

Publizierbarer Endbericht

Gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

A) Projektdaten

| Allgemeines zum Projekt | |
|---|--|
| Kurztitel: | FuSE-AT |
| Langtitel: | Future Snow Cover Evolution in Austria |
| Zitervorschlag: | Future Snow Cover Evolution in Austria (FuSE-AT) |
| Programm inkl. Jahr: | ACRP – 10 th Call (2017) |
| Dauer: | 3 Jahre |
| KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn: | Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) Dr. Andreas Gobiet |
| Kontaktperson Name: | Dr. Andreas Gobiet |
| Kontaktperson Adresse: | ZAMG KS Steiermark, Klusemannstraße 21, 8053 Graz |
| Kontaktperson Telefon: | +43 01 36026 3390 |
| Kontaktperson E-Mail: | andreas.gobiet@zamg.ac.at |
| Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland): | Universität Innsbruck, Tirol Prof. Ulrich Strasser |
| Schlagwörter: | Schnee, Klimawandel, Wintertourismus |
| Projektgesamtkosten: | 246,546 € |
| Fördersumme: | 246,546 € |
| Klimafonds-Nr: | KR17AC0K13673 |
| Erstellt am: | 13.02.2022 |

B) Projektübersicht

1 Kurzfassung

Schnee hat in Österreich eine große sozioökonomische Bedeutung, beispielsweise in den Bereichen Winter Tourismus, Wasserkraft, oder Wasserversorgung. Dennoch gab es vor dem Projekt FuSE-AT ("Future Snow Cover Evolution in Austria") keine umfassende Einschätzung der zukünftigen Entwicklung der Schneebedingungen in Österreich. FuSE-AT hatte zum Ziel die österreichischen Klimaszenarien ÖKS15 um nutzergerechte Indikatoren rund um das Thema Schnee zu erweitern und diese der Klimafolgenforschung und der Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen. Dies wurde realisiert, indem ein operationelles Schneemodell des österreichischen Wetterdienstes ZAMG für die Anwendung auf klimatologische (lange) Zeiträume und auf die meteorologischen Resultate von Klimamodellen angepasst und angewendet wurde. Die neuen Schneeszenarien decken den Zeitraum 1961 bis 2100 und die gesamte Fläche Österreichs auf einem 1km x 1km Gitter ab und wurden über das CCCA Datenzentrum frei zugänglich veröffentlicht.

Parallel dazu wurde ein intensiver Prozess zur Einbindung von Nutzer/innen und Interessensgruppen aufgesetzt, mit dessen Hilfe Fallstudien zur Demonstration gesellschaftlich relevanter Anwendungen der FuSE-AT Ergebnisse definiert und durchgeführt wurden. Die Fallstudien decken die Bereiche Wasserkraft, Wasserversorgung und Wintertourismus ab, wobei das Hauptaugenmerk auf Wintertourismus lag.

Die Ergebnisse von FuSE-AT zeigen, dass unter Annahme des „worst-case“ Szenarios RCP8.5 Schnee bis zum Ende des 21. Jahrhunderts unter 1500 m Seehöhe eine Seltenheit wird. Andererseits zeigt das dem "2-Grad-Ziel" entsprechende optimistische Szenario RCP2.6, dass Verluste auf -20% bis -40% reduziert werden können. Zusätzlich zum Naturschnee wurden meteorologischen Rahmenbedingungen für die Erzeugung von technischem Schnee untersucht: In tiefgelegenen Skigebieten muss in den kommenden Jahrzehnten auf jeden Fall (RCP2.6 und RCP8.5) mit einem Verlust von -20% an Stunden mit günstigen Bedingungen für die Schneeerzeugung gerechnet werden, in hochgelegenen Gebieten über 2000 m Seehöhe beträgt der Verlust nur -5%. Langfristig (nach 2050) könnte sich die Situation unter Annahme von RCP2.6 stabilisieren, oder die Verluste unter Annahme von RCP8.5 stark ansteigen. Weiter wurde gezeigt, dass die Auswirkungen des Klimawandels auf Wintertourismus sehr unterschiedlich sind, abhängig von Seehöhe, Ausrichtung der Hänge und lokalklimatischen Effekten wie Kaltluftseen.

2 Executive Summary

In Austria, snow cover has widespread socio-economic and ecological relevance, e.g., for winter tourism, hydropower generation and water supply. Prior to the project FuSE-AT ("Future Snow Cover Evolution in Austria") no comprehensive

analysis of the future evolution of SC in Austria existed. FuSE-AT aimed at extending the Austrian national climate scenarios ÖKS15 by user-tailored snow-related variables and to make them available to researchers and the public, in order to improve the assessment of snow cover evolution and its socio-economic impacts in Austria. This was realized by adapting an operational snow model to climatic time scales (SNOWGRID-CL), processing meteorological input of gridded observational datasets and the Austrian climate scenarios ÖKS15, and publishing the results via the data centre of the Climate Change Centre Austria for open access.

In parallel, an intensive stakeholder process was established, which shaped a range of case-studies to demonstrate relevant applications of the FuSE-AT scenarios and defined user-tailored indicators describing the impact of climate change related to snow. The case studies covered the sectors hydropower, water supply, and, most prominently, winter tourism.

Analysis of the results shows, that natural snow will become very rare below about 1500 m a.s.l. in Austria until the end of the 21st century, if the “worst case scenario” RCP8.5 cannot be avoided. On the other hand, by achieving the optimistic emission pathway RCP2.6, losses can be limited to about -20% to -40%. Apart from natural snow, also the meteorological boundary conditions for technical snow production are effected by climate change: In low lying skiing resorts loss of -20% of potential snowmaking hours in the coming decades cannot be avoided, even in the most optimistic scenario. However, at high elevations above 2000 m a.s.l. losses are very small (about -5%) in the optimistic scenario. The results demonstrate that impact of climate change on snow abundance for winter tourism is very divers, depending on altitude, slope orientation and micro-climatic effects like temperature inversions. In addition, it is demonstrated that the future of snow in Austria is rather determined until 2050 with unavoidable reductions in the order of -20% (depending on indicator and altitude), but highly dependent on the emission pathway in the second half of the 21st century.

3 Hintergrund und Zielsetzung

Schnee hat in Österreich eine große sozioökonomische Bedeutung, beispielsweise in den Bereichen Winter Tourismus, Wasserkraft, und Wasserversorgung. Gleichzeitig kann aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit von Schnee ein starker Effekt der Klimaerwärmung auf die Schneebedingungen erwartet werden. Dennoch gab es vor dem Projekt FuSE-AT (“Future Snow Cover Evolution in Austria”) keine umfassende Einschätzung der zukünftigen Entwicklung der Schneebedingungen in Österreich. Im Sommer 2016 wurde die erste Generation der österreichischen Klimaszenarien verfügbar (ÖKS15; Chimani et al., 2016; 2020). ÖKS15 beinhaltet die Variablen Temperatur, Niederschlag und Globalstrahlung, sowie abgeleitete Indikatoren wie Heizgradtage, oder die Häufigkeit von Extremniederschlägen in hoher räumlicher (1 km) und zeitlicher

(täglich) Auflösung, aber bislang keine Variablen, die die Schneebedingungen beschreiben.

Das Hauptziel von FuSE-AT war dementsprechend die österreichischen Klimaszenarien ÖKS15 um Variablen und nutzergerechte Indikatoren rund um das Thema Schnee zu erweitern und diese der Klimafolgenforschung und der Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen, um so die wissenschaftlichen Grundlagen für die Klimafolgenforschung in Österreich zu verbessern. Um dieses Hauptziel zu erreichen wurden folgende Teilziele definiert:

- Anpassung, Kalibrierung und Evaluierung des Schneemodells SNOWGRID-CL zur Anwendung auf klimatologische Zeiträume und Ergebnisse von regionalen Klimamodellen (ÖKS15).
- Produktion eines Ensembles von Zukunftsszenarien und einer Analyse der Vergangenheit der Schneedecke und relevanter Schnee-hydrologischer Größen für Österreich auf einem 1km x 1km Gitter bis zum Jahr 2100.
- Demonstration der Relevanz der Änderungen in der Schnee-Hydrologie in Österreich durch Fallstudien in besonders betroffenen ökonomischen Sektoren: Winter Tourismus, Wasserkraft und Wasserversorgung.
- Herstellung und Verbreitung von allgemeinverständlichen, nutzerorientierten Informationen über die Zukunft der Schneedecke in Österreich, unter besonderer Berücksichtigung der Zielgruppen Öffentlichkeit, Politik, Praktiker/innen und Klimafolgenforscher/innen. Frei verfügbare Veröffentlichung der Projektergebnisse über das CCCA Datenzentrum.

4 Projektinhalt und Ergebnis(se)

(beinhaltet auch Methodik, siehe Abschnitt 6)

FuSE-AT ist in drei wissenschaftliche Arbeitspakete (WP) unterteilt. Im Folgendem werden die wichtigsten Methoden und Ergebnisse jedes dieser Arbeitspakete in einem eigenen Unterabschnitt behandelt.

