägen im Winter kommen wird, und sich die Winter-Niederwasserabflüsse daher tendenziell erhöhen werden. Es wird aber auch erwartet, dass zukünftig längere Trockenperioden im Sommer, zusammen mit höherer

Verdunstung, zu deutlichen Rückgängen im Abfluss führen werden, sodass zukünftig auch im Spätsommer und Frühherbst Niederwassersituationen auftreten können.

Die Verschiebung von Niederwasserperioden aus dem Winter in den Spätsommer und Frühherbst wird sich an den stärker alpin geprägten Flüssen (z.B. Inn, Salzach, Drau) erst bei einem stark ausgeprägten Klimawandel in der fernen Zukunft ergeben. Auch an der Donau kann erwartet werden, dass in den nächsten Jahrzehnten noch Winterniederwässer dominant sein werden. Hier kann es aber schon in einer näheren Zukunft zu häufigeren Herbst- und Sommerniederwässern kommen. Eine genaue Analyse der zukünftigen zeitlichen Verschiebungen im Auftreten von Niederwasser wird derzeit im laufenden ACRP-Forschungsprojekt STREAM durchgeführt.

In Bezug auf Niederwasser wirken die Abgaben aus den alpinen Speichern grundsätzlich ausgleichend. Im aktuellen Speicherbetrieb findet an den Flüssen mit Speicheranlagen im Einzugsgebiet häufig eine Aufhöhung des Winter-Niederwasserabflusses statt. Aufgrund der vermehrten Speicher-Abgabe und Erzeugung im Winter, sowie dem Kaskadeneffekt, bei dem die Abgabe von gespeichertem Wasser auch die Erzeugung der Laufwasserkraftwerke stromab erhöht, wird die Energieversorgung in den Wintermonaten sichergestellt. Die in Zukunft erwarteten Niederwasserperioden im Spätsommer und Frühherbst könnten die Erzeugung aus Laufwasserkraftwerken, aber auch die Erzeugung aus thermischen Kraftwerken aufgrund von fehlendem Kühlwasser reduzieren. Zudem könnte die Entnahme von Kühlwasser für Industrieanlagen, aber auch die Schifffahrt beeinträchtigt werden. In solchen Situationen kann Wasser aus den alpinen Speichern die Stromerzeugung aus Laufwasserkraft und thermischen Kraftwerken im Sommer und Frühherbst unterstützen (wie es derzeit in den Wintermonaten passiert). Weiters wäre es theoretisch denkbar, dass Wasser aus den alpinen Speichern abgegeben wird, um andere Sektoren zu unterstützen.

Für eine Abschätzung der möglichen Kapazität der alpinen Speicheranlagen zur Aufhöhung des Abflusses während Niederwasserphasen, wurden für die Einzugsgebiete der Donau und der Drau die Speichervolumina der größten Anlagen aufsummiert. Unter der Annahme eines maximal zur Abgabe zur Verfügung stehenden Anteils dieser Gesamtkapazität, sowie einer durchgehenden Gesamtabgabe wurde in einigen Szenarien berechnet, wie lange eine Erhöhung des Abflusses möglich ist (Tabelle 6).

Aufgrund der hohen Speichervolumina sind relativ starke Aufhöhungen für die alpinen Flüsse relativ lange möglich. Für die Salzach bei Oberndorf zum Beispiel würde eine Aufhöhung um zusätzliche 50 m³/s circa zu einer Verdopplung der derzeit beobachteten extremen Niederwasserabflüsse führen, und könnte je nach verfügbarem Anteil des Speichervolumen 17 bis 35 Tage lang durchgeführt werden. Für die Donau ist der mögliche Einfluss der alpinen Speicher aber zeitlich limitiert und nur für kurze Niederwasserphasen effektiv, während für längere, mehrere Wochen dauernde Niederwasserphasen im Sommer das verfügbare Speichervolumen zu gering ist. Für die Donau bei Krems würde zum Beispiel eine Aufhöhung um 150 m³/s einer Erhöhung

extremer Niederwasserabflüsse um rund 20 % entsprechen, und könnte je nach verfügbarem Anteil des Speichervolumen 6 bis 12 Tage lang durchgeführt werden.

Tabelle 6: Theoretisch mögliche Dauer der Aufhöhung von Niederwasser aus der Abgabe alpiner Speicher (in Tagen) unter der Annahme verschiedener verfügbarer Volumina und verschiedener Abgabemengen

Donau (angenommenes ges. Speichervolumen: 750 hm ³)			
Verfügbares Speichervolumen (% des ges. Volumen)	angenommene Abgabe (m ³ /s)		
	50 m ³ /s	100 m ³ /s	150 m ³ /s
10%	17 Tage	9 Tage	6 Tage
20%	35 Tage	17 Tage	12 Tage
Drau (angenommenes ges. Speichervolumen: 370 hm ³)			
Verfügbares Speichervolumen (% des ges. Volumen)	angenommene Abgabe (m ³ /s)		
	25 m ³ /s	50 m ³ /s	
10%	17 Tage	9 Tage	
20%	35 Tage	17 Tage	

An der Drau ist das vorhandene Speichervolumen im Einzugsgebiet, im Verhältnis zur Einzugsgebietsgröße, noch höher, sodass substanzielle Aufhöhungen des Niederwassers um 25 m³/s oder 50 m³/s je nach verfügbarem Anteil des Speichervolumen zwischen 9 und 35 Tage lang durchgeführt werden könnten. Tagesmittelwerte des Abflusses in Niederwasserperioden an der Drau bei Lavamünd liegen bei rund 80 m³/s, allerdings treten aufgrund des bestehenden Kraftwerksbetriebs zeitweise deutlich niedrigere Abflüsse auf.

Die Nutzung von gespeichertem Wasser aus alpinen Speichern für eine temporäre Aufhöhung des Abflusses im Sommer ist – wie derzeit im Winter – theoretisch möglich. Allerdings ist die dauerhafte Abgabe größerer Wassermengen mit negativen Auswirkungen auf die energiewirtschaftliche Verfügbarkeit und Nutzung in den darauffolgenden Winter-Monaten verbunden, in denen ein höherer Energiebedarf besteht. Mittelfristig kann daher tendenziell davon ausgegangen werden, dass der Nutzen aufgrund der Unterstützung der Energieerzeugung und anderer Sektoren im Spätsommer oder Herbst geringer ist, als die daraus entstehenden Kosten (bzw. verlorenen Gewinne aufgrund ausbleibender Stromerzeugung im Winter). Langfristig könnte sich dies ändern, und müsste im Detail unter Berücksichtigung des gesamten Energiesystems untersucht werden. In diesem Zusammenhang kann die derzeit stark ansteigende Erzeugung aus Solarenergie eine Rolle spielen, die vor allem in den warmen und sonnenreichen Sommermonaten hoch sein wird. Speicherkraftwerke könnten dadurch im Spätsommer hinsichtlich der Erzeugung weniger relevant werden, jedoch hinsichtlich der Flexibilitätsbereitstellung an Bedeutung gewinnen. Hinsichtlich der

saisonalen Verschiebung könnte der zukünftig erhöhte Abfluss im Winter jedoch eine Absenkung der Speicher im Herbst rechtfertigen (einen derart geänderten Speicherbetrieb in der Zukunft zeigen z.B. die Simulationen von Bombelli et al. (2019) in Abbildung 35).

5 Literatur

- Alfieri L., Burek P., Feyen L. and Forzieri G. 2015. Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 2247–2260
- Anghileri D., Botter M., Castelletti A., Weigt H., Burlando P. 2018. A comparative assessment of the impact of climate change and energy policies on Alpine hydropower. *Water Resources Research*, 54, 9144–9161.
<https://doi.org/10.1029/2017WR022289>
- Blaschke A.P., Merz R., Parajka J., Salinas J., Blöschl G. 2011. Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot von Grund- und Oberflächenwasser. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 63, (1–2), 21–30.
- Blöschl G., Viglione A., Merz R., Parajka J., Salinas J. und Schöner W. 2011. Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasser und Niederwasser. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 63, (1–2), 21–30.
- Blöschl G., Blaschke A.P., Haslinger K., Hofstätter M., Parajka J., Salinas J., Schöner W. 2018. Auswirkungen der Klimaänderung auf Österreichs Wasserwirtschaft – ein aktualisierter Statusbericht. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 70, 462–473, <https://doi.org/10.1007/s00506-018-0498-0>
- Bombelli G.M., Soncini A., Bianchi A., Bocchiola D. 2019. Potentially modified hydropower production under climate change in the Italian Alps. *Hydrological Processes* 33, 2355–2372. <https://doi.org/10.1002/hyp.13473>
- Böhm R., Auer I., Schöner W., Ganekind M., Gruber C., Jurkovic A., Orlik A., Ungersböck M., 2009. Eine neue Webseite mit instrumentellen Qualitäts-Klimadaten für den Grossraum Alpen zurück bis 1760. *Wiener Mitteilungen Band 216: Hochwässer: Bemessung, Risikoanalyse und Vorhersage*
- Chimani B., Heinrich G., Hofstätter M., Kerschbaumer M., Kienberger S., Leuprecht A., Lexer A., Peßenteiner S., Poetsch M.S., Salzmann M., Spiekermann R., Switanek M. und Truhetz H., 2016. ÖKS15 – Klimaszenarien für Österreich. Daten, Methoden und Klimaanalyse. Projektendbericht, Wien.
- Fischer A., Seiser B., Stocker-Waldhuber M., Mitterer C., Abermann, J. 2015. The Austrian Glacier Inventories GI 1 (1969), GI 2 (1998), GI 3 (2006), and GI LIA in ArcGIS (shapefile) format. PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.844988>
- Fürst J., Nachtnebel H.P., Kling H., Hörhan, T., 2008. Trends in Niederschlag und Abfluss. *Mitteilungsblatt des hydrographischen Dienstes in Österreich* 85, 1–43.
- Gali Reniu, M. 2017. Evapotranspiration projections in Austria under different climate change scenarios. Master Thesis, University of Natural Resources and Life Sciences Vienna

- Gobiet A., et al. 2022. Future Snow Cover Evolution in Austria (FuSE-AT). Publizierbarer Endbericht für den Klima- und Energiefonds.
- Haslinger K., Schöner W., Abermann J., Laaha G., Andre K., Olefs M., Koch R. 2023. Apparent contradiction in the projected climatic water balance for Austria: wetter conditions on average versus higher probability of meteorological droughts. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 23, 2749–2768. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-2749-2023>
- Huss, M. und Hock, R. 2015. A new model for global glacier change and sea-level rise. *Front. Earth Sci.* 3. DOI: 10.3389/feart.2015.00054.
- Huss, M. und Hock, R. 2018. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change* 8, 135–140 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>
- Kling H., Fuchs M., Paulin M. 2011. Auswirkungen verschiedener Szenarien der Klimaänderung auf den österreichischen Abschnitt der Donau. Endbericht Hydrologische Studie für die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG).
- Kling H., Fuchs M., Paulin M. 2012. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology* 424–425 (2012) 264–277. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.01.011
- Kling H., Stanzel P., Fuchs M., Nachtnebel H.P. 2015. Performance of the COSERO precipitation-runoff model under non-stationary conditions in basins with different climates. *Hydrological Sciences Journal* 60 / 7-8. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.959956>
- Koboltschnig G.R. und Schöner W. 2011. The relevance of glacier in the water cycle of the Alps: the example of Austria. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 2039–2048, doi:10.5194/hess-15-2039-2011
- Koch F., Prasch M., Bach H., Mauser W., Appel F., Weber M. 2011. How Will Hydroelectric Power Generation Develop under Climate Change Scenarios? A Case Study in the Upper Danube Basin. *Energies* 2011, 4, 1508-1541; doi:10.3390/en4101508
- Krenn A., Winkelmeier J., Tiefgraber C., Cattin R., Müller S., Truhetz H., Biberacher M., Gadocha S. 2011. Windatlas und Windpotentialstudie Österreich. Endbericht für den Klima- und Energiefonds.
- Nachtnebel H.P., Dokulil M., Kuhn M., Loiskandl W., Sailer R., Schöner W. 2014: Der Einfluss des Klimawandels auf die Hydrosphäre. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 411–466.
- Nachtnebel H.P., Stanzel P., Herrnegger M. 2012. Power through Resilience of Energy Systems: Energy Crises, Trends and Climate Change (PRESENCE) Contributions to

Work packages 4–Hydrology and hydropower and 5 – Availability of cooling water for thermal power plants and the industry. Publizierbarer Endbericht für den Klima- und Energiefonds.

- Olefs M., Koch R., Schöner W., Marke T. (2020): Changes in Snow Depth, Snow Cover Duration, and Potential Snowmaking Conditions in Austria, 1961–2020—A Model Based Approach. *Atmosphere* 2020, 11, 1330.
<https://doi.org/10.3390/atmos11121330>
- Otero N., Horton P., Martius O., Allen S., Zappa M., Weschler T., Schaefli B. 2023. Impacts of hot-dry conditions on hydropower production in Switzerland. *Environ. Res. Lett.* 18 (2023) 064038
- Schöner W., Böhm R., Haslinger K., Blöschl G., Kroiß H., Merz R., Blaschke A.P., Viglione A., Parajka J., Salinas J.L., Drabek U., Laaha G., Kreuzinger N. 2018. Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft. Studie der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik und der Technischen Universität Wien im Auftrag von Bund und Ländern. Herausgegeben vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
- Stagl J.C. und Hattermann F.F. 2015. Impacts of Climate Change on the Hydrological Regime of the Danube River and Its Tributaries Using an Ensemble of Climate Scenarios. *Water* 7 (11), 6139-6172. <https://doi.org/10.3390/w7116139>
- Stanzel P. und Nachtnebel H.P. 2010. Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und die Wasserkraftnutzung in Österreich. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 62 / 9-10, 180-187
- Stanzel P., Kling, H. 2018. From ENSEMBLES to CORDEX: Evolving climate change projections for Upper Danube River flow. *Journal of Hydrology* 563, 987-999.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.057>
- Stanzel P., Gonzalez P., Kling H., Brayshaw D. 2020. Application of PRIMAVERA results in climate impact modelling of the Upper Danube River. Presentation at the PRIMAVERA Webinar on 21.05.2020
- Totschnig G., Hirner R, Müller A., Kranzl L., Hummel M., Nachtnebel H.-P., Stanzel P., Schicker I., Formayer H. 2017. Climate change impact and resilience in the electricity sector: The example of Austria and Germany. *Energy Policy* 103, 238-248. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.019>.
- Vautard et al. 2010. Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness. *Nature Geoscience* 3, 756-761, doi: 10.1038/ngeo979
- Wagner T., Themeßl M., Schüppel A., Gobiet A., Stigler H., Birk S. 2017. Impacts of climate change on stream flow and hydro power generation in the Alpine region. *Environ Earth Sci* 76, 4. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6318-6>

Weber M. et al., 2009: Die Bedeutung der Gletscherschmelze für den Abfluss der Donau gegenwärtig und in der Zukunft, in: Mitteilungsblatt des hydrographischen Dienstes in Österreich Nr. 86, Wien

Wechsler T., Stähli M., Jorde K., Zappa M., Schaefli B. 2023. The future of Alpine Run-of-River hydropower production: Climate change, environmental flow requirements, and technical production potential. Science of The Total Environment 890, 163934. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163934>

Wallner M. 2022. Future effects of glacier retreat on downstream runoff and hydropower generation in Alpine regions of different catchment sizes. Master Thesis, Universität Graz.

Zeder J. und Fischer E.M. 2020. Observed extreme precipitation trends and scaling in Central Europe, Weather and Climate Extremes 29, 100266, <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100266>.

Anhang

A2 Beobachtete Veränderungen

A 2.1 Wasserdargebot

A 2.1.1 Temperatur und Niederschlag

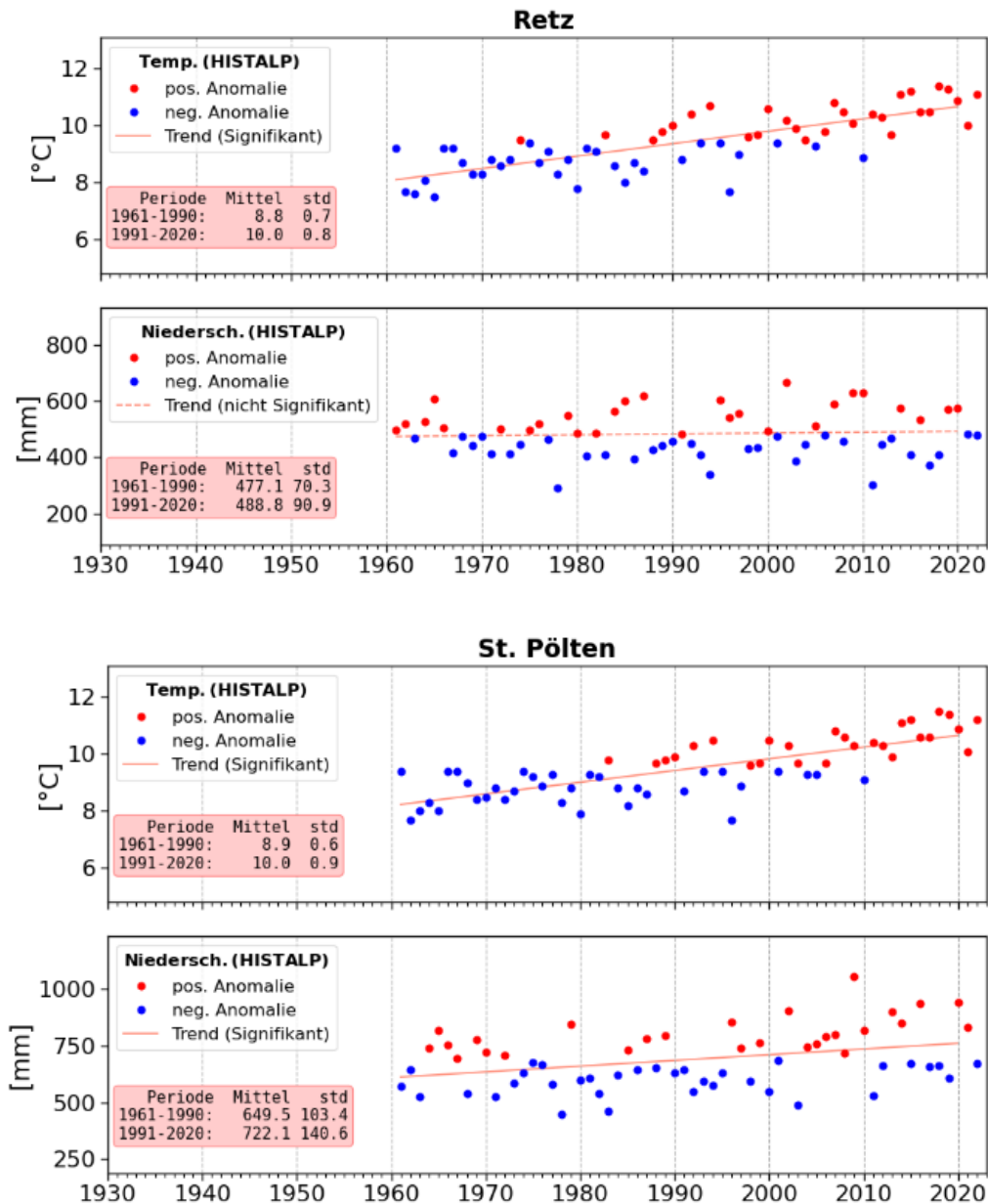


Abbildung 36: Trendanalyse der Temperatur (oben) und Niederschlag (unten) für die HISTALP-Station Retz und Sankt Pölten. Rote Punkte zeigen eine positive, blaue eine negative Anomalie der Jahreswerte zum Mittel der gesamten Zeitreihe. Für die Trendanalyse wird ebenfalls die gesamte Zeitreihe betrachtet (1961 – 2020).