4.1 Schneemodellierung (WP1)

SNOWGRID-CL (Olefs et al., 2020) ist die Klimaversion des operationellen Schneemodells (Olefs et al., 2013) des österreichischen Wetterdienstes ZAMG. Für FuSE-AT wurde es weiterentwickelt um klimatologische Zeiträume simulieren und meteorologischen Antrieb der österreichischen Klimaszenarien ÖKS15 verarbeiten zu können. Das erforderte Anpassungen in der Modell-Parametrisierung, Kalender-Anpassungen (da die regionalen Klimamodelle des ÖKS15 Datensatzes teilweise vom Gregorianischen Kalender abweichen) und die Entwicklung einer neuen Output Routine um die Ergebnisse in der „Climate and Forecast conventions for metadata“ (CF-conform) als NetCDF Dateien abspeichern zu können.

Die Sensitivität von SNOWGRID-CL auf verschiedene Modellkonfigurationen (Parametrisierungen) wurde untersucht und evaluiert. Details dazu sind im Artikel von Olefs et al. (2020) veröffentlicht. Ergebnisse der Sensitivitätsexperimente wurden gegen Beobachtungsdaten evaluiert, die manuelle und automatische Beobachtungen der ZAMG und des Hydrografischen Zentralbüros HZB beinhalten (85 Stationen aller Höhenlagen bis 2500 m Seehöhe). Die Daten unterlagen einer aufwändigen und strikten Qualitätskontrolle. Als Beispiel zeigt Abbildung 1 das Taylor Diagramm der saisonalen (Dezember, Jänner, Februar; DJF) Schneehöhe (SD) und Schneedeckendauer für unterschiedliche SNOWGRID-CL Konfigurationen (Evaluierungsperiode: 1961 bis 2018). Die Resultate zeigen, dass sowohl Korrelation als auch systematischer Fehler (Bias) der Konfigurationen sehr ähnlich sind (Korrelationskoeffizient für SD: 0.85, für Schneedeckendauer: 0.79), weswegen die Konfiguration mit dem geringsten Rechenaufwand für FuSE-AT ausgewählt wurde. Abbildung 2 zeigt exemplarisch die historische Entwicklung der mittleren SD und der Schneedeckendauer für die Station Feuerkogel in Oberösterreich und demonstriert die gute Übereinstimmung der gewählten SNOWGRID-CL Konfiguration mit den Beobachtungen. Eine zusätzliche Validierung von zeitlichen Trends auf verschiedenen Zeitskalen in der Periode 1961 bis 2018 ergänzte die Evaluierung und ergab eine „percentage correct“ von 0.87 (Olefs et al., 2020).

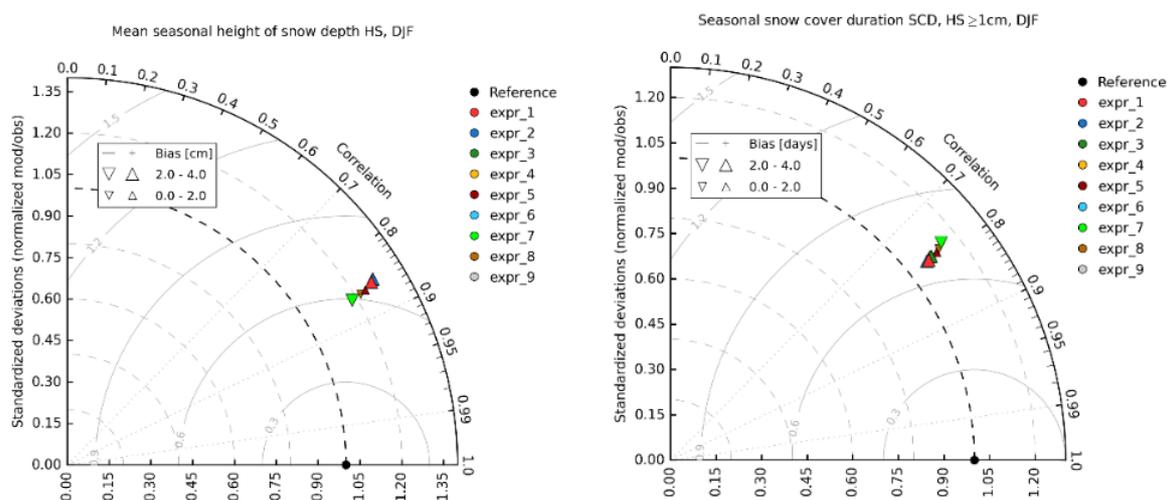


Abbildung 1: Taylor Diagramm für saisonale (DJF) mittlere SD (links) und Schneedeckendauer (SD > 1 cm, rechts) für Stationsdaten und unterschiedliche SNOWGRID-CL Konfigurationen (1961 bis 2018). Als Referenz dienten 85 Stationen im Höhenbereich von Tallagen bis 2500 m Seehöhe.

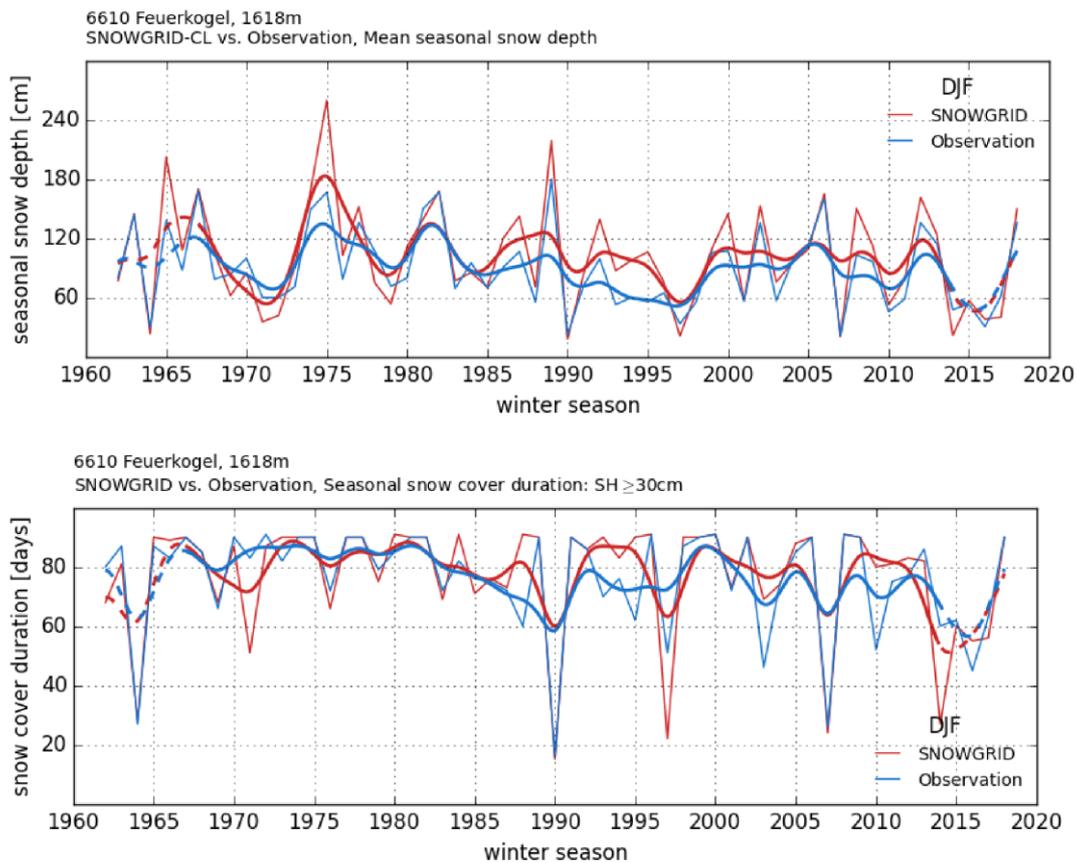


Abbildung 2: Beobachtete und modellierte saisonale (DJF) SD (oben) und Schneedeckendauer (SD > 1 cm, unten) für die Station Feuerkogel (1618 m Seehöhe). Blau: Beobachtung; rot: SNOWGRID-CL. Ein Gauss-Filter mit 11 Jahren Fensterweite wurde zur Glättung verwendet (dicke Linien).

Die FuSE-AT Produktionsläufe beinhalteten meteorologischen Antrieb für SNOWGRID-CL von zwei unterschiedlichen gegitterten Beobachtungsdatensätzen und 40 Szenario Simulationen aus dem ÖKS15 Datensatz. Das Resultat waren Gitterdatensätze von Schnee (1 km x 1 km) für ganz Österreich. Output-Variablen waren: Schneehöhe (SD), Neuschneesumme (NS), Schneewasseräquivalent (SWE) und Abfluss aus Schneeschmelze auf Tagesbasis. Zusätzlich wurde die Anzahl der Stunden, an denen technische Schneeerzeugung möglich ist, berechnet (2 Versionen: Feuchtkugeltemperatur unter -2 bzw. -4° C). Diese Berechnung wurde anhand einer Parametrisierung von Hofstätter (2008) durchgeführt. Sie basiert auf stündlichen Stationsdaten, einer Näherung der relativen Feuchte, einer Schätzung stündlicher Temperaturen auf Basis täglicher Minimum- und Maximum-Temperaturen und einer tabellarischen Zuordnung von Feuchte und Temperatur zu Feuchtkugeltemperatur.

Die meteorologischen Antriebsdaten (1961 bis 2020) für SNOWGRID-CL waren der 1 km x 1 km gegitterte Datensatz SPARTACUS (tägliche Mitteltemperaturen und Niederschlagssummen; Hiebl und Frei, 2016; 2018). Zusätzlich wurde eine Simulation (1961 bis 2011) auf Basis von SPARTACUS Temperatur und GPARD1 Niederschlag (Hofstätter et al., 2015) durchgeführt. Diese Simulation ist

notwendig um die Konsistenz zu mit ÖKS15 angetriebenen historischen SNOWGRID-CL Simulationen zu gewährleisten, da GPARD1 für die Bias-Korrektur der ÖKS15 RCMs verwendet wurde.

Die SNOWGRID-CL Szenario-Simulationen wurden mit meteorologischen Randbedingungen aus Simulationen regionaler Klimamodelle angetrieben, welche in den Projekten ÖKS15 und Starc-Impact (Chimani et al., 2016; 2020) erzeugt wurden und die offiziellen österreichischen Klimaszenarien darstellen. Nachdem die verwendete SNOWGRID-CL Konfiguration effizienter als erwartet war, spielten Rechenzeiten keine einschränkende Rolle und das gesamte ÖKS15 Ensemble konnte prozessiert werden. Zu beachten ist, dass zusätzlich zu den ursprünglich geplanten Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 auch das „2-Grad-Szenario“ RCP2.6 verarbeitet werden konnte. Insgesamt wurden jeweils 16 Simulationen für RCP4.5 und für RCP8.5 (Tabelle 1) und acht Simulationen für RCP2.6 (Tabelle 2) durchgeführt. Die Resultate wurden über das CCCA Datenzentrum (<https://data.ccca.ac.at/>) frei zu Verfügung gestellt.

Tabelle 1: Globalmodell (Zeilen) – RCM (Spalten) Matrix der verwendeten Simulationen aus dem ÖKS15 Datensatz (RCP8.5 und RCP4.5, 2006-2100). *REMO2009 wurde von zwei unterschiedlichen Realisationen desselben Globalmodells angetrieben. Beide Simulationen wurden in FuSE-AT benutzt.

| | <i>CCLM4-8-17</i> | <i>ALADIN53</i> | <i>RCA4</i> | <i>RACMO22E</i> | <i>HIRHAM5</i> | <i>WRF331F</i> | <i>REMO2009</i> |
|--------------|-------------------|-----------------|-------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
| CNRM-CM5-LR | X | | | | | | |
| CNRM-CM5 | | x | x | | | | |
| EC-EARTH | x | | x | X | x | | |
| IPSL-CMA5-MR | | | x | | | x | |
| HadGEM2-ES | x | | x | | | | |
| MPI-ESM-LR | X | | x | | | | x* |
| NorESM1-M | | | | | x | | |

Tabelle 2: Globalmodell (Zeilen) – RCM (Spalten) Matrix der verwendeten Simulationen aus dem ÖKS15 Datensatz (RCP2.6, 2006-2100). *REMO2009 wurde von zwei unterschiedlichen Realisationen desselben Globalmodells angetrieben. Beide Simulationen wurden in FuSE-AT benutzt.

| | <i>CCLM4-8-17</i> | <i>RCA4</i> | <i>RACMO22E</i> | <i>HIRHAM5</i> | <i>REMO2009</i> |
|--------------|-------------------|-------------|-----------------|----------------|-----------------|
| EC-EARTH | X | x | x | x | |
| IPSL-CMA5-MR | | | | | |
| HadGEM2-ES | | x | | | |
| MPI-ESM-LR | | x | | | x* |

4.2 Schnee-Szenarien und ihre Zuverlässigkeit (WP2)

Die hohe numerische Effizienz von SNOWGRID-CL vereinfachte die das Ensemble-Design erheblich, da auf Ausdünnung zur Verringerung des Rechenaufwandes verzichtet werden konnte. Dennoch galt es, eventuelle unrealistische RCM Simulationen auszuschneiden und systematische Fehler aufgrund von Sampling-Problemen in ÖKS15 zu vermeiden. Relevante Sampling-Probleme konnten aufgrund intensiver Evaluierung von ÖKS15 in Vorgängerprojekten (Chimani et al.,

2016; 2020) und der Analyse von Klimaänderungssignalen meteorologischer und Schnee-Indikatoren innerhalb von FuSE-AT für unwahrscheinlich erklärt werden. Zusätzlich konnten keine unrealistischen RCM Simulationen identifiziert werden. Als Beispiel ist eine Analyse der SD für das gesamte RCP8.5-Ensemble über dem Gebiet von Tirol in Abbildung 3 gezeigt, die keine auffälligen Ausreißer erkennen lässt. Derartige Analysen, gemeinsam mit der umfassenderen Evaluierung von ÖKS15 (Chimani et al., 2019; 2020), bestätigten die hohe Qualität von ÖKS15 und die Eignung aller ÖKS15 RCM-Simulationen als meteorologischer Antrieb für SNOWGRID-CL.

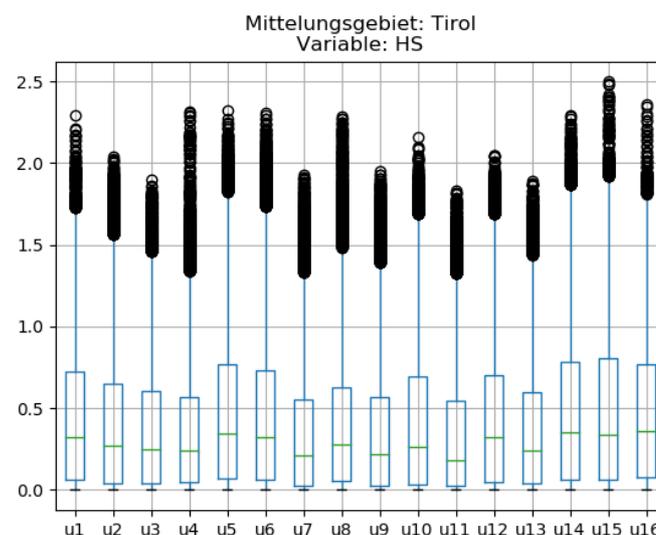


Abbildung 3: Verteilungen der täglichen SD [m] in allen Simulationen des RCP8.5-Ensembles über Tirol. u1 bis u16 kennzeichnen die unterschiedlichen Simulationen des Ensembles.

Die Analyse der FuSE-AT Schneeszenarien wird hier anhand der Entwicklung des österreichischen Schnee-Klimas in unterschiedlichen Szenarien bis 2100 dargestellt und immer im Bezug zur Vergangenheit interpretiert. In diesem Bericht werden exemplarisch Resultate für die maximale jährliche SD und die mittlere SD im Winter (DJF) als zeitliche Entwicklung, räumliche Klimaänderungssignale und Höhen-abhängige Muster gezeigt. Eine genauere Beschreibung von Trends in der Vergangenheit wurden in Olefs et al. (2020) veröffentlicht. Weitere Resultate der FuSE-AT Szenarien werden derzeit für eine wissenschaftliche Veröffentlichung vorbereitet (Gobiet et al., in Vorbereitung).

Als Kontext sind die wesentlichsten meteorologischen Einflüsse auf Schnee wichtig. Abbildung 4 gibt einen Überblick die Entwicklung des Winter-Klimas in Österreich. Im Vergleich zur der Referenzperiode 1971 bis 2000 (die bereits +1 K wärmer als die vorindustrielle Periode 1850 bis 1900 war; ZAMG, 2021), wird erwartet, dass die Winter-Temperaturen (obere Abb.) in allen Szenarien bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts um etwa +1.4 K weiter ansteigen werden. Danach würde RCP2.6 zu einer Stabilisierung auf diesem Niveau führen, während RCP8.5 einen weiteren Anstieg auf bis zu +4.5 K anzeigt. Szenarien des Winterniederschlags (untere Abb.) sind sehr unsicher, zeigen aber große Variabilität von Jahr zu Jahr und im

Mittel eine langfristige Niederschlagszunahme von +20% bis +30% an. Diese Ergebnisse bestätigen neuere Literatur über Klimawandel im Alpenraum (z.B. Gobiet und Kotlarski, 2020), zeigen aber einen etwas größeren Niederschlagsanstieg als frühere Studien (z.B., Gobiet et al., 2014).