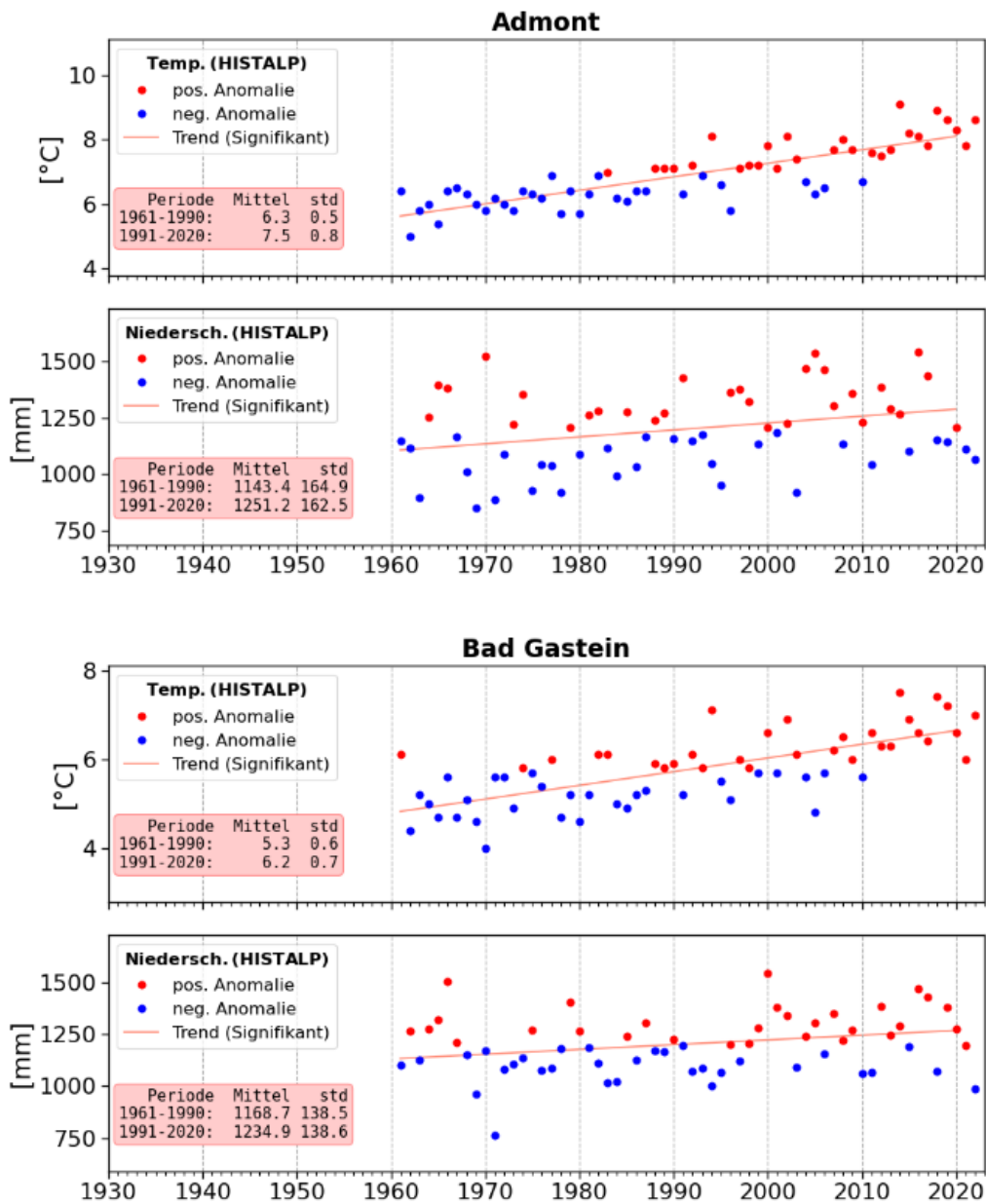


Abbildung 37: Trendanalyse der Temperatur (oben) und Niederschlag (unten) für die HISTALP-Station Admont und Sankt Bad Gastein. Rote Punkte zeigen eine positive, blaue eine negative Anomalie der Jahreswerte zum Mittel der gesamten Zeitreihe. Für die Trendanalyse wird ebenfalls die gesamte Zeitreihe betrachtet (1961 – 2020).

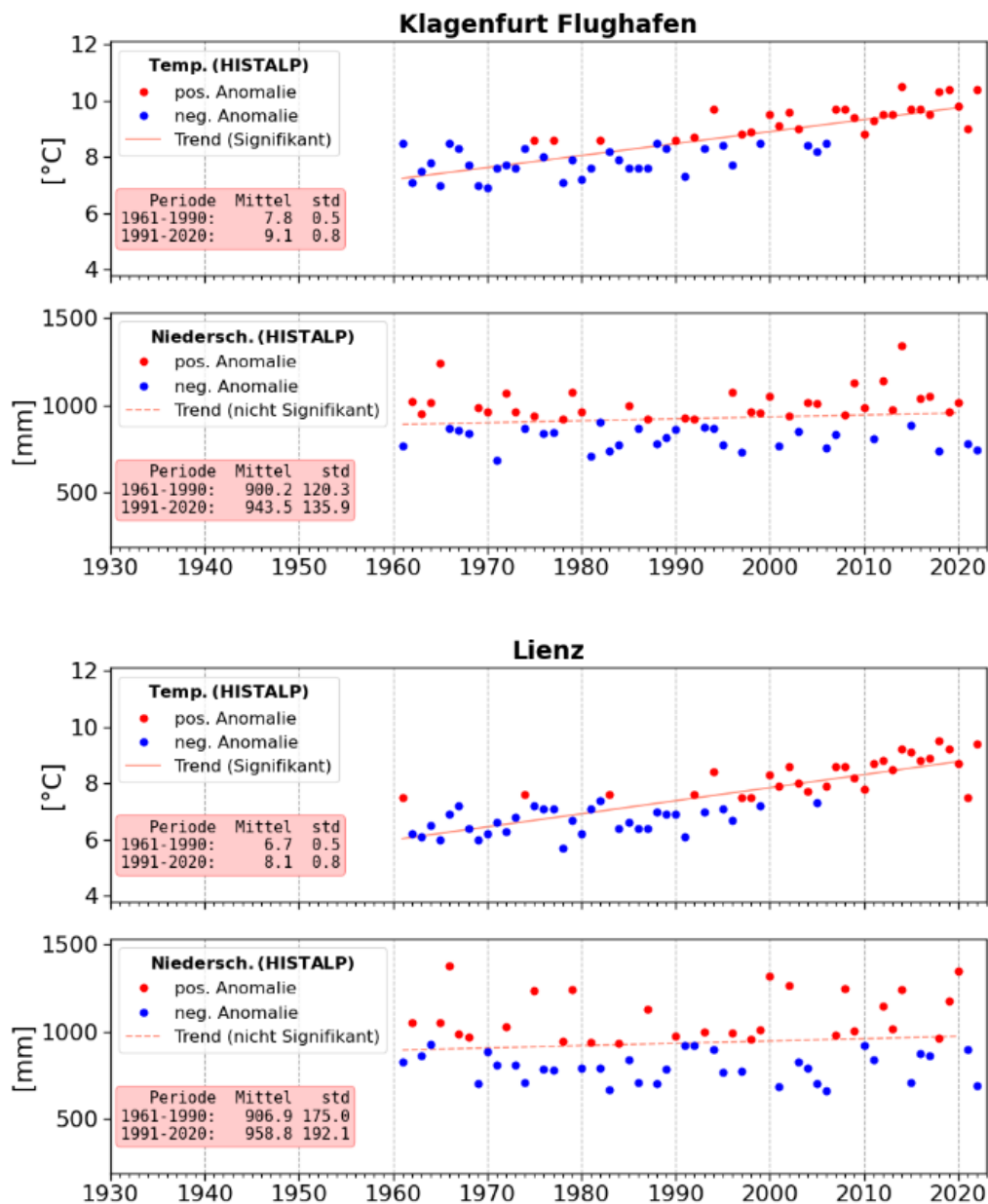


Abbildung 38: Trendanalyse der Temperatur (oben) und Niederschlag (unten) für die HISTALP-Station Klagenfurt-Flughafen und Lienz. Rote Punkte zeigen eine positive, blaue eine negative Anomalie der Jahreswerte zum Mittel der gesamten Zeitreihe. Für die Trendanalyse wird ebenfalls die gesamte Zeitreihe betrachtet (1961 – 2020).

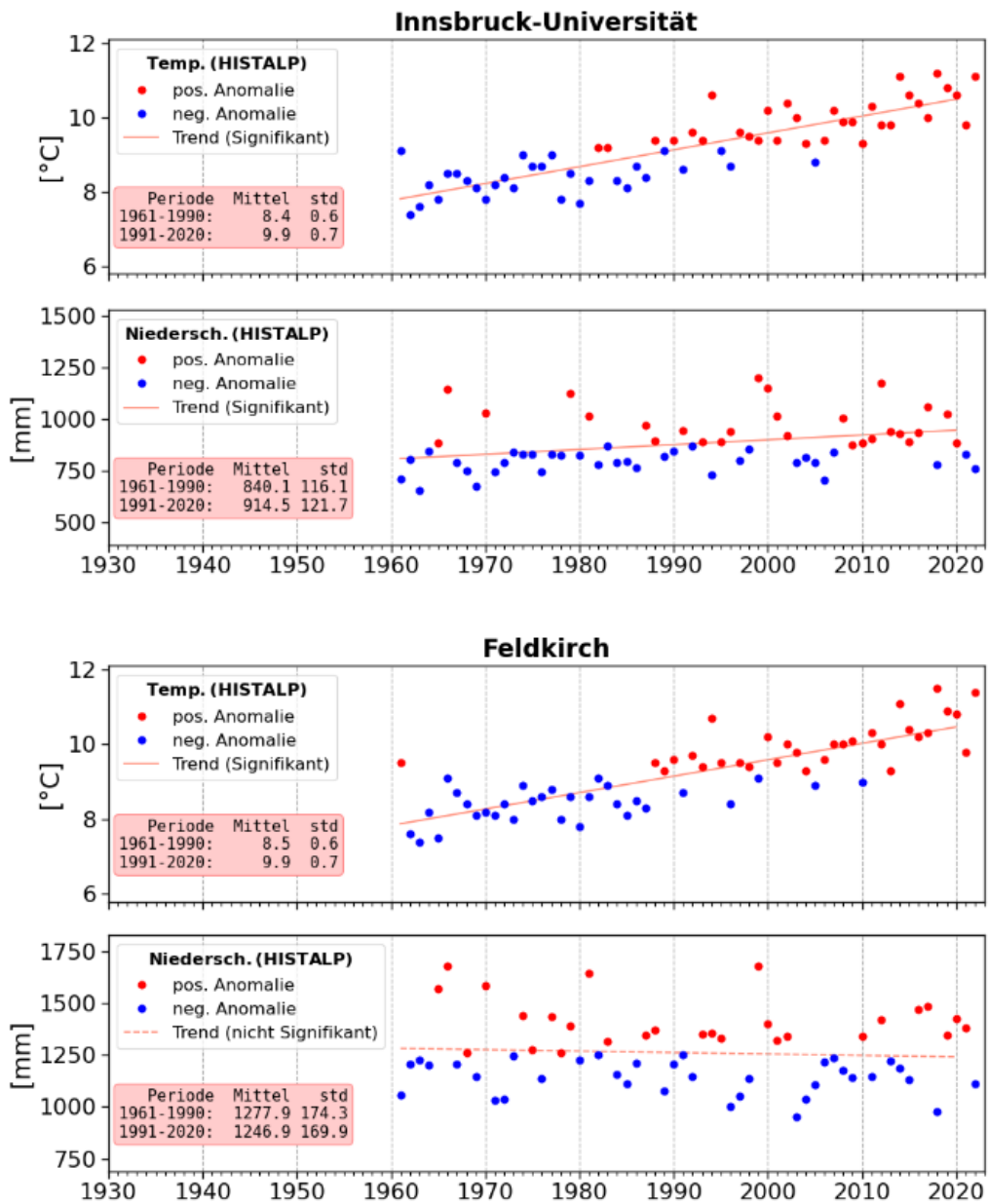


Abbildung 39: Trendanalyse der Temperatur (oben) und Niederschlag (unten) für die HISTALP-Station Innsbruck-Universität und Feldkirch. Rote Punkte zeigen eine positive, blaue eine negative Anomalie der Jahreswerte zum Mittel der gesamten Zeitreihe. Für die Trendanalyse wird ebenfalls die gesamte Zeitreihe betrachtet (1961 – 2020).

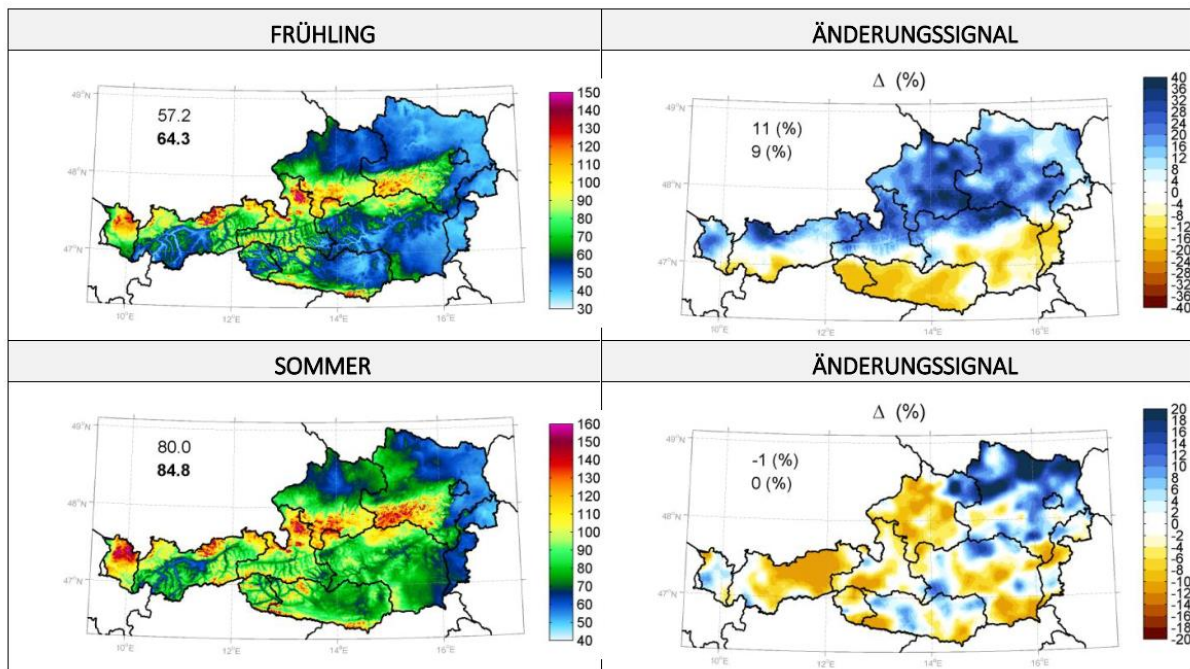


Abbildung 40: Mittlere maximale 5-Tages-Niederschlagssummen 1986-2010 in Frühling (oben links) und Sommer (unten links) sowie Änderungssignale gegenüber der Periode 1961-1985 (rechts). Quelle: Chimani et al. 2016

A 2.1.3 Schnee

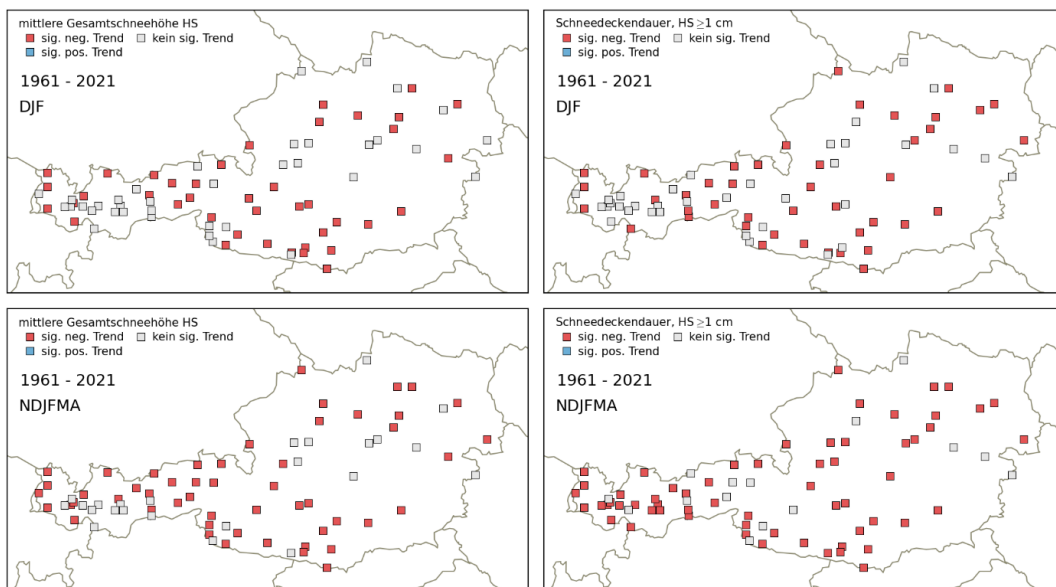


Abbildung 41: Trendanalyse der saisonalen (Dezember bis Februar, oben; November bis April; unten) gemittelten Gesamtschneehöhe (linke Spalte) sowie der Schneedeckendauer (rechte Spalte) bezüglich der Untersuchungsperiode 1961 – 2021 für 86 homogenisierte Langzeitmessreihen in Österreich (Stationshöhe: 121 m bis 2140 m). Signifikant negative Trends in Rot. Stationsmessnetze: GeoSphere Austria und Hydrographisches Zentralbüro (HZB). (<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimafolgen/schnee>)

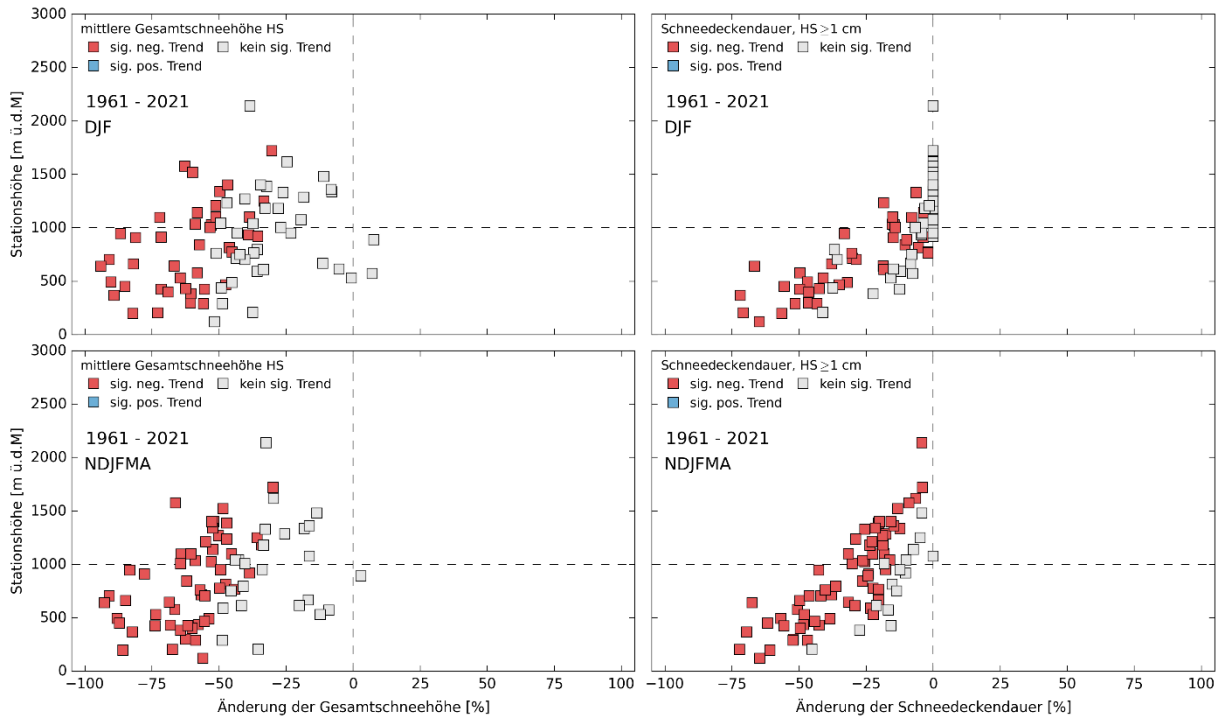


Abbildung 42: Gleich wie Abbildung 41 aber in Abhängigkeit der Höhenlage der Messstationen.