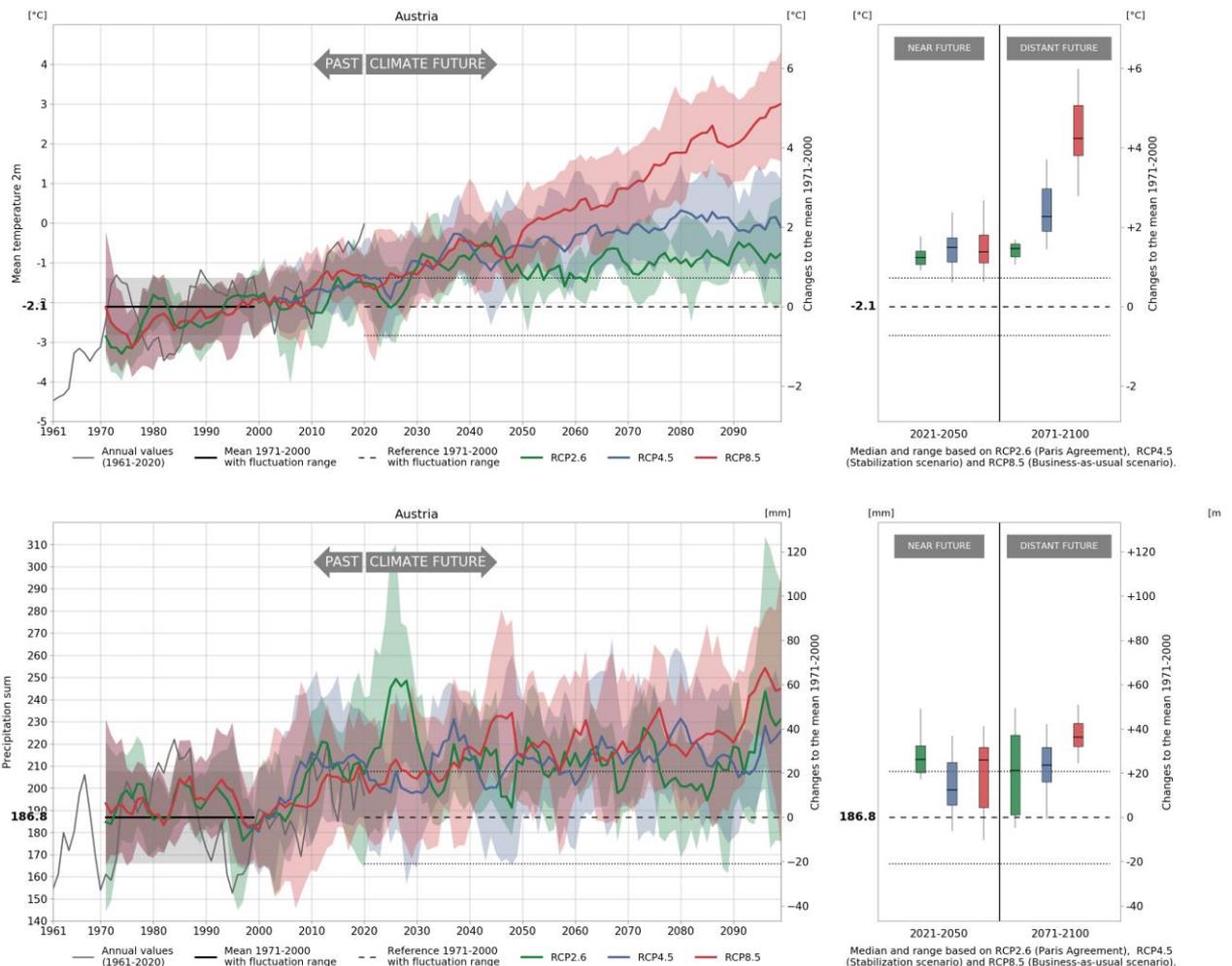


Abbildung 4: Zeitliche Entwicklung der Wintertemperaturen (DJF) (oben) und des Winterniederschlages (unten) in Österreich (räumlicher Mittelwert) von 1961 bis 2100. Graue Linien stellen Beobachtungsdaten dar, farbige Linien Modellergebnisse unterschiedlicher Szenarien. Schattierte Bereiche stellen ein Maß der Unsicherheit der Klimaprojektionen dar (10 und 90 Perzentile des Modellensembles).

Abbildung 5 zeigt die Konsequenzen dieser Entwicklung auf die mittlere und maximale SD in Österreich. Beide Parameter reagieren mit einer deutlichen Abnahme. Bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts führen alle Szenarien zu ähnlichen Resultaten, einer Abnahme um rund -20%. Nach 2050 stabilisiert sich die Schneedecke unter Annahme von RCP2.6, während sie unter Annahme von RCP8.5 bis 2100 um etwa -70% zurückgeht.

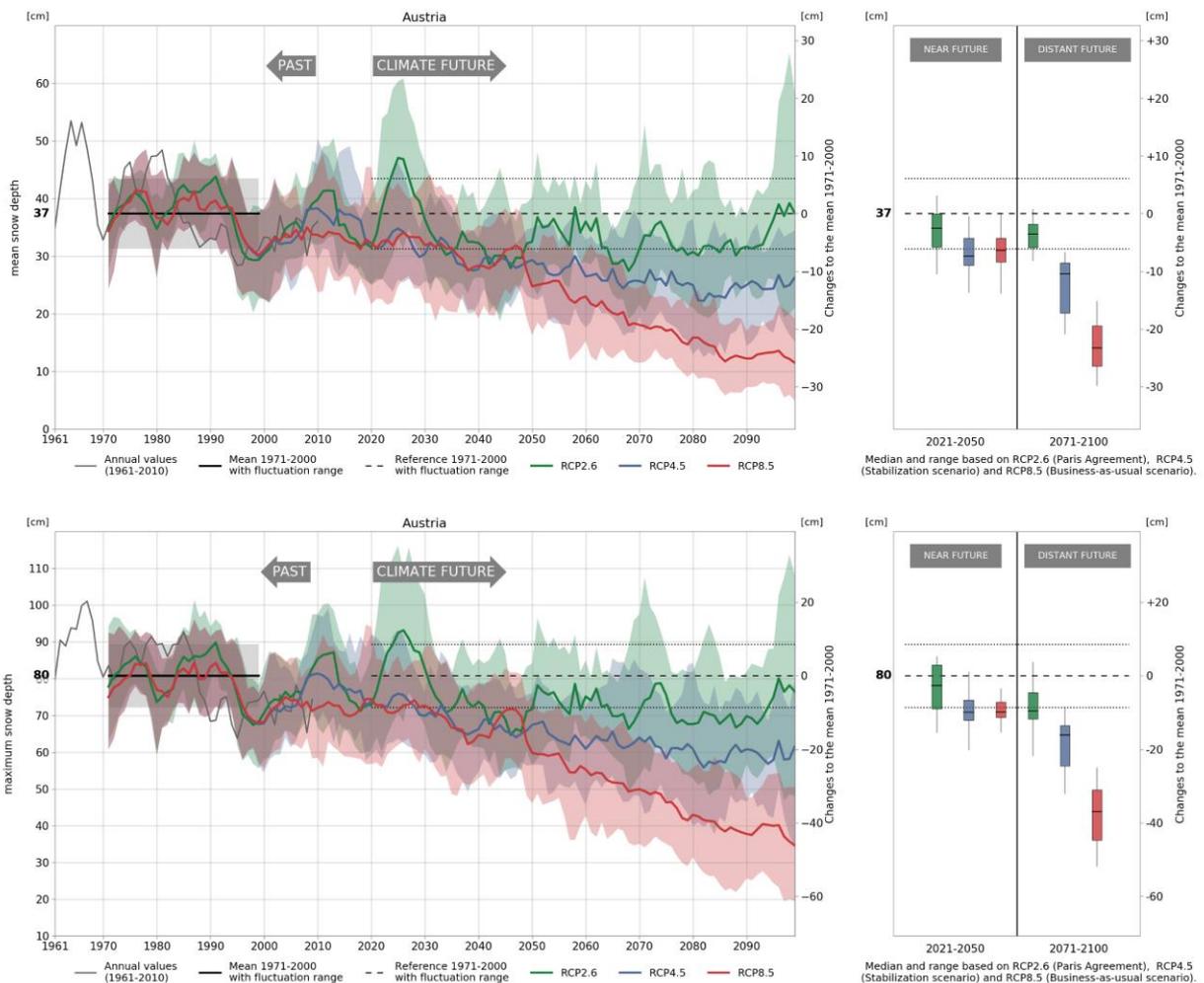


Abbildung 5: Entwicklung der mittleren DJF SD (oben) und der maximalen jährlichen SD (unten) in Österreich (räumlicher Mittelwert) von 1961 bis 2100. Graue Linien stellen Beobachtungsdaten dar, farbige Linien Modellergebnisse unterschiedlicher Szenarien. Schattierte Bereiche stellen ein Maß der Unsicherheit der Klimaprojektionen dar (10 und 90 Perzentile des Modellensembles).

Abbildung 6 zeigt das räumliche Muster der erwarteten Änderung von mittlerer und maximaler SD bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. RCP2.6 führt in tieferen Lagen zu Verlusten von -20% bis -40%, mit höheren Verlusten im Osten Österreichs. RCP8.5 führt zu Verlusten von -80%, mit geringeren Werten in höheren Lagen. Auffällig ist, dass die maximale SD generell weniger sensitiv auf den Klimawandel reagiert als die mittlere SD. Die Verluste der maximalen SD liegen für RCP2.6 bei etwa -20% und für RCP8.5 bei etwa -40%.

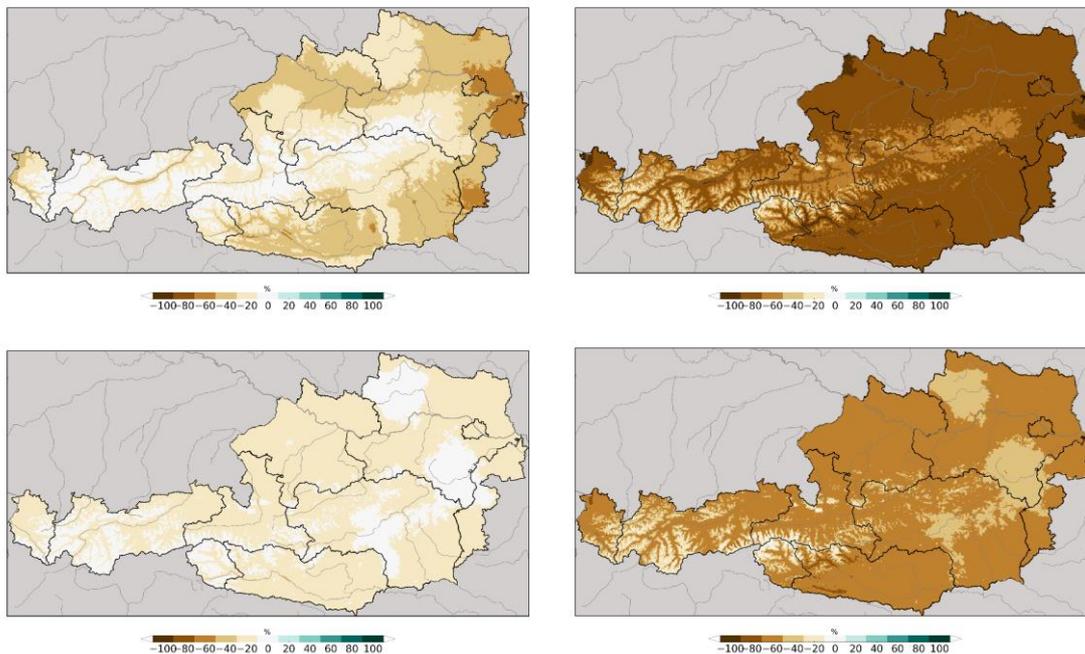


Abbildung 6: Änderung der räumlichen Verteilung der Schneedecke (Ensemble Mittelwert) bis zur Periode 2071 bis 2100, verglichen mit 1971 bis 2000. Oben: Änderung der mittleren DJF SD [%]; unten: Änderung der maximalen jährlichen SD [%]; links: RCP2.6; rechts: RCP8.5.

Die Betrachtung der Höhenabhängigkeiten (Abbildung 7) zeigt, dass Verluste in größeren Höhen (über 1500 m Seehöhe) auf einem geringen Level gehalten werden können (<10 %) und auch in tiefen Lagen unter -40% bleiben, wenn RCP2.6 angenommen wird. Gleichzeitig sind im schlimmsten Fall (RCP8.5) in den tiefen Lagen Verluste nahe 100% möglich.

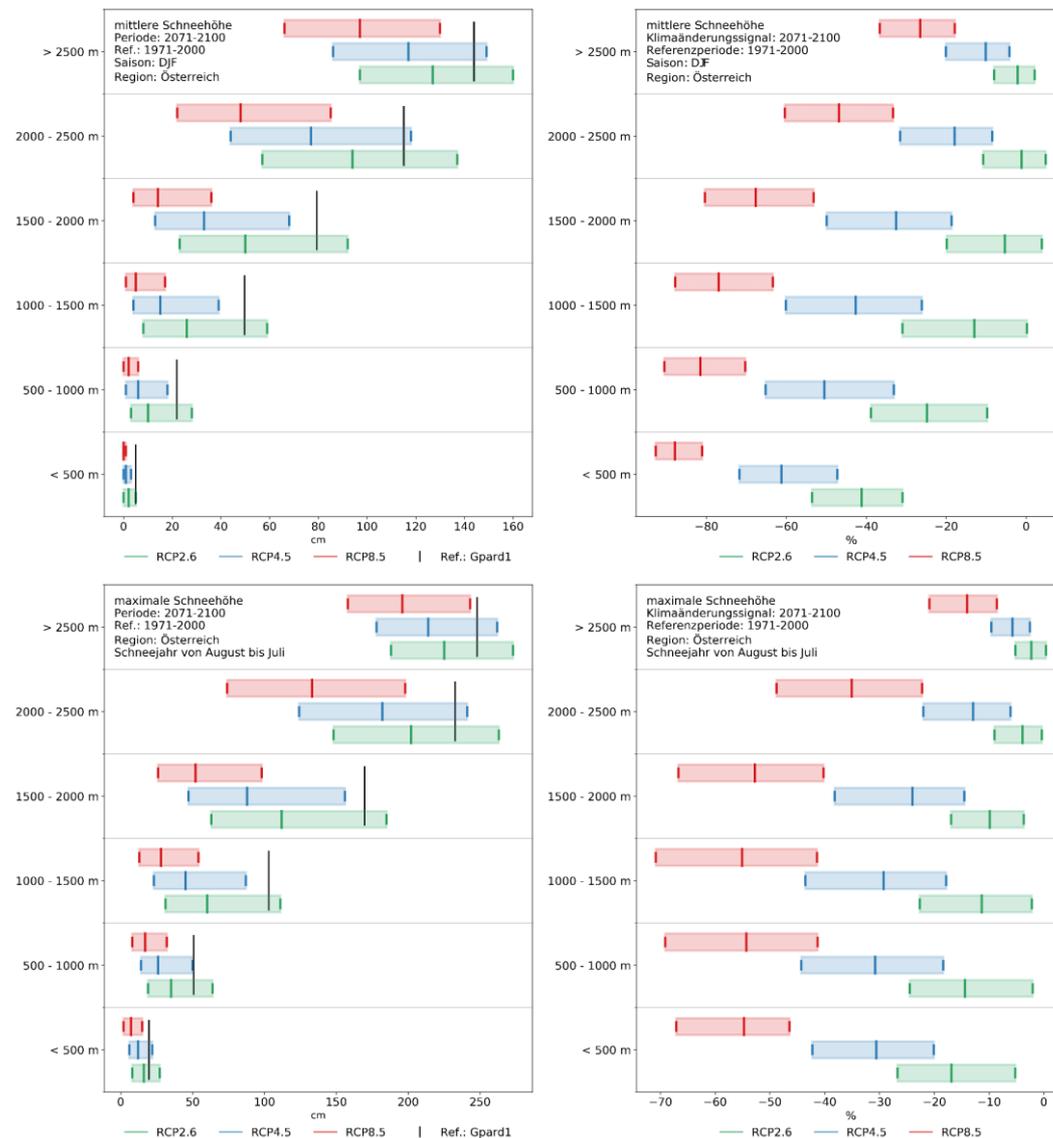


Fig. 7: Änderung der SD in unterschiedlichen Höhenlagen. (Ensemble Median, 10 und 90 Perzentile) bis zur Periode 2071 – 2100, relativ zu 1971 – 2000. Oben: Mittlere DJF SD; unten: Maximale jährliche SD; links: absolute Werte inklusive Beobachtung [cm]; rechts: relative Änderung [%].

Zusammenfassend zeigt diese Auswertung, dass Naturschnee unter 1500 m Seehöhe in Österreich eine Seltenheit wird, falls das „worst case“ Szenario RCP8.5 nicht vermieden werden kann. Andererseits können Verluste der Schneebedeckung durch Erreichen des 2-Grad-Zieles (RCP2.6) durchaus auf -20% bis -40% (in größeren Höhen weniger) begrenzt werden.

Im Folgenden werden zusätzlich zu diesen grundlegenden Auswertungen anwendungsorientierte Parameter kurz analysiert (detailliertere, nutzergerechte Auswertungen sind in Abschnitt 4.3 zu finden). Der Co-Design Prozess gemeinsam mit Stakeholdern zur Definition nutzergerechter Indikatoren (siehe 4.3) zeigte sich, dass die Anzahl der Tage mit Schneebedeckung („Länge der Schneesaison“) einer der illustrativsten und nützlichsten Überblicks-Indikatoren ist, insbesondere im Bereich des Winter Tourismus. Deswegen zeigen wir hier die Schneesaison-

Länge, gemeinsam mit spezifischeren Parametern wie die potentiell möglichen Beschneigungszeiten und den Abfluss aus Schneeschmelze.

Die räumliche Verteilung der Änderung Schneesaison-Länge (Anzahl der Tage mit mehr als 10 cm SD) bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (Abbildung 8) in absoluten Zahlen gemessen zeigt größere Verluste in den Bergregionen als im Flachland und einen drastischen Unterschied zwischen RCP2.6 und RCP8.5. Die Höhenverteilung der Änderungen (Abbildung 9) zeigt zusätzliche Details: RCP2.6 begrenzt die Verluste auf -40% in tiefen Lagen und unter -20% über 1000 m Seehöhe. Ganz im Gegensatz dazu führt RCP8.5 bis zum Ende des 21. Jahrhunderts zu Verlusten um -90% in tiefen Lagen und nur über 2000 m Seehöhe können die Verluste unter -50% gehalten werden.