Saisonal gemittelte Gesamtschneehöhe

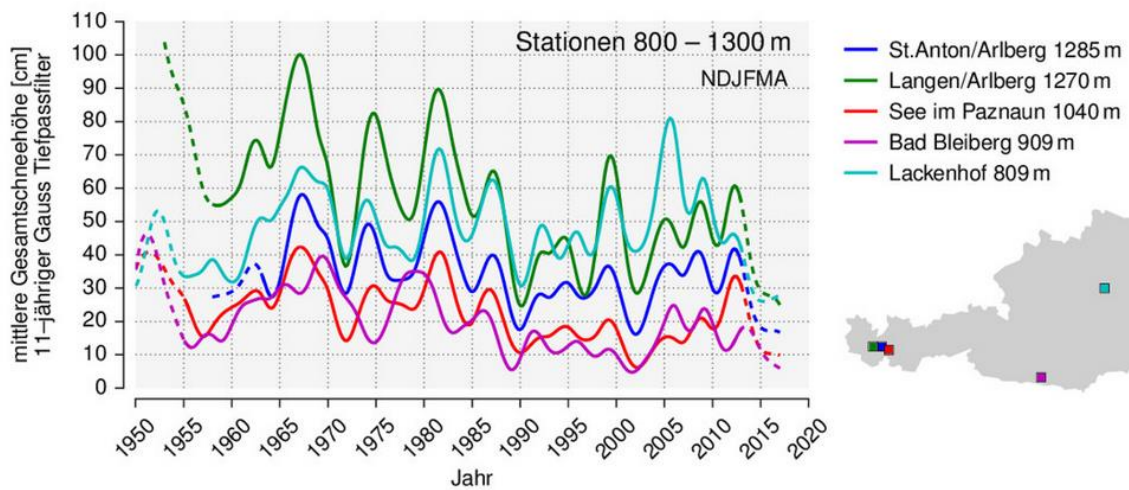


Abbildung 43: Beobachtete Schneehöhe an fünf Stationen zwischen 800 und 1300 m Seehöhe (Quelle: ZAMG, SNOWPAT, <https://www.klimawandelanpassung.at/newsletter/n128/kwa-snowpat>)

A 2.1.4 Gletscher

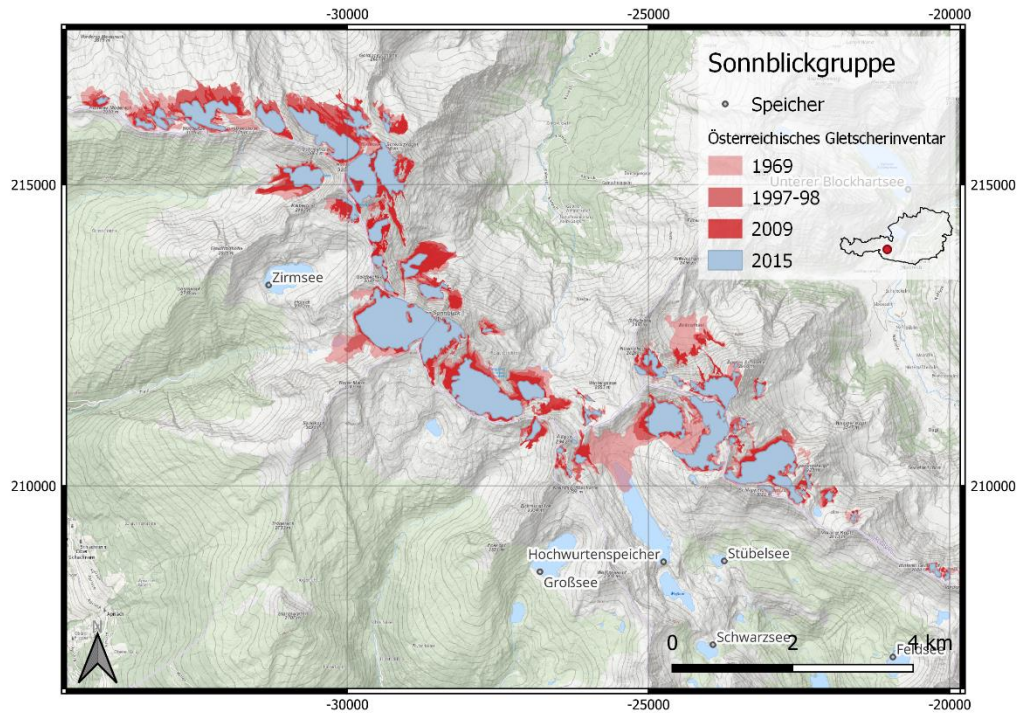


Abbildung 44: Veränderung der Gletscherfläche der Sonnblickgruppe von 1969 bis 2015 (Fischer et al., 2015).

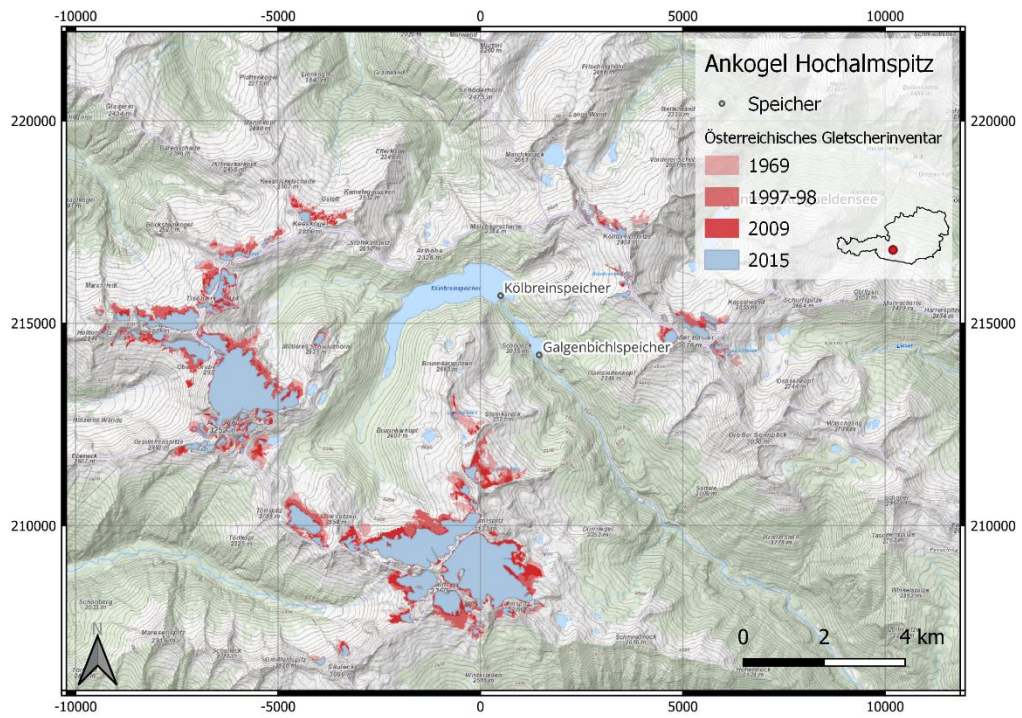


Abbildung 45: Veränderung der Gletscherfläche der Ankogelgruppe von 1969 bis 2015 (Fischer et al., 2015).

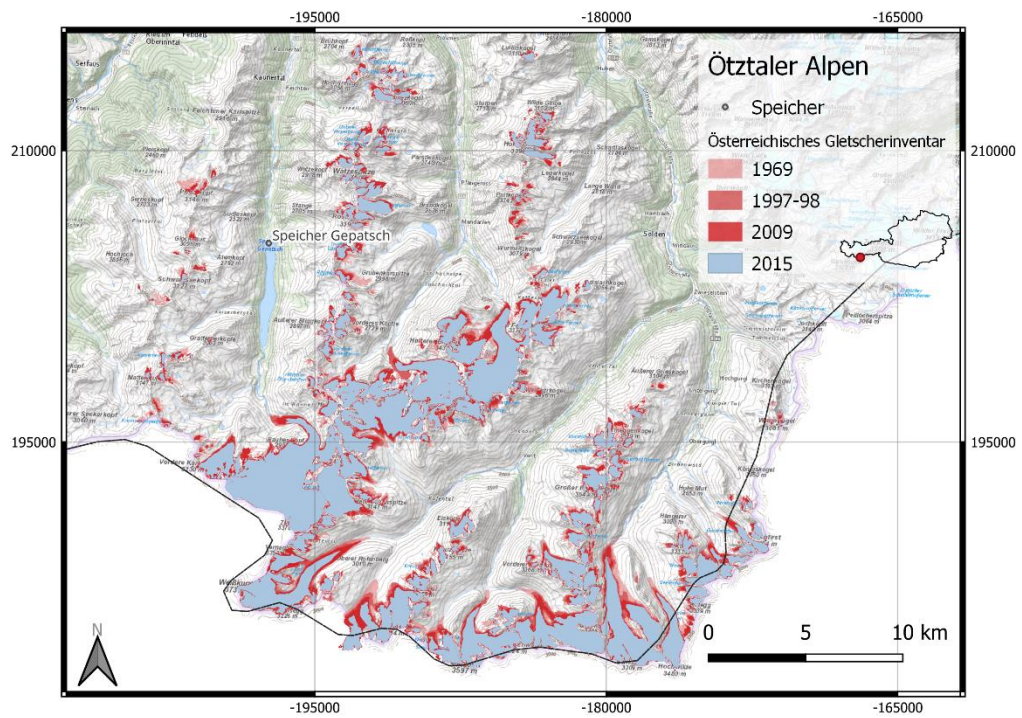


Abbildung 46: Veränderung der Gletscherfläche der Ötztaler Alpen von 1969 bis 2015 (Fischer et al., 2015).

A 2.1.5 Strahlung und Wind

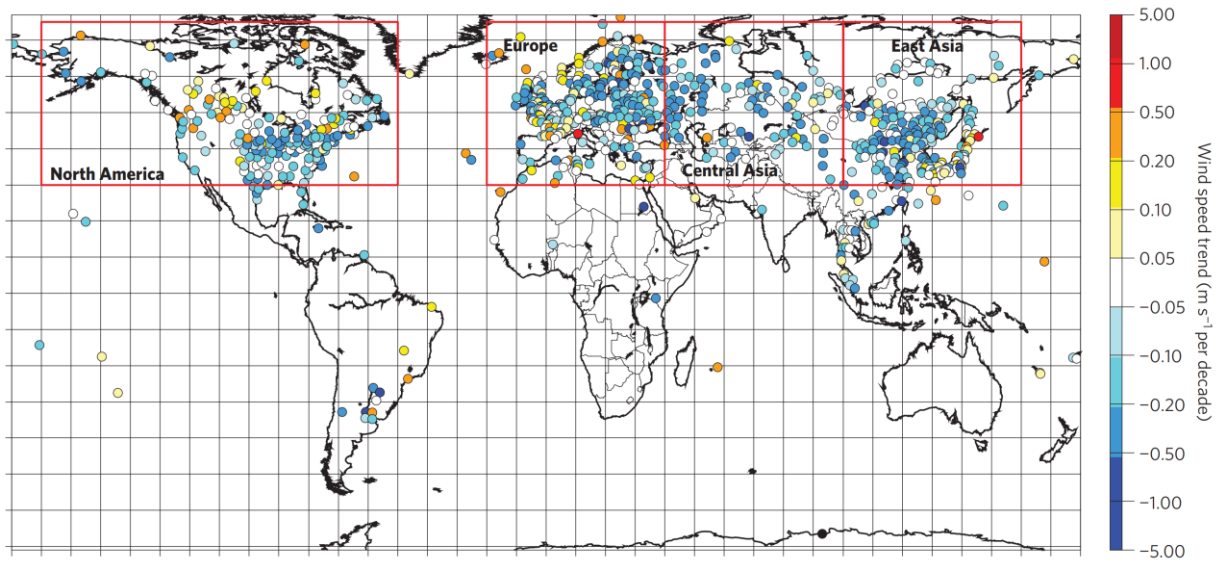


Abbildung 47: Beobachtete Trends der bodennahen Windgeschwindigkeit (in m/s) pro Station für den Zeitraum 1979 – 2008 (Vautard et al., 2010). Es zeigt sich ein deutlicher negativer Trend in der nördlichen Hemisphäre.

A 2.1.6 Abfluss

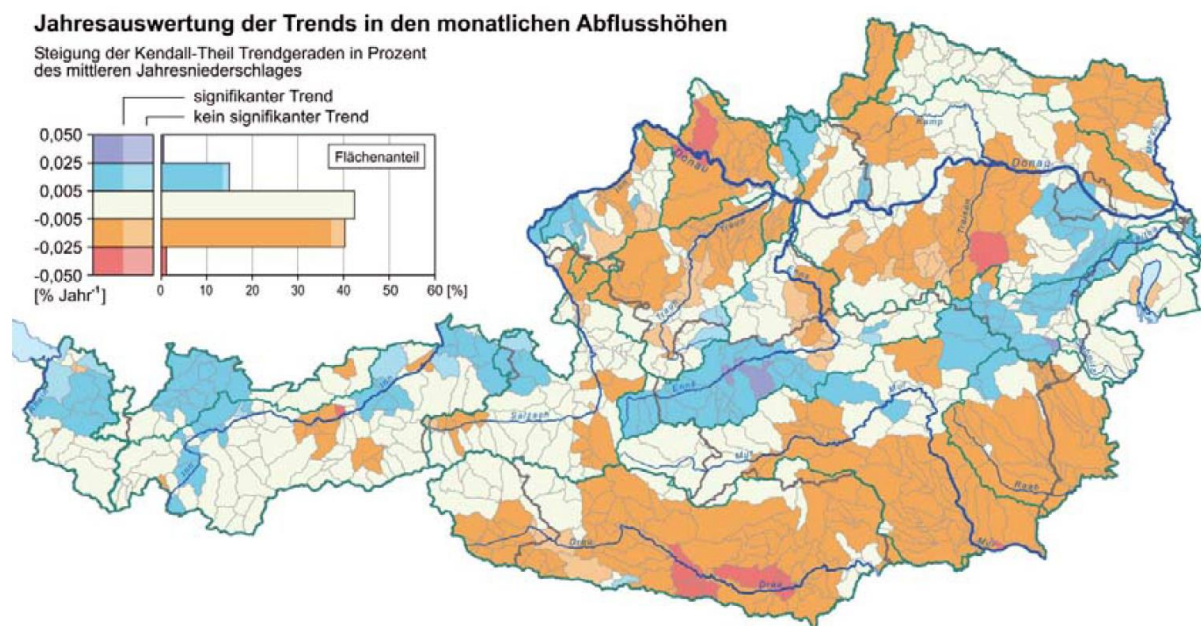


Abbildung 48: Trends im beobachteten Abfluss 1951-2000. Blautöne markieren einen positiven, Rottöne einen negativen Trend. (Quelle: Fürst et al. 2008, in Nachtnebel et al. 2014)

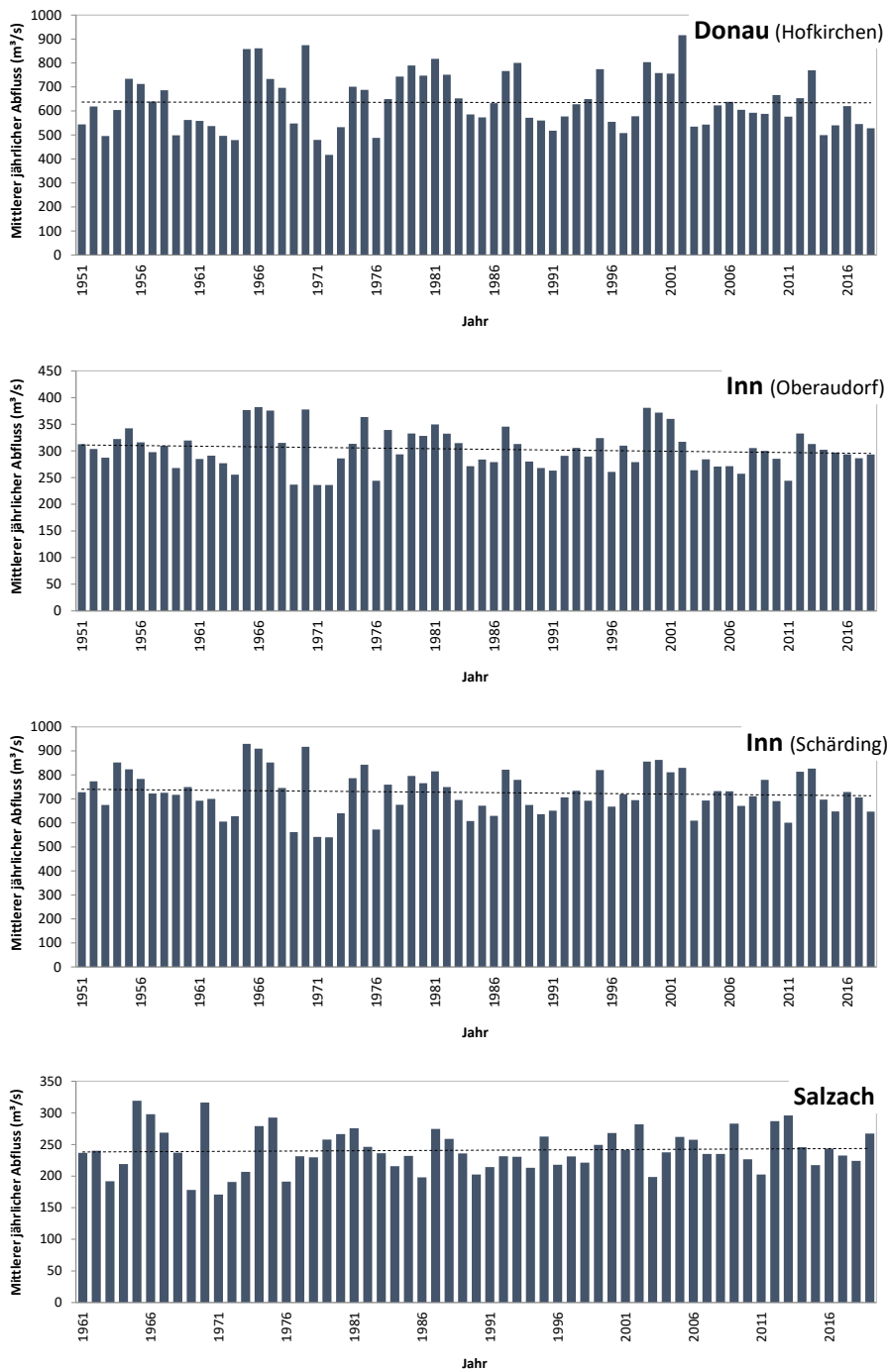


Abbildung 49: Beobachtete mittlere jährliche Abflüsse an ausgewählten Pegel zwischen 1951 und 2019 (Donau/Hofkirchen, Inn/Oberaudorf, Inn/Schärding, Salzach)

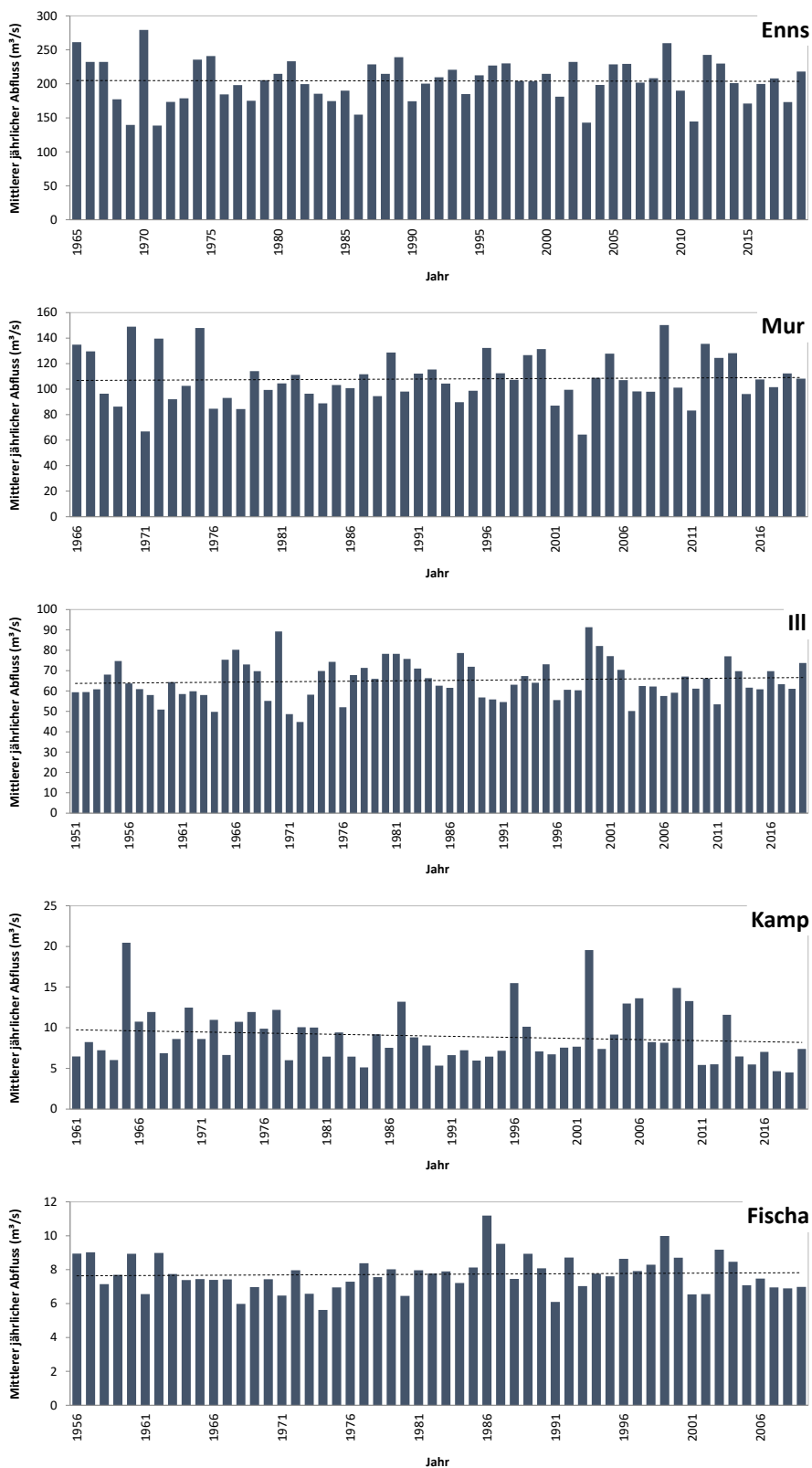


Abbildung 50: Beobachtete mittlere jährliche Abflüsse an ausgewählten Pegeln zwischen 1951 und 2019 (Enns, Mur, Ill, Kamp, Fischa)

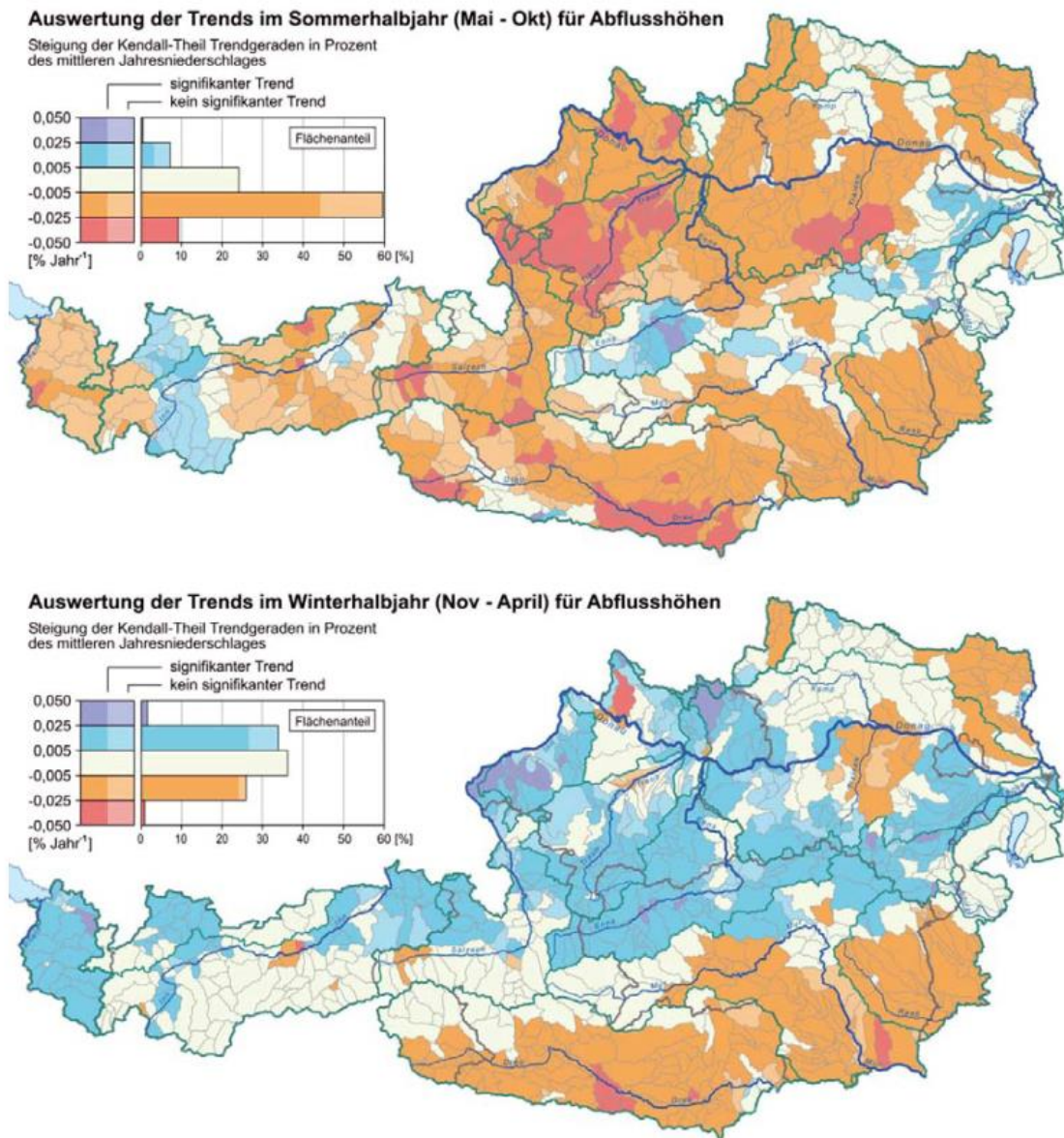


Abbildung 51: Trends im beobachteten Abfluss 1951-2000 für das Sommerhalbjahr (oben) und das Winterhalbjahr (unten). Positiver Trend in Blau/Lila, negativer Trend in Orange/Rot. (Quelle: Fürst et al. 2008, in Nachtnebel et al. 2014)

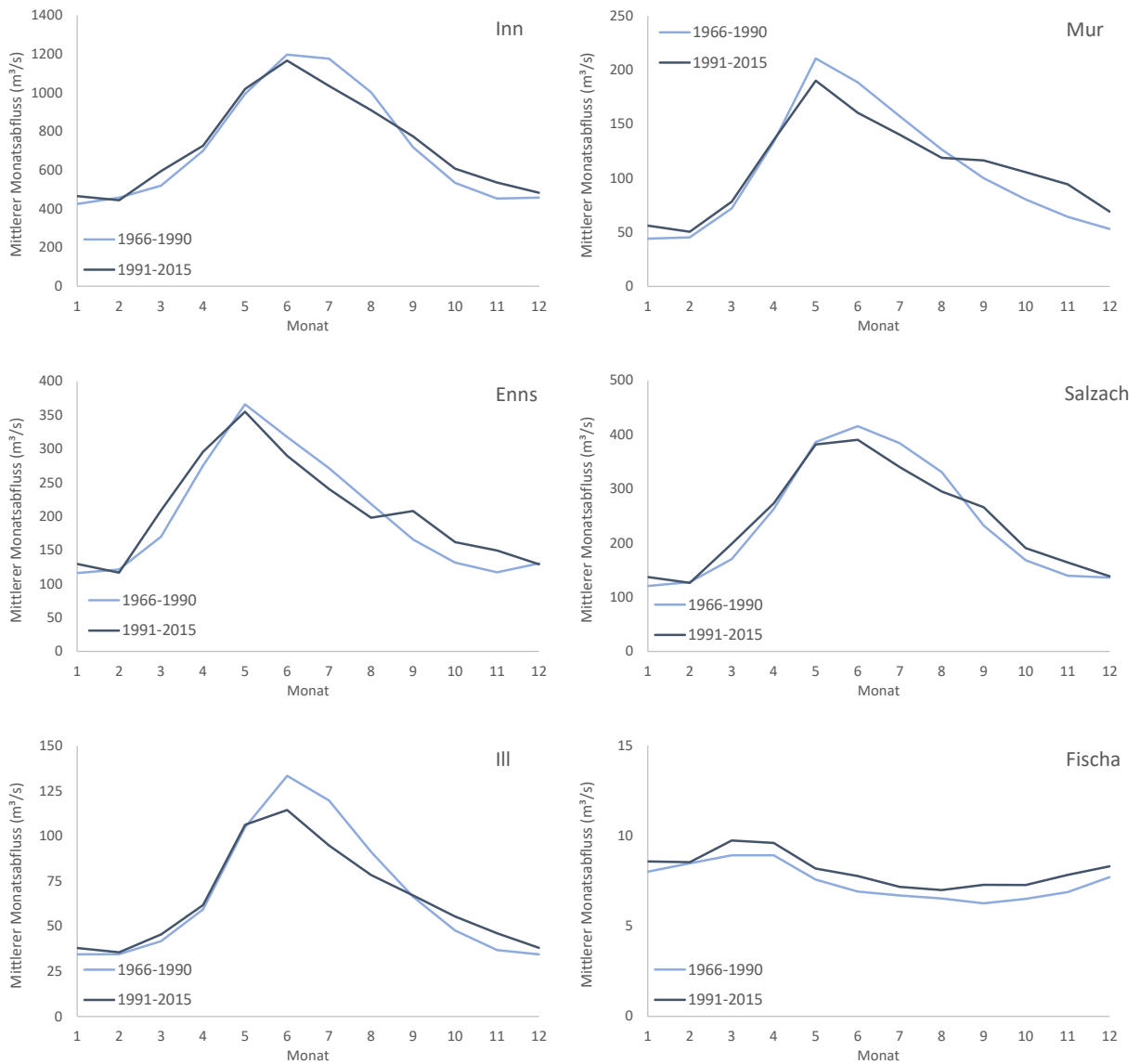


Abbildung 52: Mittlere Monatsbflüsse an Inn (Pegel Schärding), Enns (Steyr-Ortskai) III (Gisingen), Mur (Graz) Salzach (Oberndorf) und Fischa (Fischamend), jeweils für die Perioden 1966-1990 und 1991-2015 (bzw. die längste Periode mit Datenverfügbarkeit innerhalb dieser Zeiträume)

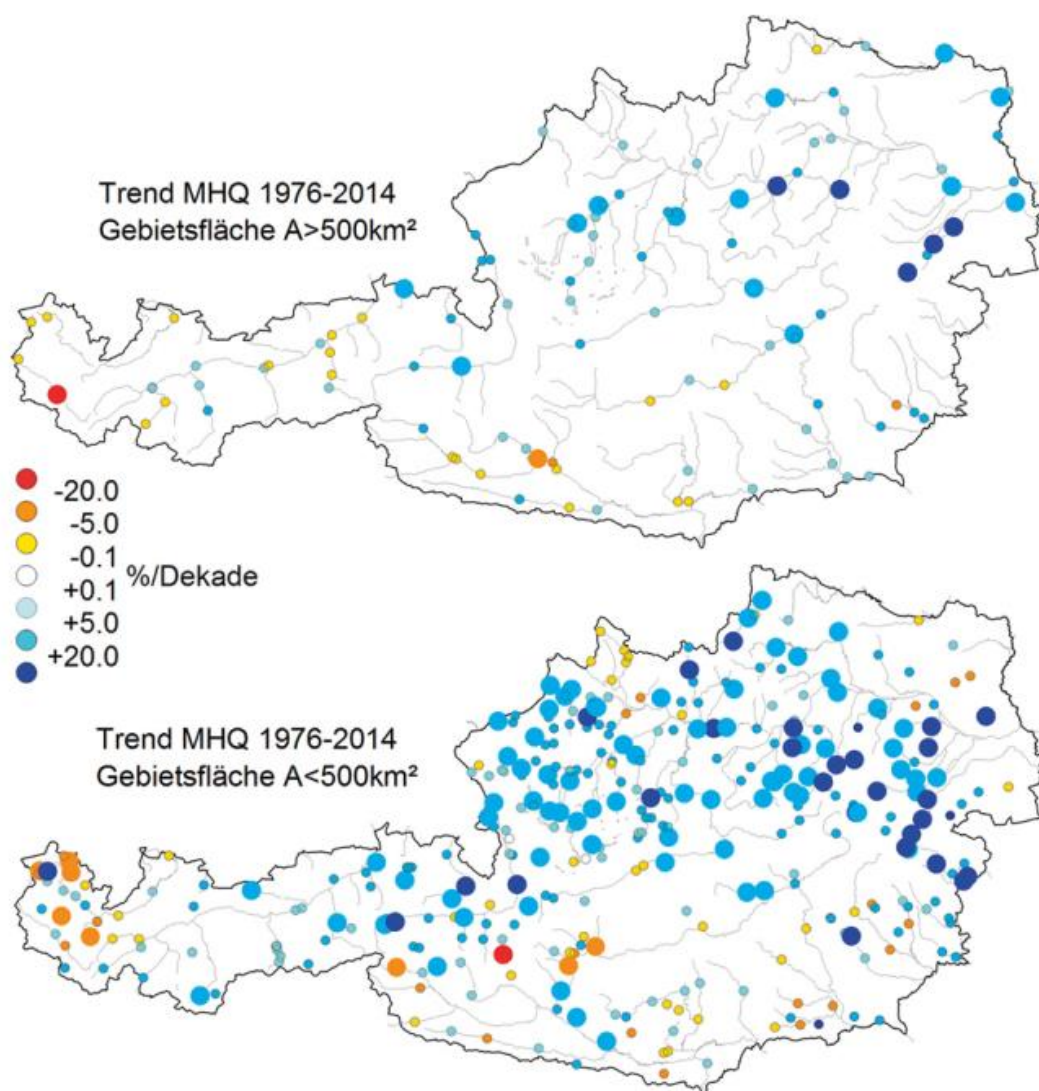


Abbildung 53: Trends der Jahresmaxima des Abflusses im Zeitraum 1976–2014: große Kreise blau: signifikant steigende Trends, d. h. Zunahme des mittleren jährlichen Hochwassers MHQ. Große Kreise rot: signifikant fallende Trends. Kleine Kreise: Trends nicht signifikant (Signifikanzniveau 5 %). Oben: Gebiete >500 km², unten: Gebiete <500 km² Fläche. (Quelle: Blöschl et al. 2018)

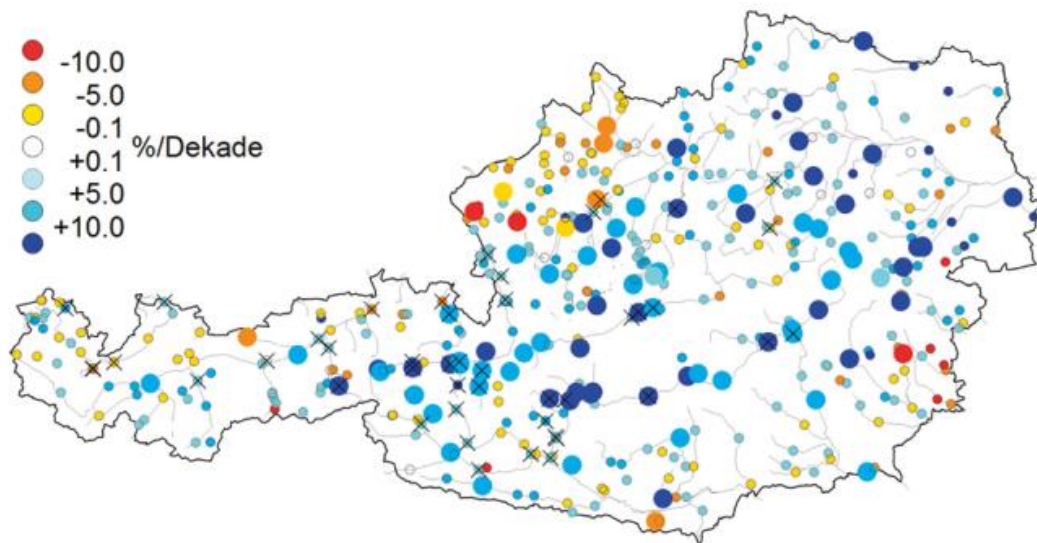


Abbildung 54: Trends der Jahresniederwasserdurchflüsse Q95 im Zeitraum 1976–2014: große Kreise blau: signifikant steigende Trends, d. h. Zunahme des Q95. Große Kreise rot: signifikant fallende Trends. Kleine Kreise: Trends nicht signifikant (Signifikanzniveau 5 %). Kreuze zeigen Pegel, die durch Überleitungen oder Speicher beeinflusst sind. (Quelle: Blöschl et al. 2018)

A 2.2 Auswirkungen auf die Wasserkraft

Korrelation der Pegel:

Um das Wasserdargebot in den Einzugsgebieten der verschiedenen Kraftwerksgruppen in der Vergangenheit abschätzen zu können, mussten Ersatzpegel mit langen Zeitreihen verwendet werden.