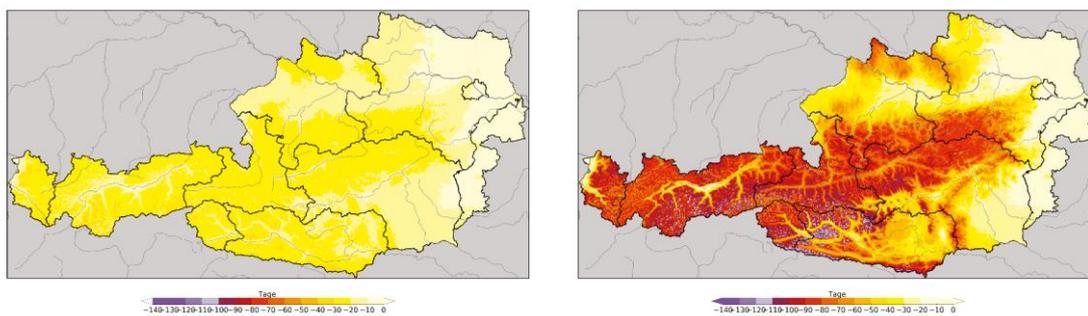


Abbildung 8: Änderung in der Anzahl der Tag emit Schneebedeckung (SD > 10 cm) [Tage pro Jahr] bis zur Periode 2071 – 2100, relativ zu 1971 – 2000. Links: RCP2.6; rechts: RCP8.5.

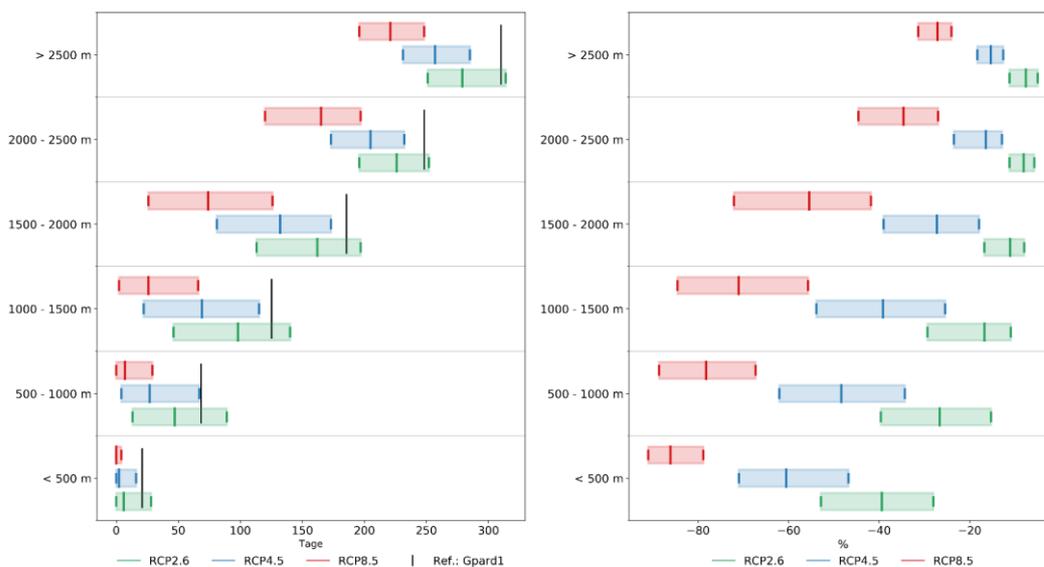


Abbildung 9: Höhenverteilung der Änderung der Tage mit Schneedecke (SD > 10 cm). Links: Absolute Zahlen [Tage pro Jahr]; rechts: relative Änderung [%] bis zur Periode 2071 – 2100, relativ zu 1971 – 2000.

Abbildung 10 zeigt die zeitliche Entwicklung potentiell möglichen Beschneistunden im Dezember im Höhenbereich von 1000 m bis 1500 m Seehöhe. Hier wurde ein eher optimistischer Grenzwert der Feuchtkugeltemperatur von -2°C angenommen. Dezember ist eines der wichtigsten Monate für die technische Grundbeschneung in vielen Skigebieten und der gewählte Höhenbereich repräsentiert die kritischen tiefer liegenden Hänge. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Verlust von zumindest -20% nicht vermieden werden kann und dass nach 2050 entweder Stabilisierung oder weitere Verluste bis zu -60% (je nach Szenario) zu erwarten sind. In der unteren Abbildung ist der Höhenbereich zwischen 2000 m und 2500 m Seehöhe dargestellt. Hier sind die Verluste viel geringer mit -5% in RCP2.6 und -35% in RCP8.5.

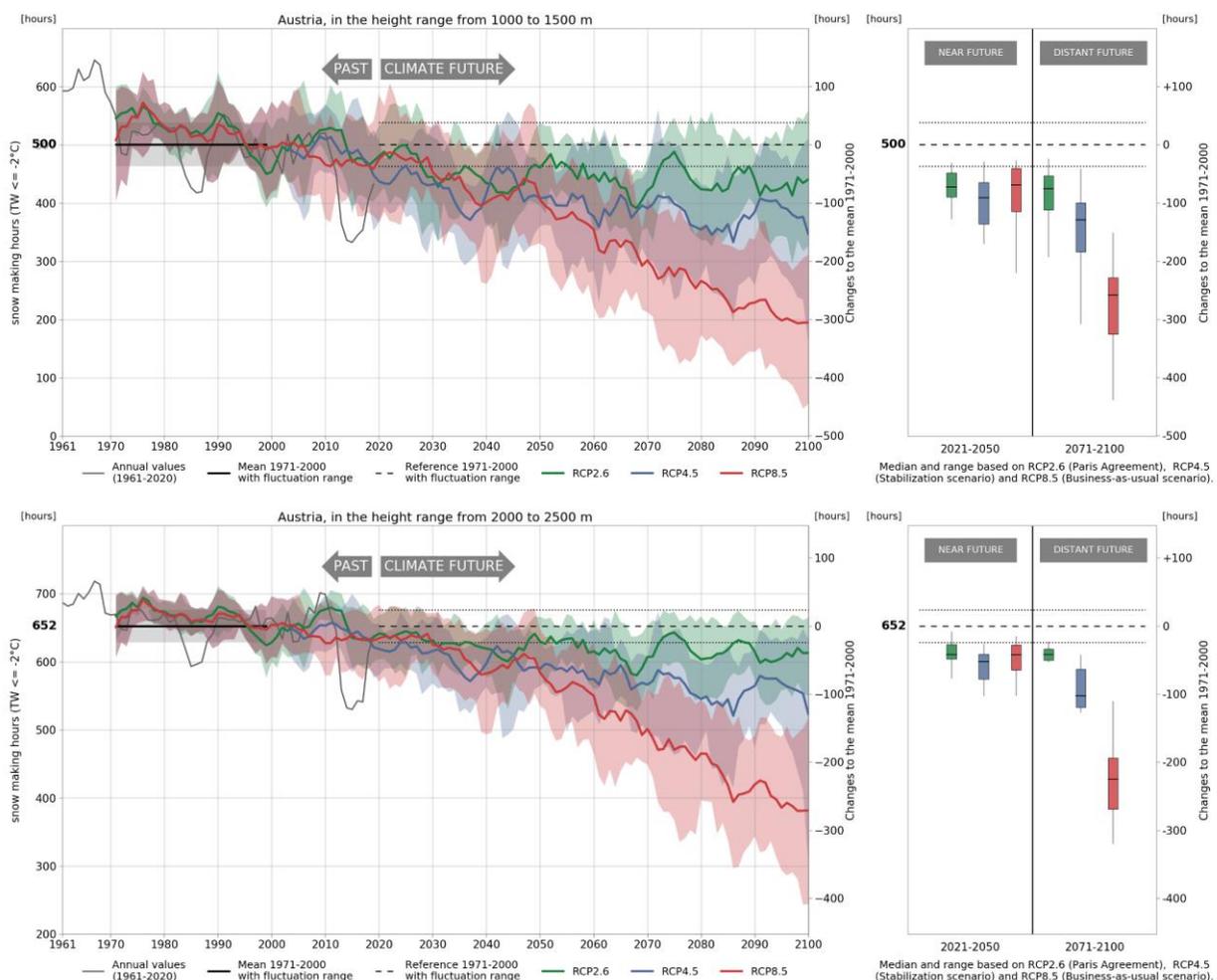


Abbildung 10: Anzahl der Stunden mit geeigneten Bedingungen für technische Beschneigung (Feuchtkugeltemperatur $< -2^{\circ}\text{C}$) im Dezember. Oben: Höhenbereich 1000 m – 1500 m; unten: Höhenbereich 2000 m – 2500 m.

Abbildung 11 zeigt Änderung im Oberflächenabfluss durch Schneeschmelze für jedes der die Monate Januar, Februar, März und April für RCP8.5. Im Jan. und Feb. ist eine Zunahme des Abflusses zu erwarten, aber schon ab dem März zeigen Regionen unter etwa 2000 m Seehöhe drastische Abnahmen.