Regional unterschiedliches Wasserdargebot zwischen den Kraftwerksgruppen.

- Malta: akkumulierter Zufluss (Verbund) und Pegel Malnitz @ Malnitzbach (eHyd)
 - o Korrelation (1979-2019): 0,946

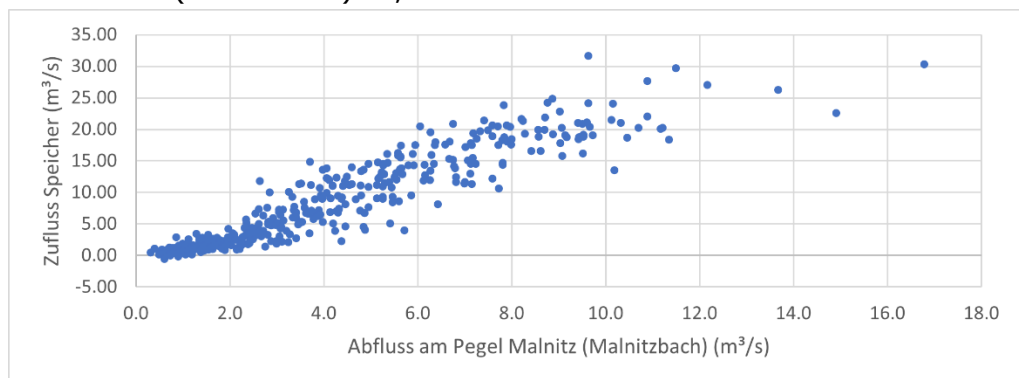


Abbildung 55: Beziehung zwischen rückgerechnetem Zufluss der Malta-Kraftwerksgruppe und dem ausgewähltem Ersatzpegel.

- Kaprun: akkumulierter Zufluss (Verbund) und Pegel Fuscher Ache @ Bruck (eHyd)
 - o Korrelation (1986 – 2019): 0,886

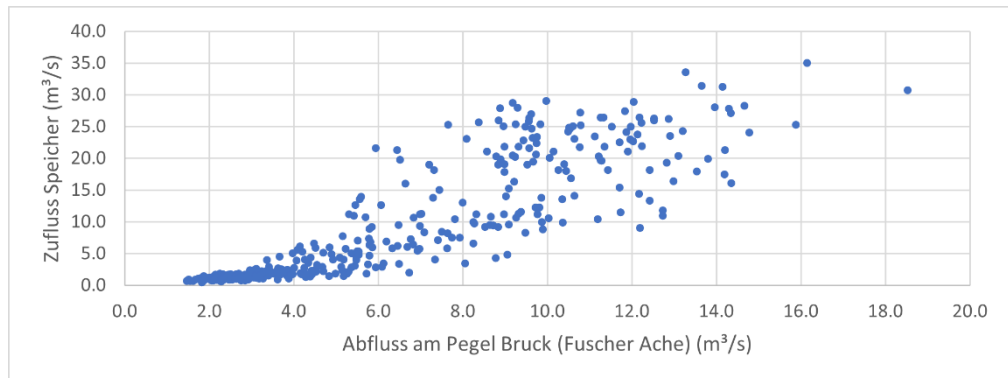


Abbildung 56: Beziehung zwischen Zufluss der Kaprun-Kraftwerksgruppe und dem ausgewähltem Ersatzpegel.

- Zell-Ziller: akk. Zufluss (Verbund) und Ziller @ Zell am Ziller
 - o Korrelation (1986 – 2019): 0,888

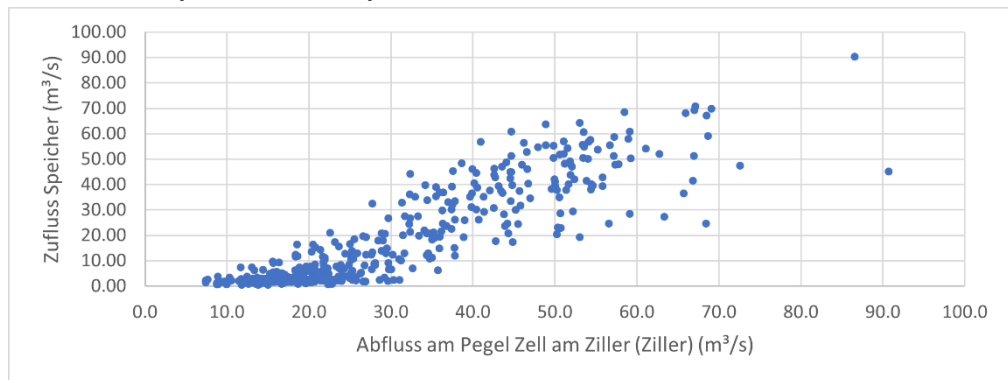


Abbildung 57: Beziehung zwischen Zufluss der Zemm-Ziller-Kraftwerksgruppe und dem ausgewähltem Ersatzpegel.

A3 Klimaprojektionen

A 3.1 Wasserdargebot

A 3.1.1 Temperatur

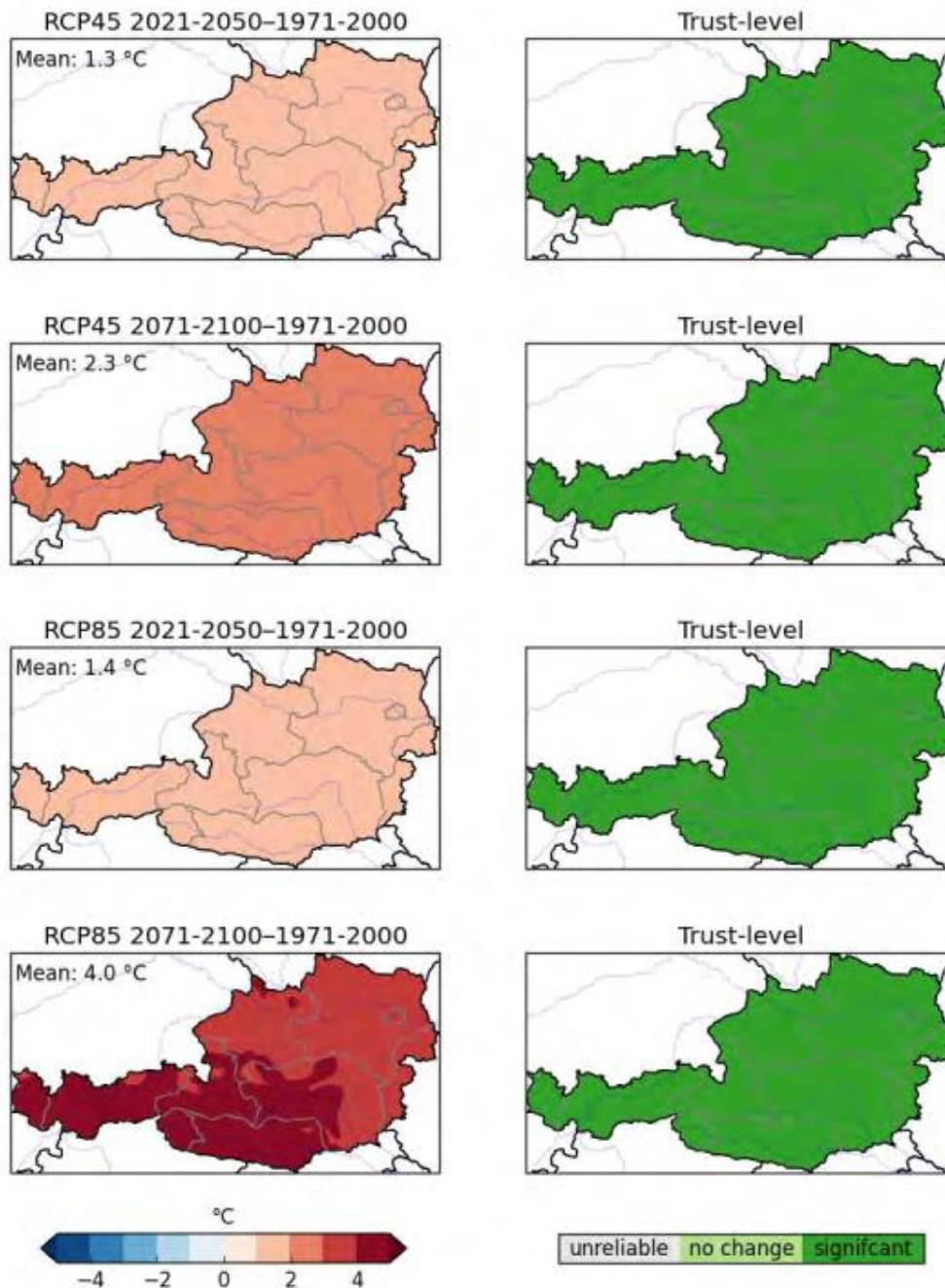


Abbildung 58: ÖKS15 Klimaprojektionen für Temperatur für Österreich; links: Ensemble-Mittelwert, rechts: Bewertung des Vertrauensgehalts (Quelle: ÖKS 2022)

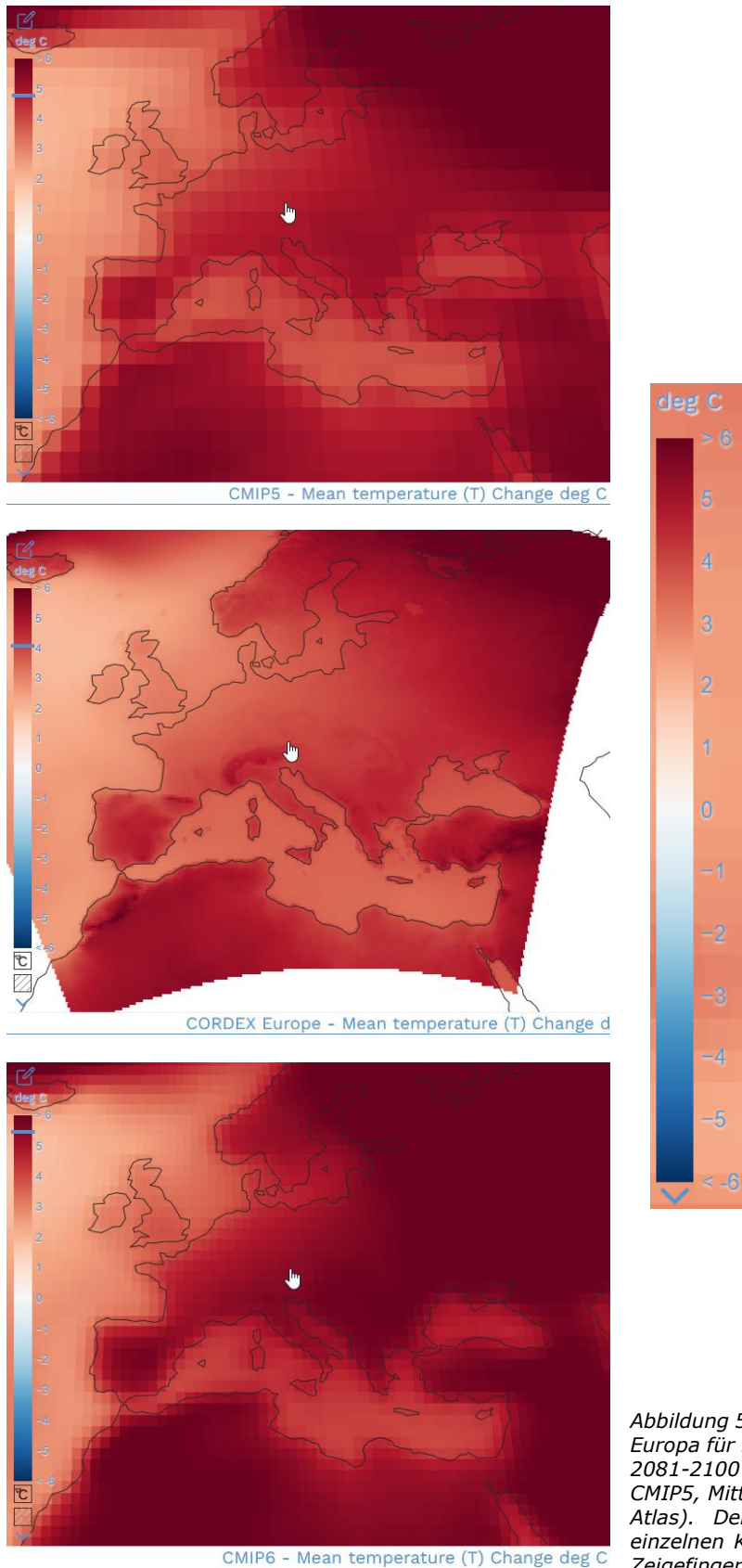


Abbildung 59: Klimaprojektionen für Temperatur für Europa für RCP8.5 (bzw. SSP5-8.5) und die Periode 2081-2100 (im Vergleich zu 1981-2010); oben CMIP5, Mitte: CORDEX; unten CMIP6 (Quelle: IPCC Atlas). Der Querbalken auf der Skala in den einzelnen Karten zeigt den Wert an der Stelle des Zeigefingers.

A 3.1.2 Niederschlag

rr: relative climate change signal (annual)

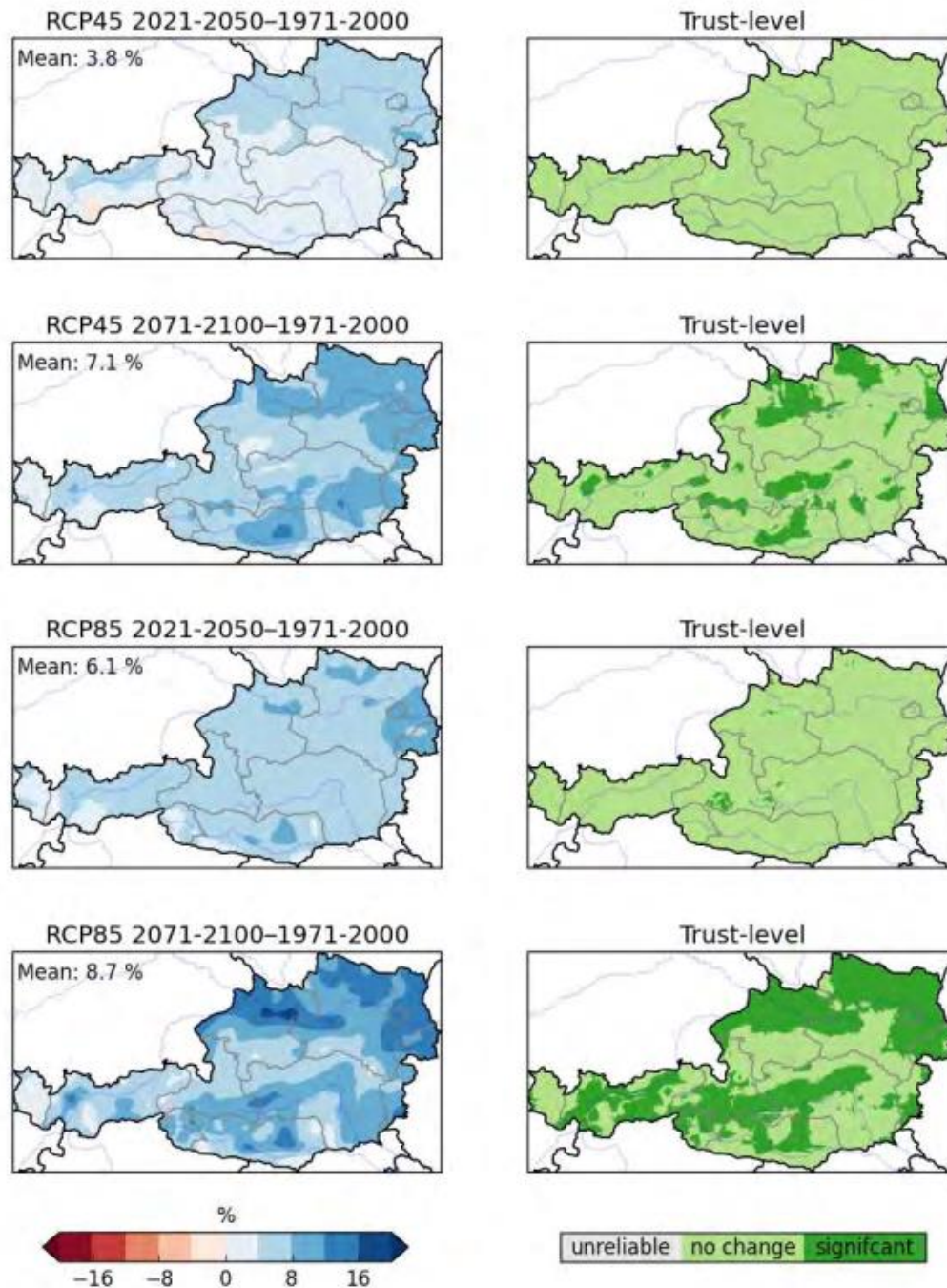


Abbildung 60: ÖKS15 Klimaprojektionen für die mittlere Niederschlagsmenge für Österreich; links: Ensemble-Mittelwert, rechts: Bewertung des Vertrauensgehalts (Quelle: ÖKS 2022)

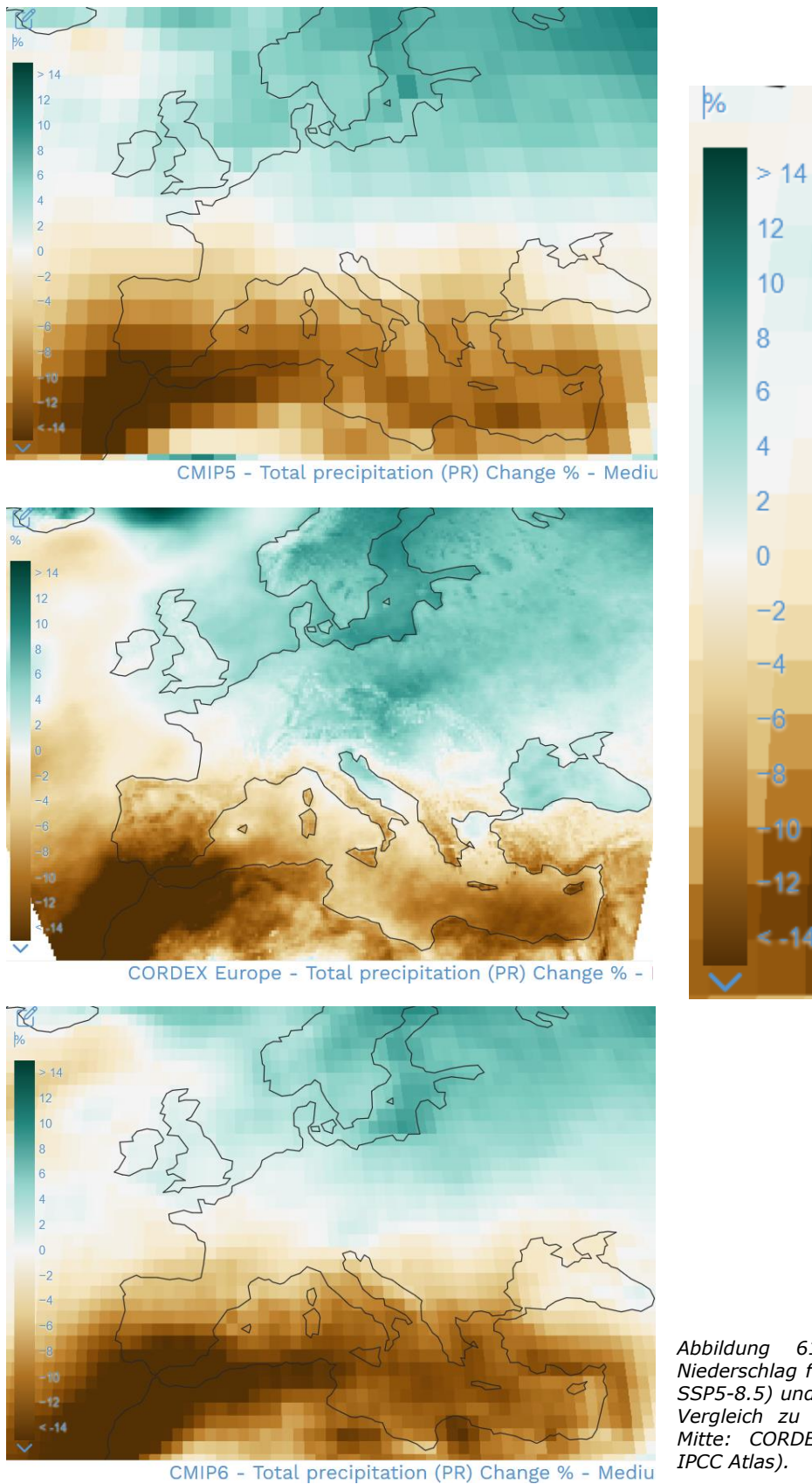


Abbildung 61: Klimaprojektionen für Niederschlag für Europa für RCP8.5 (bzw. SSP5-8.5) und die Periode 2041-2060 (im Vergleich zu 1995-2014); oben CMIP5, Mitte: CORDEX; unten CMIP6 (Quelle: IPCC Atlas).

rx1day: relative climate change signal (annual)

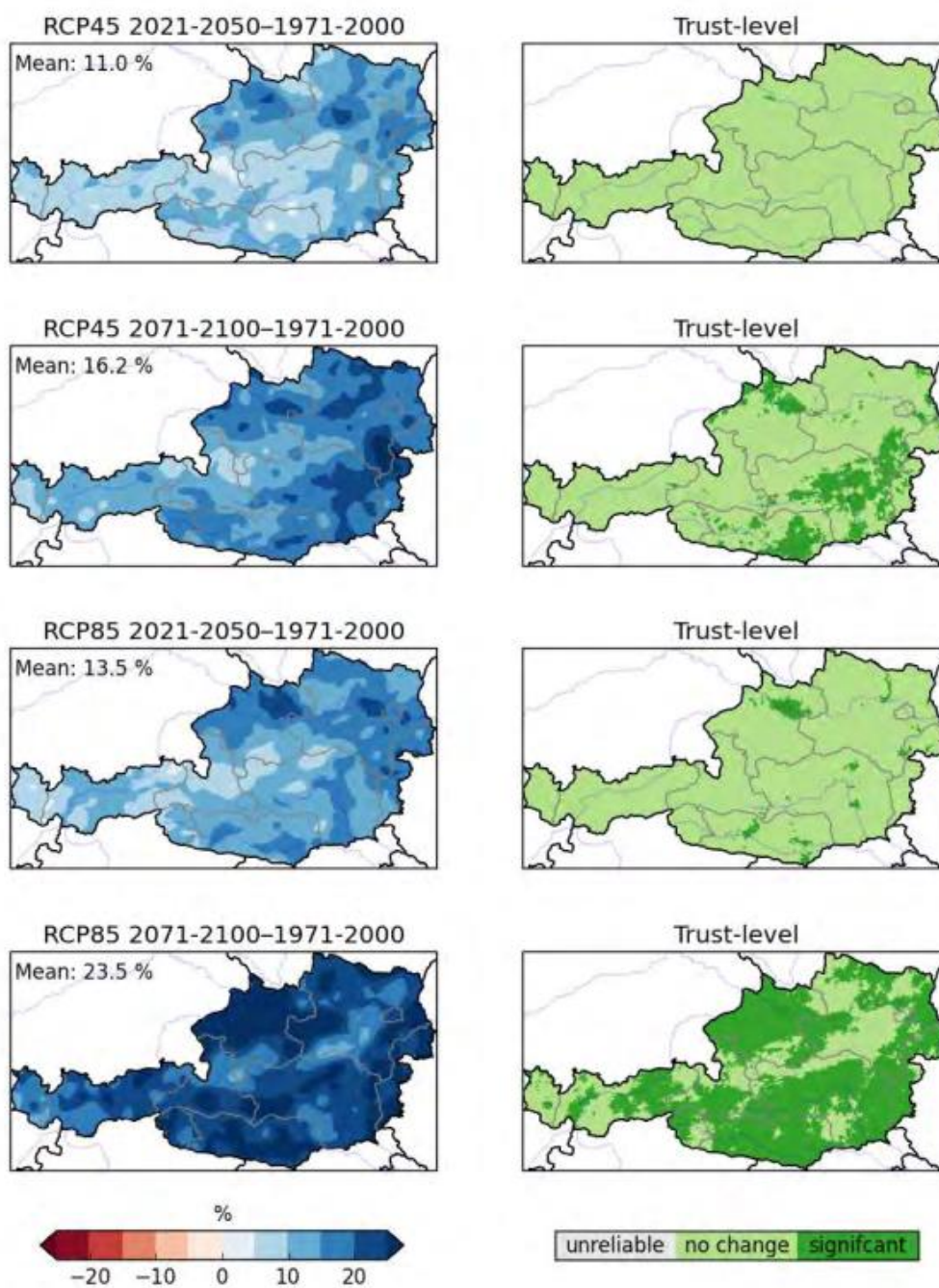


Abbildung 62: ÖKS15 Klimaprojektionen für maximale tägliche Niederschlagssumme für Österreich; links: Ensemble-Mittelwert, rechts: Bewertung des Vertrauensgehalts (Quelle: ÖKS 2022)

cdd-sum-days: relative climate change signal (jja)

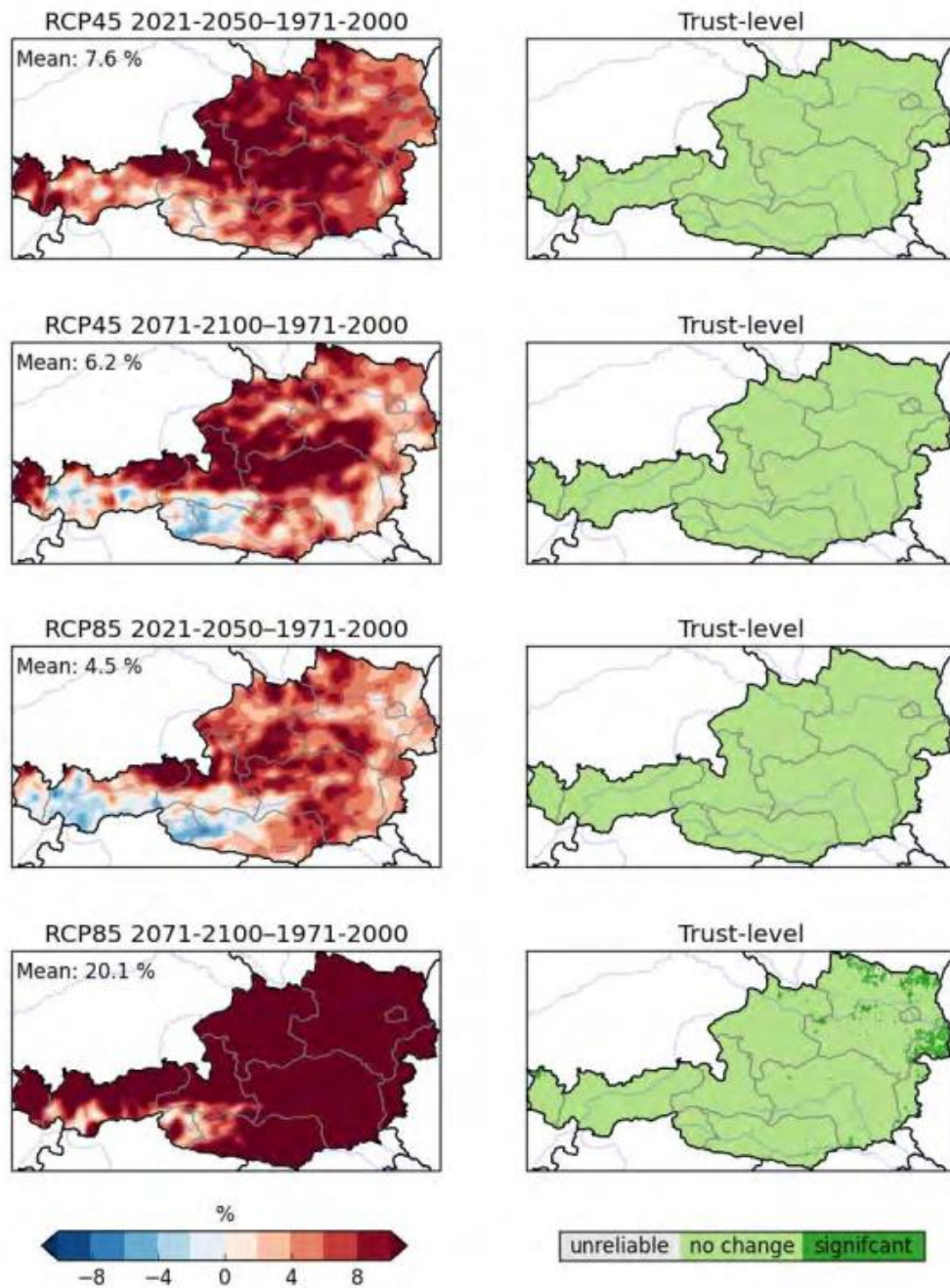


Abbildung 63: ÖKS15 Klimaprojektionen für die Dauer von Trockenperioden für Österreich im Sommer (jja); links: Ensemble-Mittelwert, rechts: Bewertung des Vertrauensgehalts (Quelle: ÖKS 2022)

A 3.1.4 Gletscher

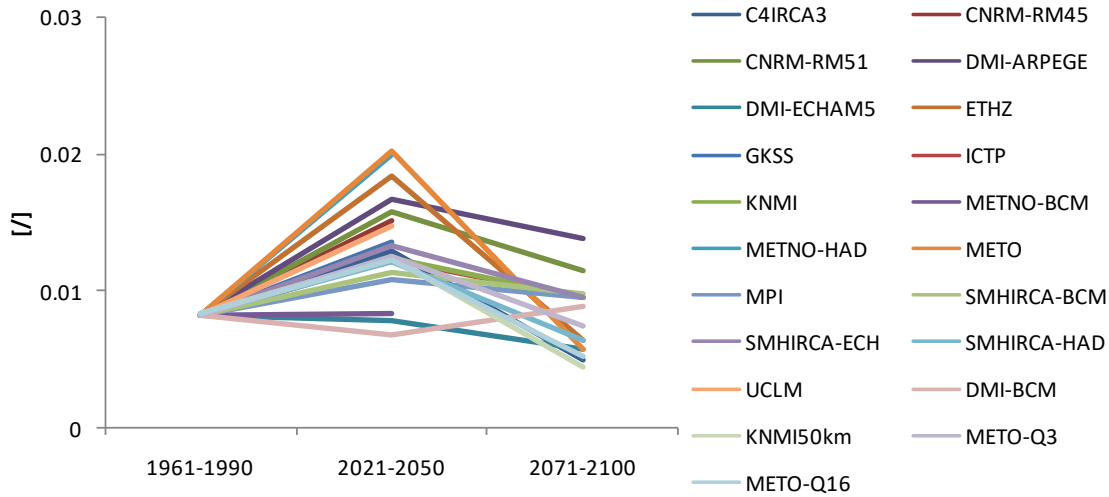


Abbildung 64: Beitrag der Gletscherschmelze (negative Massenbilanz) zum Abfluss der Donau bei Wien im Juli, Projektionen mit 21 RCMs (ENSEMBLES unter A1B) (Quelle: Kling et al. 2011)

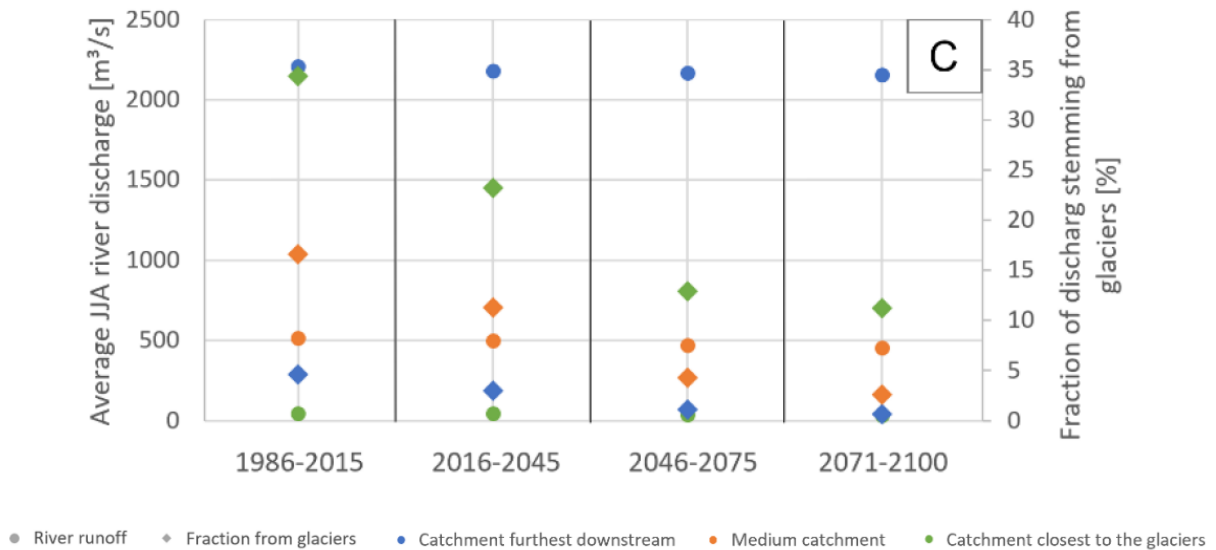


Abbildung 65: Mittlerer Sommer-Abfluss und Anteil der Eisschmelze am Abfluss für drei beispielhafte Einzugsgebiete im Donau-Einzugsgebiet (Oberlauf: Susch, Mittellauf: Oberaudorf; Unterlauf: Greifenstein), Projektionen mit 14 CMIP5 GCMs unter RCP2.6 (Quelle: Wallner 2022, Daten von Huss und Hock 2015)

A 3.1.5 Strahlung und Wind

rsds: relative climate change signal (annual)

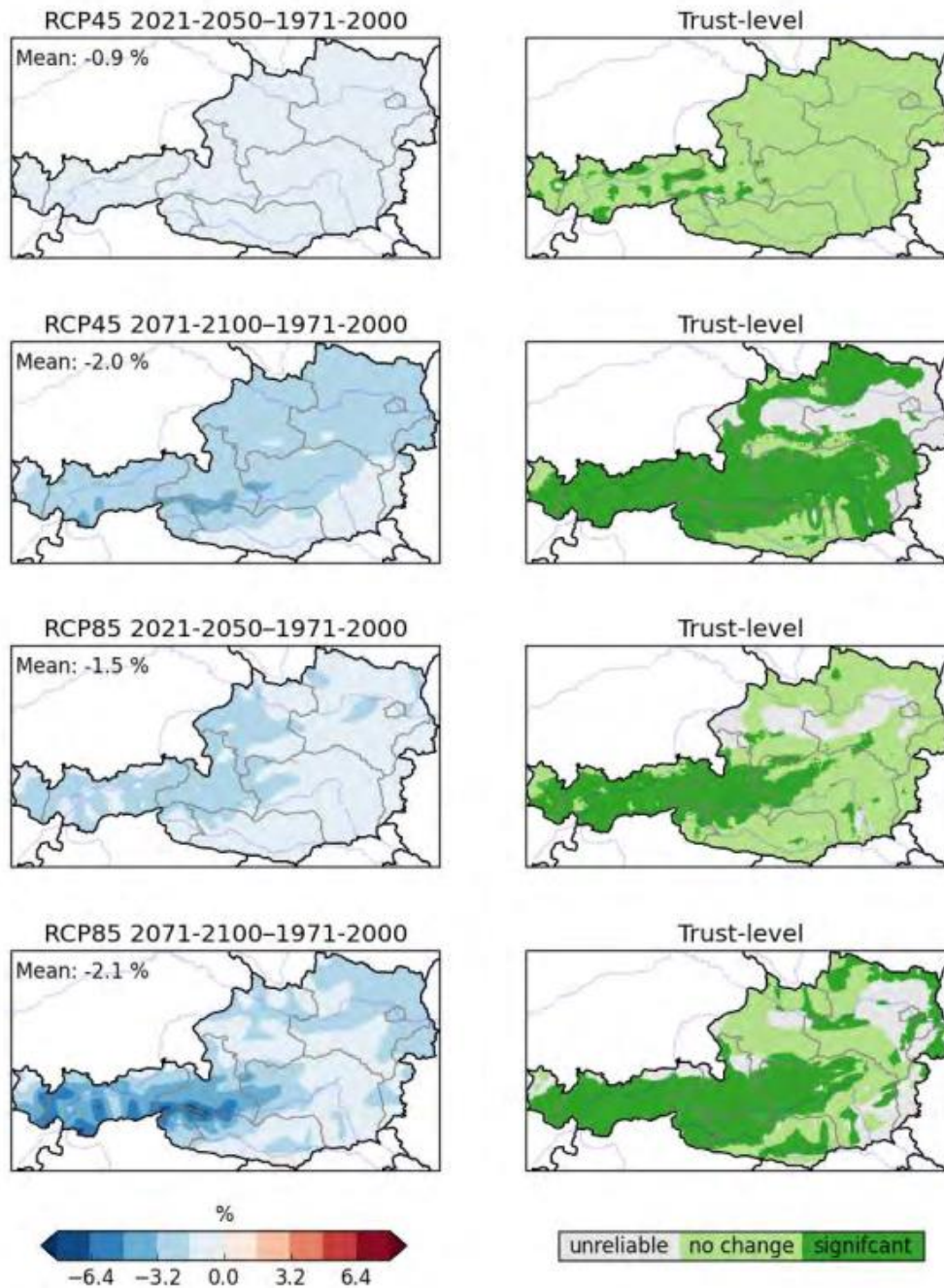


Abbildung 66: ÖKS15 Klimaprojektionen für Globalstrahlungssumme für Österreich; links: Ensemble-Mittelwert, rechts: Bewertung des Vertrauensgehalts (Quelle: ÖKS 2022)