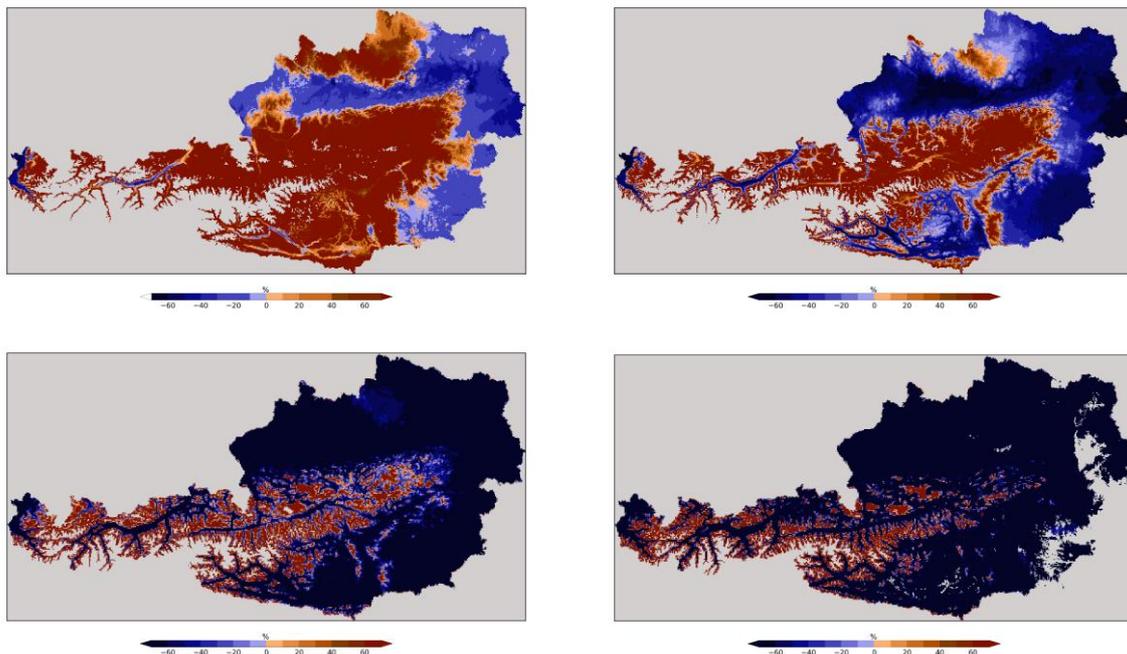


Abbildung 11: Änderung im Oberflächenabfluss durch Schneeschmelze [%] bis 2071 – 2100 (verglichen mit 1971 – 2000) im Szenario RCP8.5. Oben links: Januar; oben rechts: Februar; unten links: März; unten rechts: April.

Diese Saisonalität hat Konsequenzen für Wasserkraft und Wasserversorgung und ist ein vielversprechendes Gebiet für weitere Untersuchungen auf Basis der FuSE-AT Ergebnisse.

4.3 WP3 Nutzer-Integration und Fallstudien (WP3)

Der Nutzer-Integration wurde in FuSE-AT besondere Aufmerksamkeit gewidmet und durch zahlreiche Workshops und Einbeziehung der Betroffenen in die Definition von Indikatoren und die Ausrichtung von Fallstudien erreicht. Insgesamt wurden sechs Stakeholder-Workshops abgehalten, mit Teilnehmer/innen aus unterschiedlichen Bereichen, wobei der Schwerpunkt auf dem Sektor Wintertourismus lag. Ein Produkt dieser Workshops war ein Katalog nutzergerechter Indikatoren für die Sektoren Wintertourismus und Wasserkraft, der in iterativen Treffen gemeinsam mit Stakeholdern entwickelt wurde. Die Ergebnisse dieses Prozesses wurde in Kooperation mit dem EU Projekt PROSNOW in einer wissenschaftlichen Publikation veröffentlicht (Abegg et al., 2020).

Neben den eigentlichen Schnee-Szenarien, stellen die Fallstudien, insbesondere die im Bereich Wintertourismus, den Kern des Projekts FuSE-AT dar. Folgende Fallstudien wurden durchgeführt:

A) Skigebiete Obergurgl und Brunnalm-Hohe Veitsch. Diese Studien hatten zum Ziel die vergangenen und zukünftigen Schnee- und Beschneigungs-Verhältnisse in den Skigebieten zu untersuchen und den Verantwortlichen damit Basisinformation für die Planung der langfristigen Ausrichtung ihres Tourismusbetriebes in die Hand zu geben. Die Studien werden hier nur kurz

beschrieben, aber weitaus detaillierte Berichte sind auf der FuSE-AT Homepage (<https://fuse-at.ccca.ac.at/>) zu finden (Koch et al., 2020a; 2020b).

Zwei sehr unterschiedliche Skigebiete wurden untersucht: Obergurgl, als typisches Tiroler Tourismusgebiet im Ötztal mit dem bekannten Skigebiet, welches sich in einer Höhenlage von 1900 m bis 3000 m Seehöhe befindet und großteils nach Norden orientierte Hänge aufweist, die mit modernen Schneemanagementsystemen ausgestattet sind. Tourismus ist die wichtigste Einnahmequelle im Ötztal und lebt zu einem großen Teil von ausländischen Gästen mit längeren Aufenthalten. Im Gegensatz dazu erstreckt sich das Skigebiet Brunnalm/Hohe Veitsch nur über 1050m bis 1400 m Seehöhe und liegt im Osten Österreichs im Mürztal (Steiermark). Alle Hänge liegen unter 1500 m Seehöhe und sind nach Süden ausgerichtet. Das Gebiet ist mit einer kleinen Anzahl von Systemen zur technischen Schneeerzeugung ausgestattet und die meisten Gäste sind Tagesgäste und stammen aus den in der Nähe liegenden Städten und der näheren Umgebung.

Resort-spezifische Informationen bezüglich Schneemanagement und repräsentative Orte in den Skigebieten wurde gemeinsam mit den Ressortbetreibern erhoben und festgelegt und in vereinfachter Form in das Schneemodell SNOWGRID-CL eingebaut. Für diese repräsentativen Punkte in den Skigebieten wurden SNOWGRID-CL Simulationen (1961 – 2100) durchgeführt und Indikatoren berechnet. Die Simulationen der Vergangenheit (bis 2020) beruhen dabei auf meteorologischem Input von SPARTACUS/GPARD1 (gegitterte Beobachtungsdatensätze), die Szenarien (1971 bis 2100) auf regionalen Klimamodellen aus ÖKS15 (den nationalen Österreichischen Klimaszenarien).

Die Ergebnisse zeigen, dass die saisonale Naturschneedecke eine starke Variabilität von Jahr zu Jahr aufweist, welche durch technische Schneeerzeugung stark gedämpft wird. Zusätzlich verlängert technische Beschneigung die Schneesaison deutlich. Die Auswirkungen der technischen Beschneigung auf die Schneedeckendauer sind in allen Höhenbereichen beider Skigebiete sichtbar, aber (relativ betrachtet) besonderes groß in tieferen Lagen und südlicher Exposition. Abbildung 12 demonstriert diese Effekte für zwei kontrastierende Hänge.

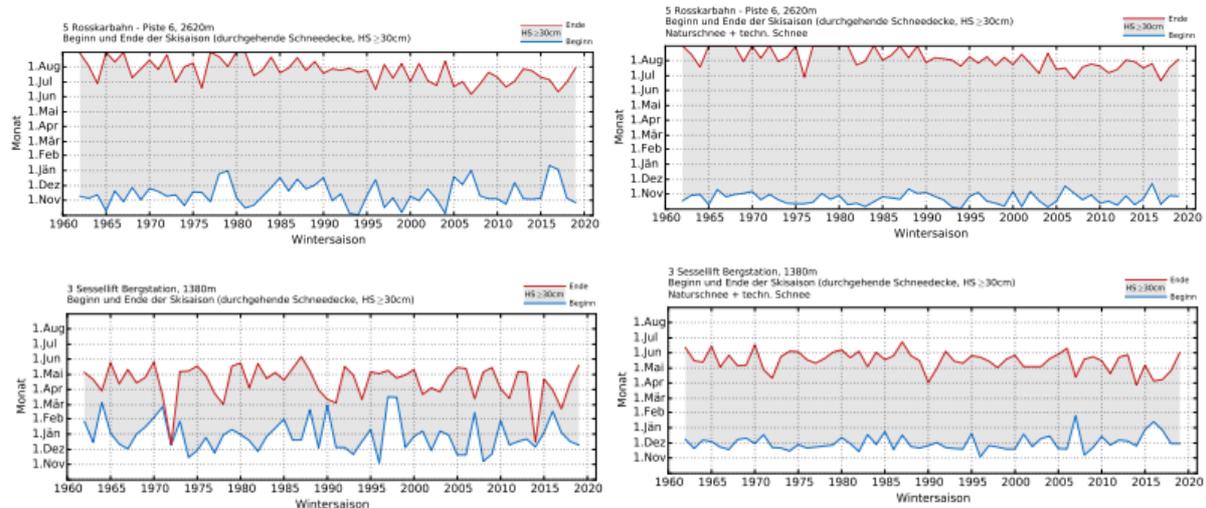


Abbildung 12: Schneedeckendauer (Tage mit SD > 30 cm) (graue Bereiche). Oben: Obergurgl Rosskahrbahn, 2620 m, NW-orientiert, 20° Hangneigung. Unten: Brunnalm/Hohe Veitsch, 1380 m, SE-orientiert, 15° Hangneigung; links: Naturschnee; rechts: Naturschnee und technischer Schnee.

Das Beispiel in Abbildung 13 zeigt, dass die Verkürzung der Schneesaison für Hänge mit technischer Beschneigung über 2500 m Seehöhe selbst unter dem „worst case“ Szenario RCP8.5 relativ gering ausfällt, insbesondere relativ betrachtet. Andererseits erwartet im RCP8.5 Szenario Süd-exponierte Hänge unter 1500 m eine drastische Verkürzung der Schneesaison, selbst wenn technische Schneeerzeugung berücksichtigt wird. Im Szenario RCP2.6 kann die Abnahme selbst in diesen ungünstigen Lagen auf -20% begrenzt werden.