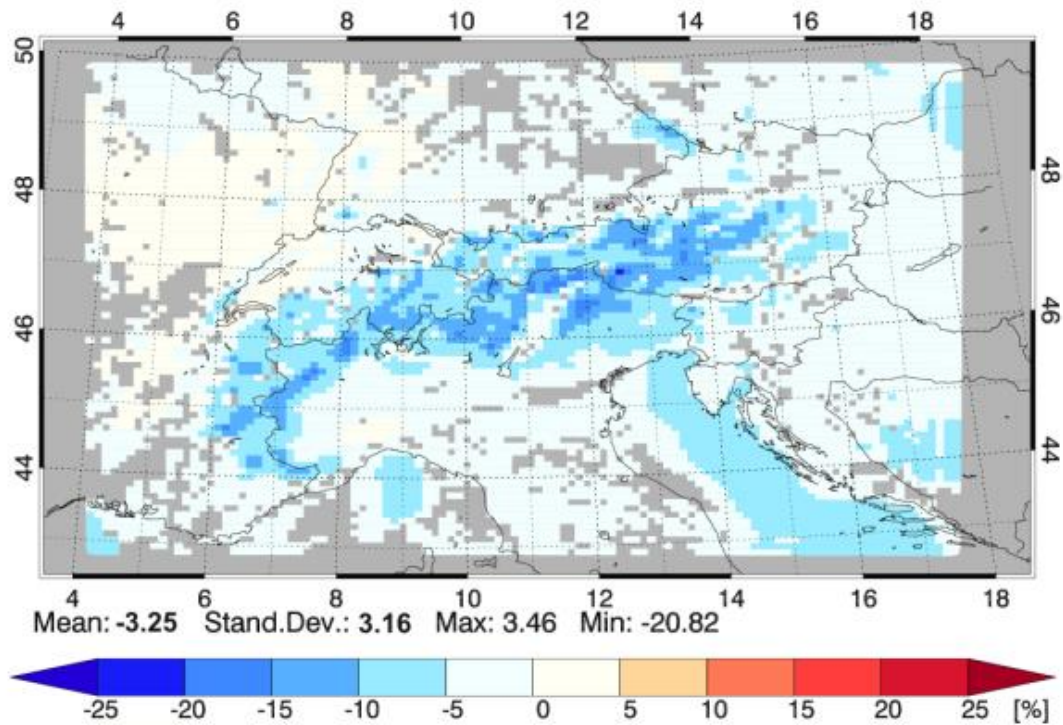


Abbildung 67: Klimaprojektionen für mittlere Jahreswindgeschwindigkeit für Österreich, ein RCM für Szenario A1B und die Periode 2041-2050 (im Vergleich zu 1981-1990) (Quelle: Krenn et al. 2011)

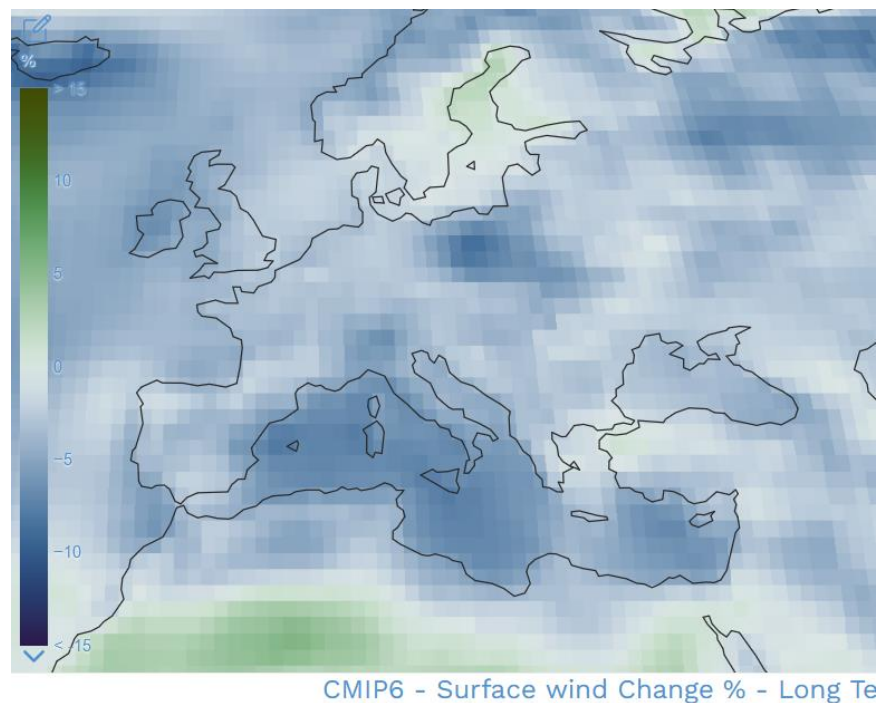


Abbildung 68: Klimaprojektionen für mittleren Wind für Europa, Ensemble-Mittelwert von CMIP6-GCMs für SSP5-8.5 und die Periode 2081-2100 (im Vergleich zu 1981-2010) (Quelle: IPCC Atlas)

A 3.1.6 Abfluss

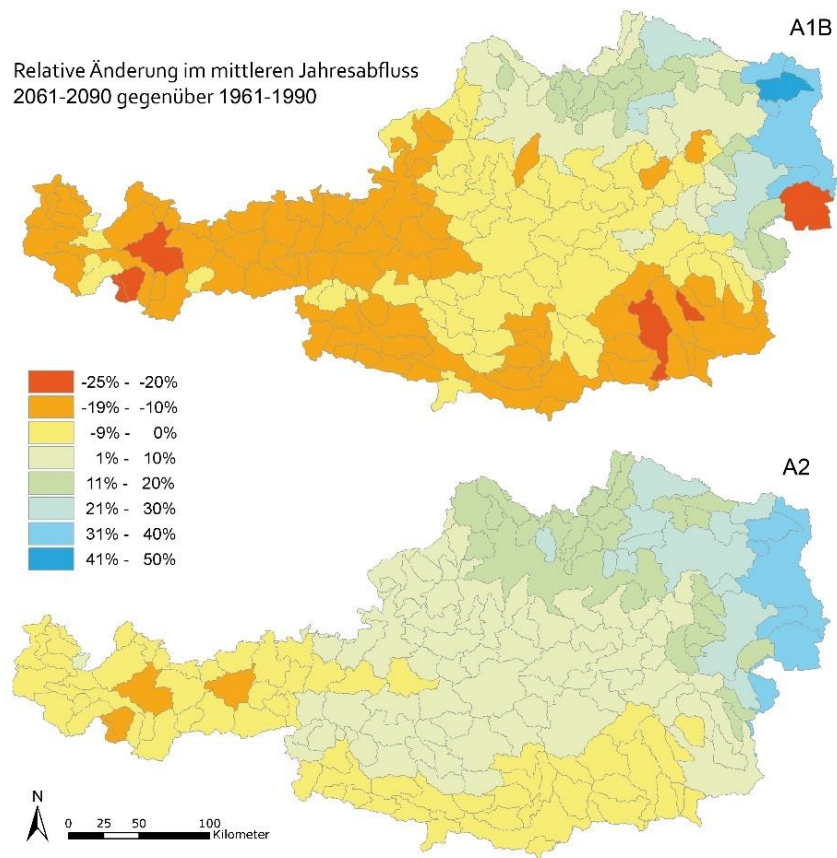


Abbildung 69: Änderung des mittleren Jahresabflusses für 2061-2090, Projektionen mit Daten des Klimamodells REMO-UBA in den SRES-Szenarien A2 (unten) und A1B (oben), gegenüber 1961-1990 (Quelle: Stanzel und Nachtnebel 2010)

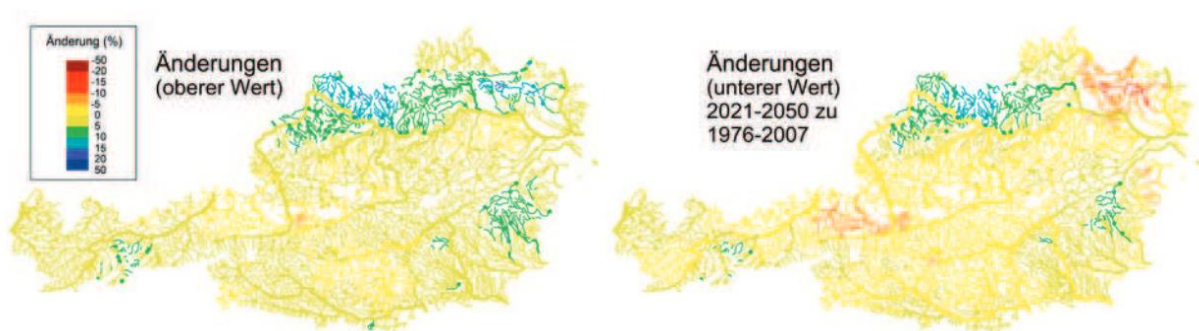


Abbildung 70: Änderung des mittleren Jahresabflusses für 2021-2050, Projektionen mit Daten des Klimamodells CLM-ECHAM5 im SRES-Szenario A1B, gegenüber 1976-2007, mit verschiedenen Parametrisierungen des hydrologischen Modells (links/rechts); gelb: keine Änderung, orange-rot: Abnahme, grün-blau: Zunahme (Quelle: Blaschke et al. 2007)

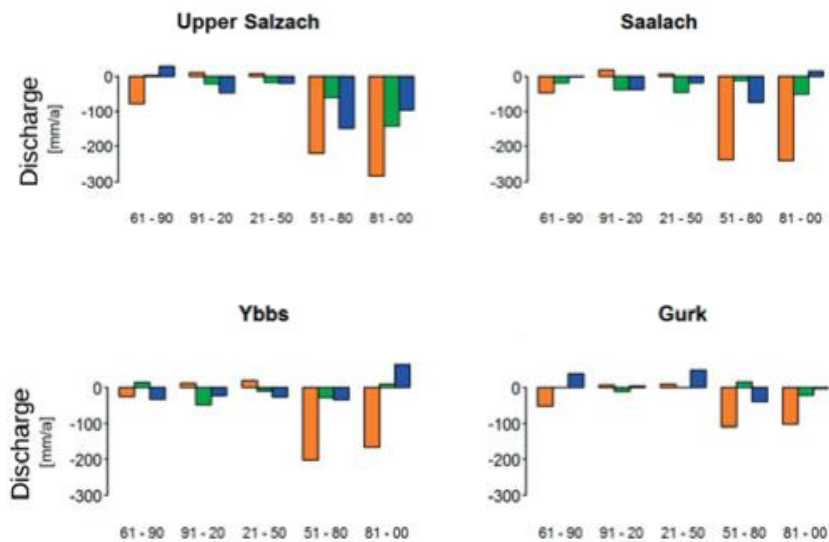


Abbildung 71: Änderung des mittleren Jahresabflusses (mm) für drei Perioden, im Vergleich zu 1961-1990, Projektionen mit Daten von drei Klimamodellen im SRES-Szenario A1B (Quelle: Goler et al. 2016)

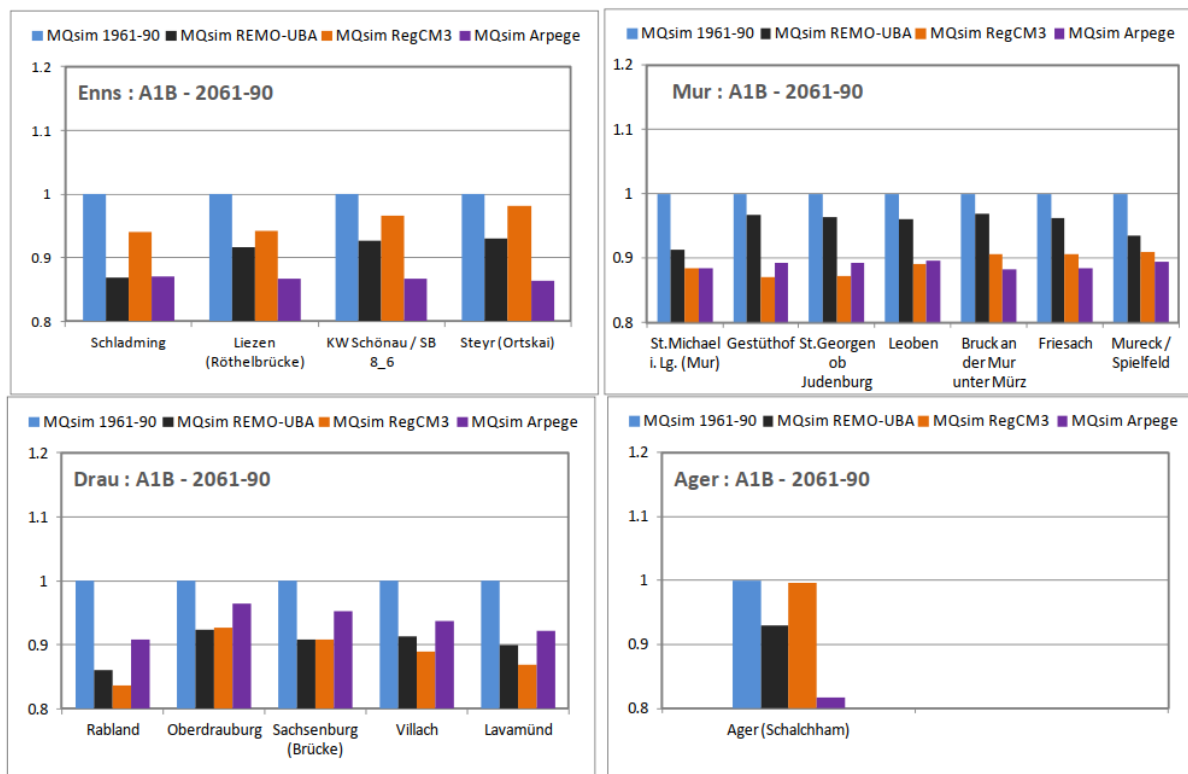


Abbildung 72: Änderung des mittleren Jahresabflusses (Verhältnis) für verschiedene Pegel in vier Flussgebieten für die Periode 2061-2090, im Vergleich zu 1961-1990 (Referenzwert 1), Projektionen mit Daten von vier Klimamodellen im SRES-Szenario A1B (Quelle: Nachtnebel et al. 2012)

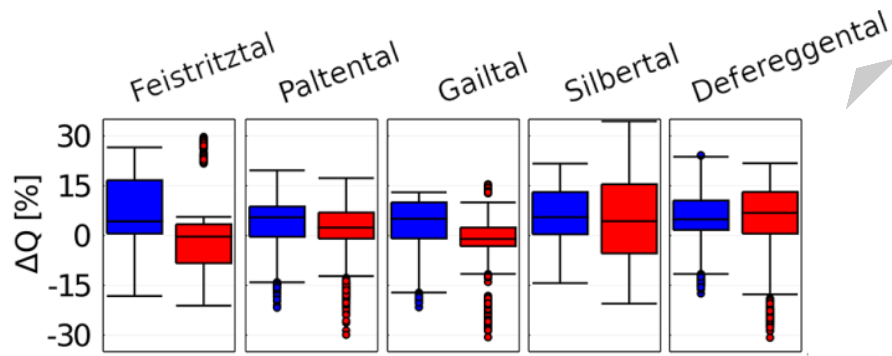


Abbildung 73: Änderung des mittleren Jahresabflusses für 2071-2100, Projektionen mit Daten des CORDEX-Ensembles mit den Emissionsszenarien RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot), gegenüber 1981-2010 (Quelle: Hanus et al. 2021)

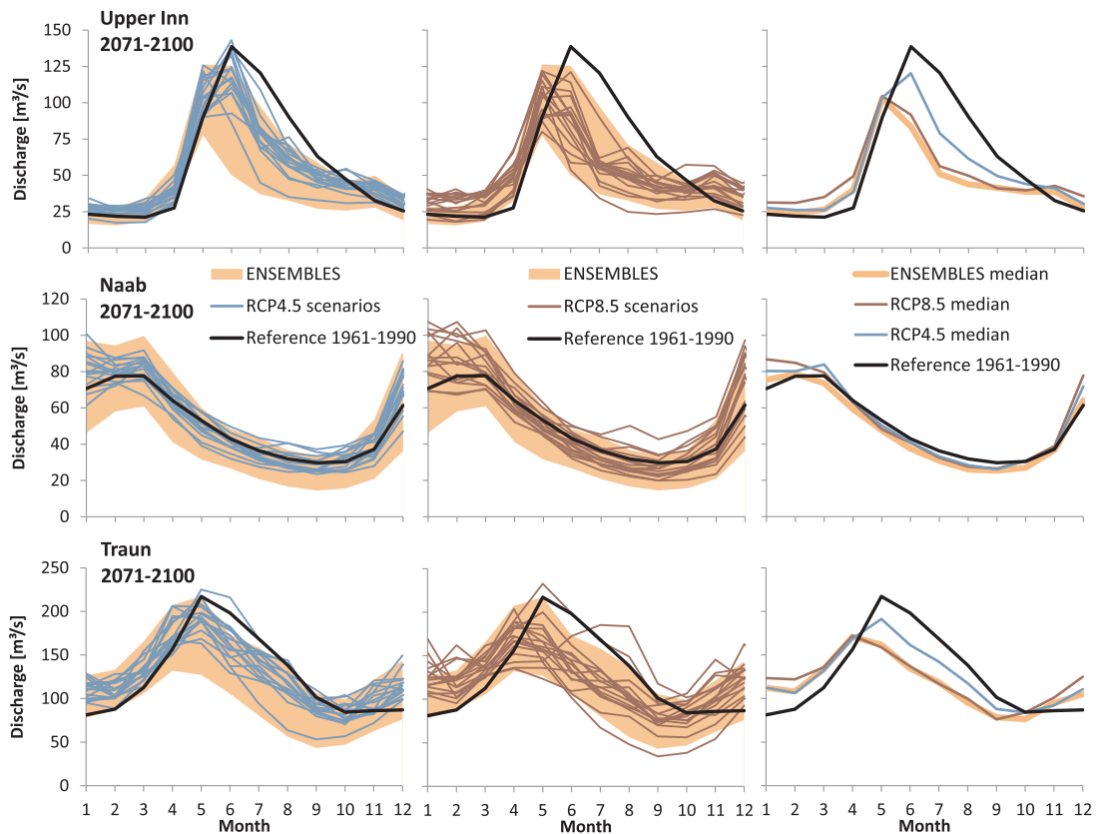


Abbildung 74: Änderung des mittleren Monatsabflusses (m^3/s) für drei Flussgebiete für die Periode 2071-2100, im Vergleich zu 1961-1990 (schwarze Linie), Projektionen mit Daten von 16 CORDEX-Klimamodellen in den Szenarien RCP4.5 (links) und RCP8.5 (Mitte), sowie der Bandbreite der Ergebnisse mit 21 ENSEMBLES-Klimamodellen im Szenario A1B (orange Fläche); rechts: Ensemble-Mediane (Quelle: Stanzel und Kling 2018)

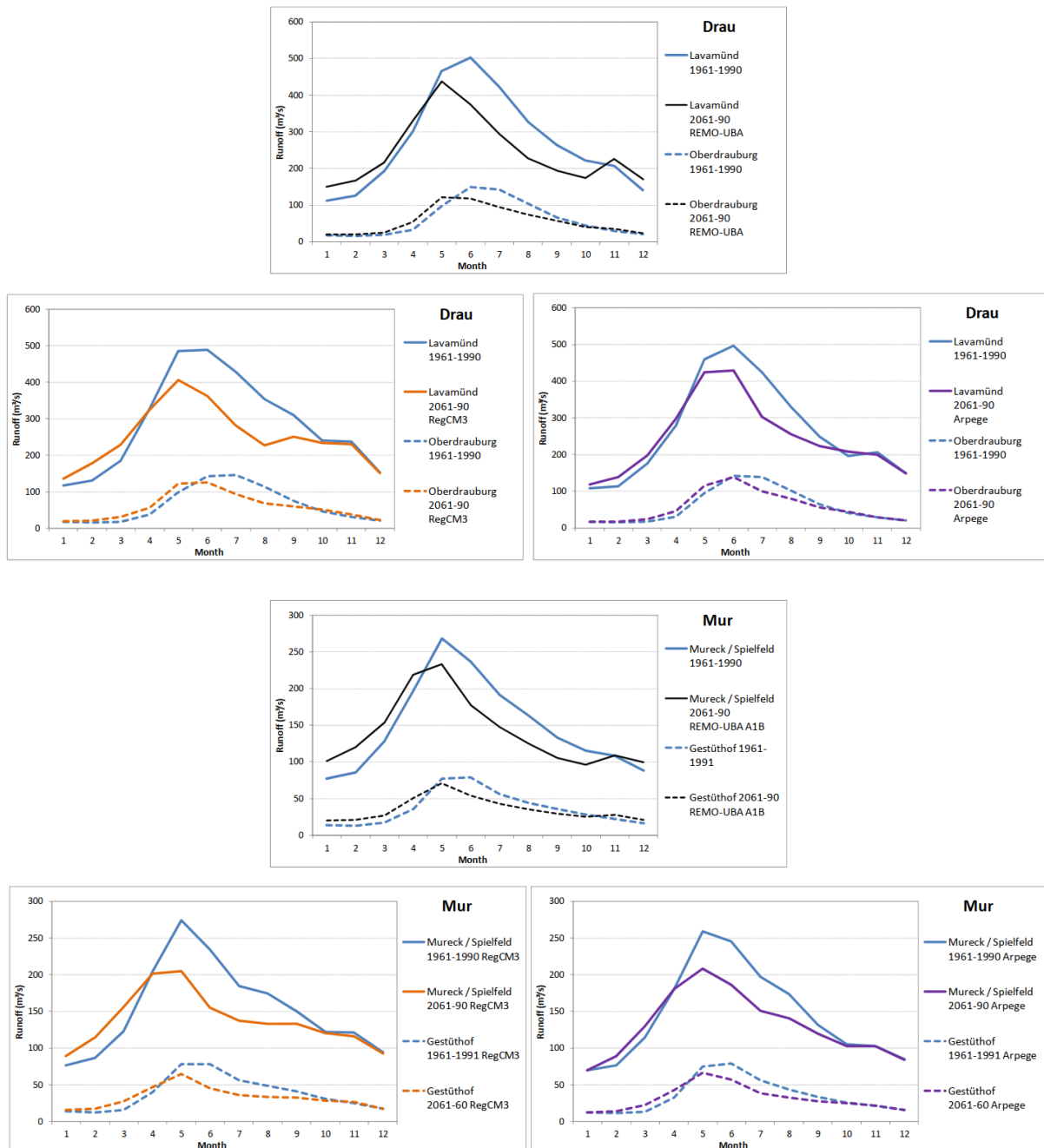


Abbildung 75: Änderung des mittleren Monatsabflusses (m^3/s) für zwei Flussgebieten für die Periode 2061-2090, im Vergleich zu 1961-1990 (blaue Linien), Projektionen mit Daten von 3 Regionalen Klimamodellen im Szenario A1B (REMO-UBA schwarze Linien, RegCM3 orange Linien und Arpege violette Linien) (Quelle: Nachtnebel et al. 2012)

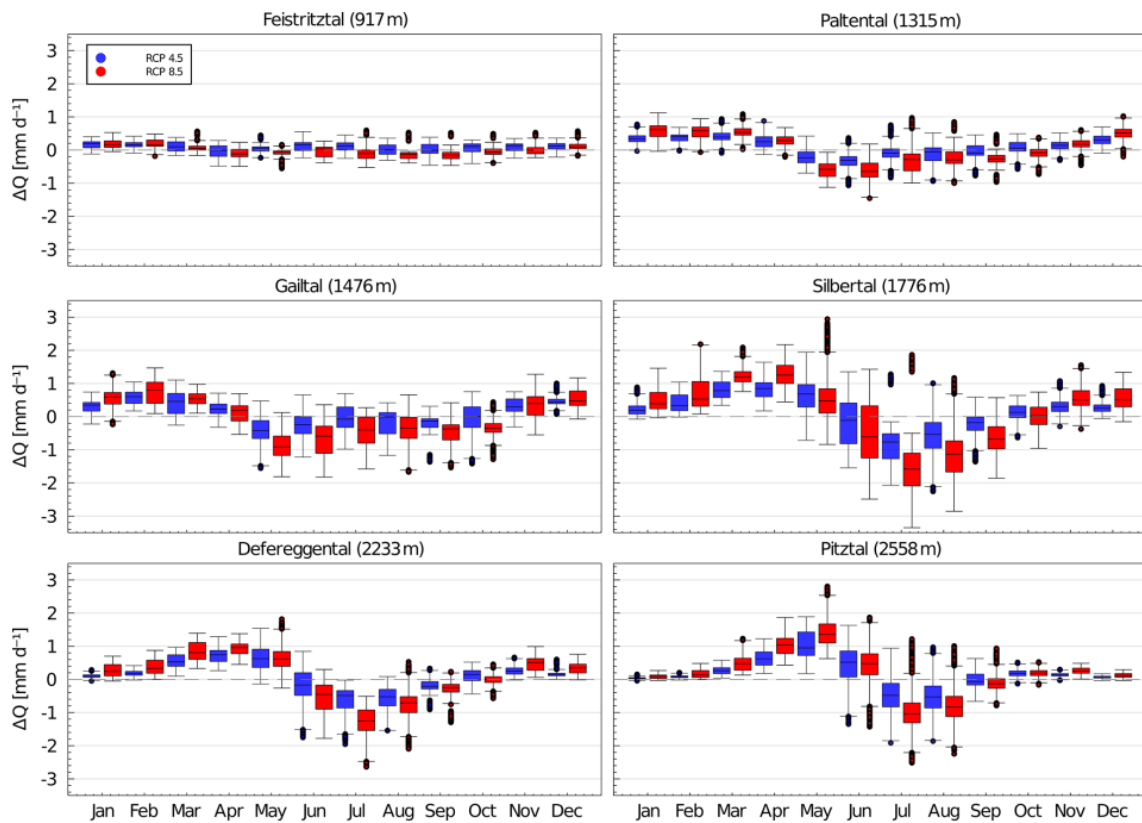


Abbildung 76: Änderung des mittleren Monatsabflusses (mm/Tag) für sechs kleinere alpine Flussgebiete für die Periode 2071-2100, Projektionen mit Daten des CORDEX-Ensembles mit den Emissionsszenarien RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot), gegenüber 1981-2010 (Quelle: Hanus et al. 2021)

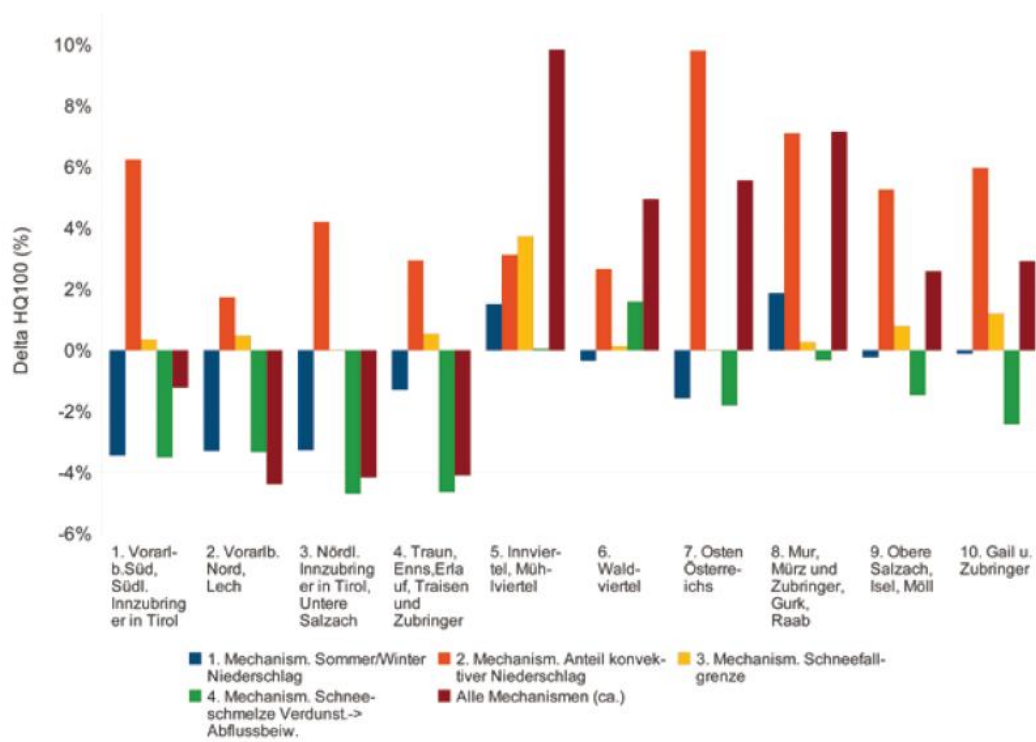


Abbildung 77: Änderung des Hochwasserabflusses HQ100 bei bestimmten Annahmen der Änderung der Hochwasser auslösenden Prozesse (2021-2050 im Vergleich zu 1976-2007). (Quelle: Blöschl et al. 2011)

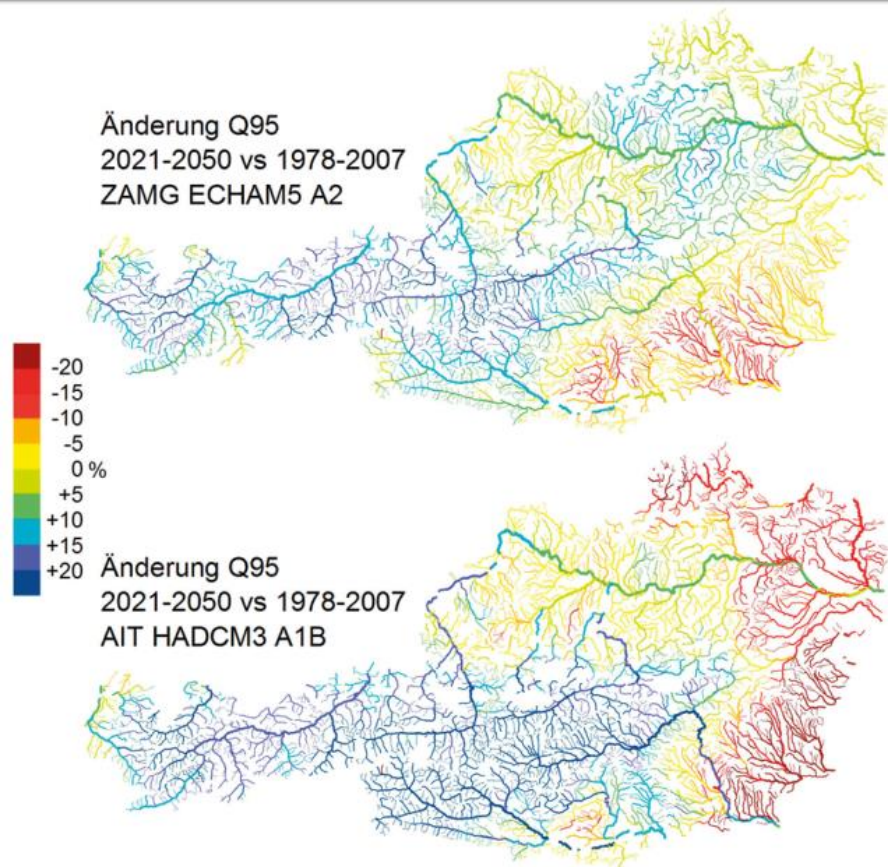


Abbildung 78: Änderung des Niederwasserabflusses Q95 für den Zeitraum 2021–2050 im Vergleich zu 1978–2007 berechnet mit einem kontinuierlichen Niederschlag-Abflussmodell und Inputdaten aus zwei Regionalen Klimamodellen mit zwei unterschiedlichen Emissionsszenarien. Blau: Zunahme des Q95, rot: Abnahme des Q95 (Quelle: Blöschl et al. 2018)

A 3.2. Auswirkungen auf die Wasserkraft

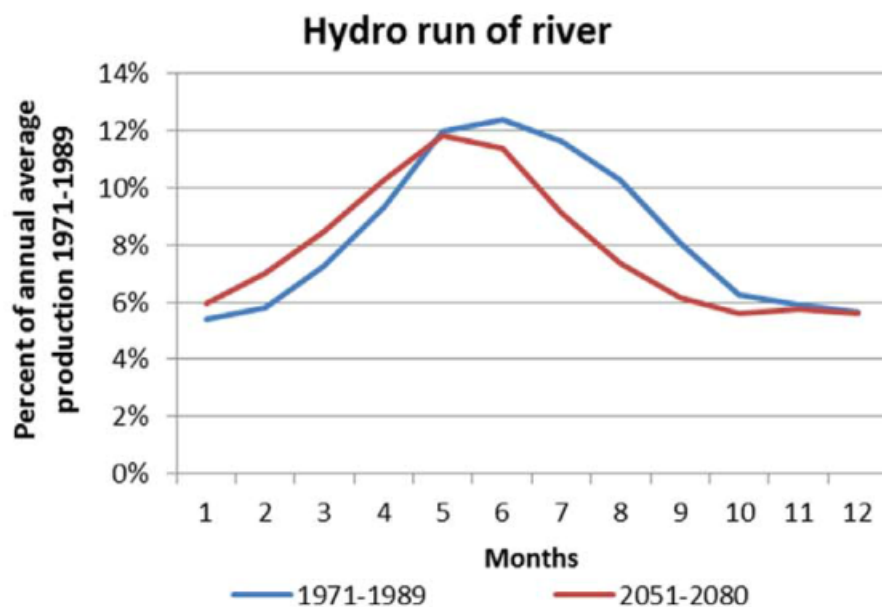


Abbildung 79: Änderung der Wasserkrafterzeugung in Laufkraftwerken in Österreich für den Zeitraum 2051–2080 im Vergleich zu 1971–1989, im Mittel von drei Modellprojektionen unter A1B-Emissionsszenarien (Quelle: Totschnig et al. 2017)

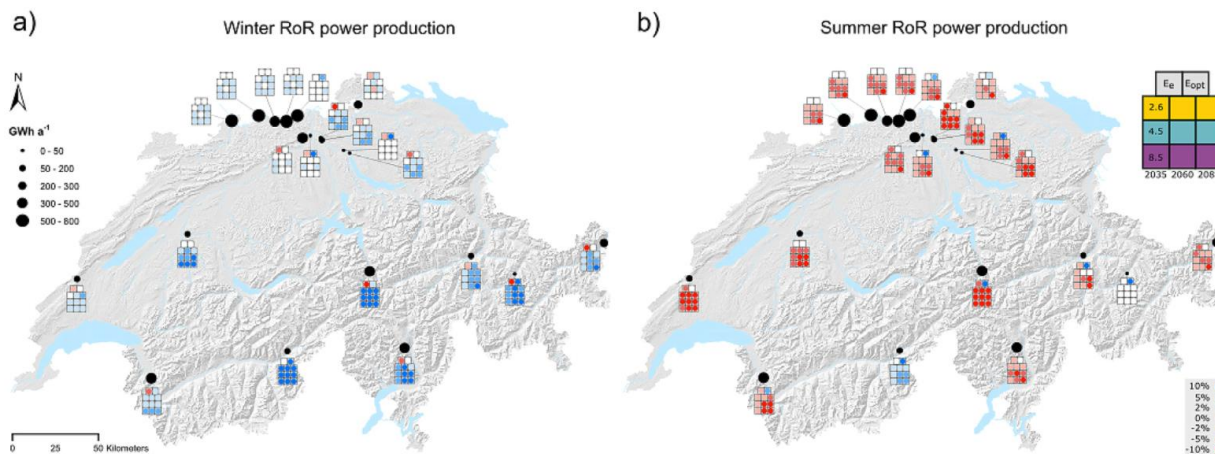


Fig. 9. Same as Fig. 8 but for a) winter (October to March) and b) summer (April to September).

Abbildung 80: Änderung der Wasserkrafterzeugung in Laufkraftwerken in der Schweiz für die Zeiträume 2020–2049, 2045–2074 und 2070–2099 (drei Spalten in den Ergebnis-Boxen), im Vergleich zu 1981–2010, für die Mittelwerte der Ergebnisse der Emissionsszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 (drei Zeilen in den Ergebnis-Boxen, Quelle: Wechsler et al. 2023)