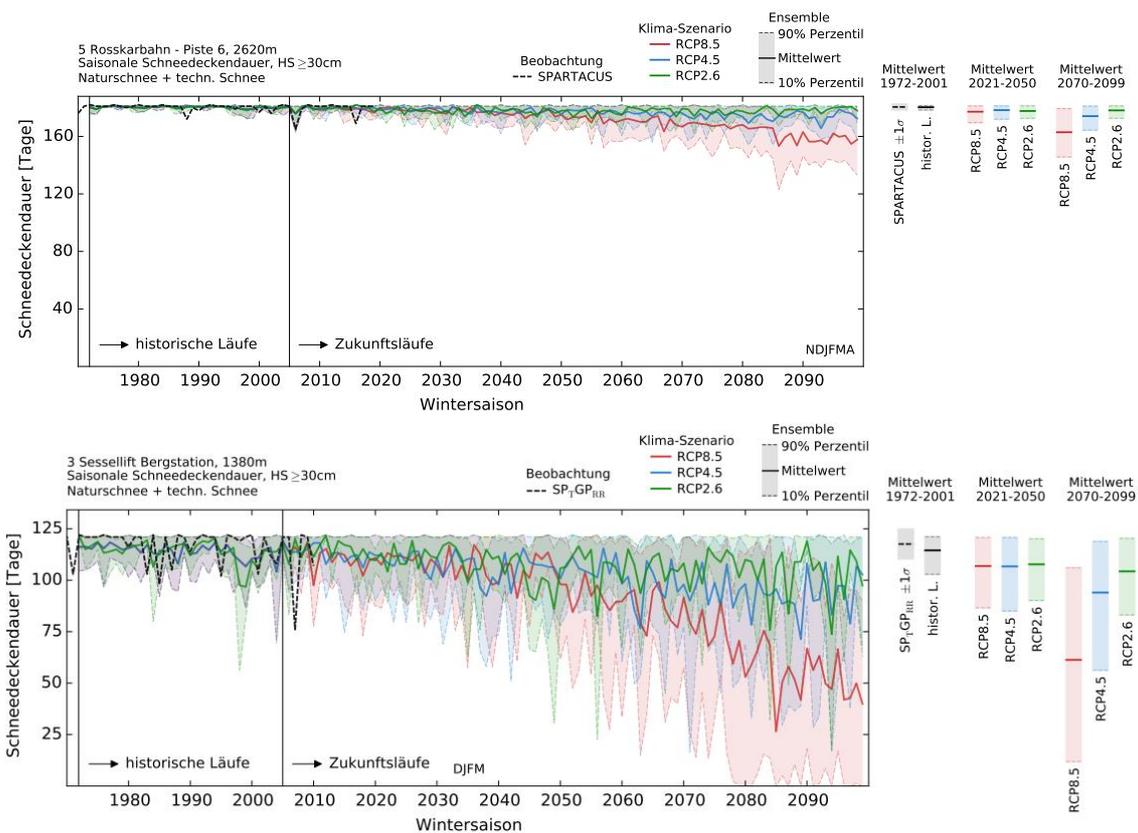


Abbildung 13: Länge der Schneesaison (natürlicher und technischer Schnee) mit $SD > 30$ cm. Die schwarze Linie zeigt die berechnete Länge auf Basis von Beobachtungsdaten. Durchschnittliche Werte für 30-jährige Perioden sind rechts neben der Abbildung als Boxplots dargestellt. Oben: Obergurgl Rosskarbahn, 2620 m, NW-orientiert, 20° Hangneigung. Unten: Brunnalm/Hohe Veitsch, 1380 m, SO-orientiert, 15° Hangneigung.

Zusammenfassend demonstrieren diese Ergebnisse die hohe Sensitivität der Schneesaison-Länge und der Beschneigungsstunden auf zukünftige Treibhausgasemissionen und betont damit die Wichtigkeit des Klimaschutzes für den Wintertourismus. Weiters zeigen die Resultate, dass unterschiedliche Lagen je nach Seehöhe, Exposition und lokalklimatische Effekte sehr unterschiedlich betroffen sein können.

B) Langlaufgebiet Seefeld: Technische Beschneieung im Gebiet Seefeld profitiert sehr stark von den lokalen topografischen Gegebenheiten, die für Kaltluftansammlungen am Talboden sorgen. Solche Temperaturinversionen ermöglichen technische Schneeproduktion, auch wenn es an höher gelegenen Hängen dafür zu warm ist. Die in FuSE-AT verwendeten Beobachtungsdatensätze sind in der Lage solche Effekte darzustellen, zumindest, wenn sie durch Messstationen abgedeckt sind (was in Seefeld der Fall ist). Es konnte gezeigt werden, dass die Intensität und Häufigkeit von Inversionen seit den 1960er Jahren generell abgenommen hat (Haslinger und Schöner, 2019). Nun könnte dieser Trend, gemeinsam mit der generellen Erwärmung die Bedingungen für die technische Schneeerzeugung in Seefeld verschlechtern. Diese Überlegungen waren Motivation eine erste, vereinfachte Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf Basis der FuSE-AT Ergebnisse durchzuführen. Abbildung 15 zeigt die zeitliche Entwicklung der potentiellen Beschneiestunden für unterschiedliche

Szenarien. The Ergebnisse zeigen, dass bereits in der Vergangenheit die Anzahl der potentiellen Beschneistunden um etwa -15% zurückgegangen ist und, dass ein weiterer Rückgang um -40% in den nächsten Jahrzehnten zu erwarten ist.

Diese Resultate zeigen die Notwendigkeit für detailliertere Studien, welche die komplexe mikro-meteorologische Situation in Seefeld besser berücksichtigt. Das hat die Formulierung einer gemeinsamen Projektidee mit den Betreibern des Langlaufgebietes (Tourismusverband Seefeld) stimuliert, um die Nutzung der Kaltluftansammlungen am Talboden besser für das Beschneungsmanagement nutzen zu lernen.

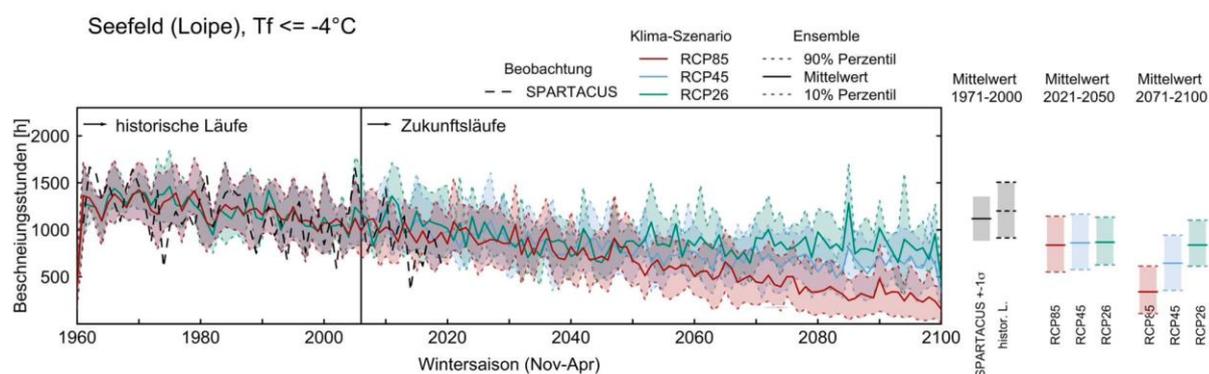


Abbildung 15: Zeitliche Entwicklung der potentiellen Beschneistunden (Feuchtkugeltemperatur < 4°C) in Seefeld. (1200 m Seehöhe).

C) Schnee-Ressourcen für ein Speicherkraftwerk – Beispiel Achensee: Das Gebiet um den Achensee in Tirol, erstreckt sich vertikal vom 800 m bis 2500 m Seehöhe. Der See wird als Speicher für ein Wasserkraftwerk der TIWAG (Tiroler Wasserkraft AG) genutzt. Von Okt. Bis März wird mehr Wasser entnommen, als durch natürliche Quellen erneuert wird. Der Verlust wird üblicher Weise im Juni unter anderem durch die Schneeschmelze wieder aufgefüllt. Schneehydrologie und ihre Saisonalität spielen also eine wichtige Rolle für den effizienten Betrieb des Kraftwerks.

Folgende Indikatoren von FuSE-AT wurden in dieser Studie verwendet: SWE am 1. April, maximale SWE pro Jahr, Anzahl der Schneetage (SWE > 10 mm) zwischen Dez. und Feb. und die Anzahl der Schneetage (SWE > 10 mm) von Nov. bis Mai. Statistiken dieser Indikatoren für vier Untergebiete für die Perioden 1971 – 2000, 2021 – 2050 und 2071 – 2100 und für die Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 wurden berechnet.

Abbildung 16 zeigt die räumliche Verteilung von SWE am 1. April in den drei Perioden für RCP2.6 (oben) und RCP8.5 (unten). Aufgrund der Höhenlage sind in RCP2.6 nur kleinere Abnahmen festzustellen, für RCP8.5 liegen die Abnahmen jedoch bei etwa -40%.

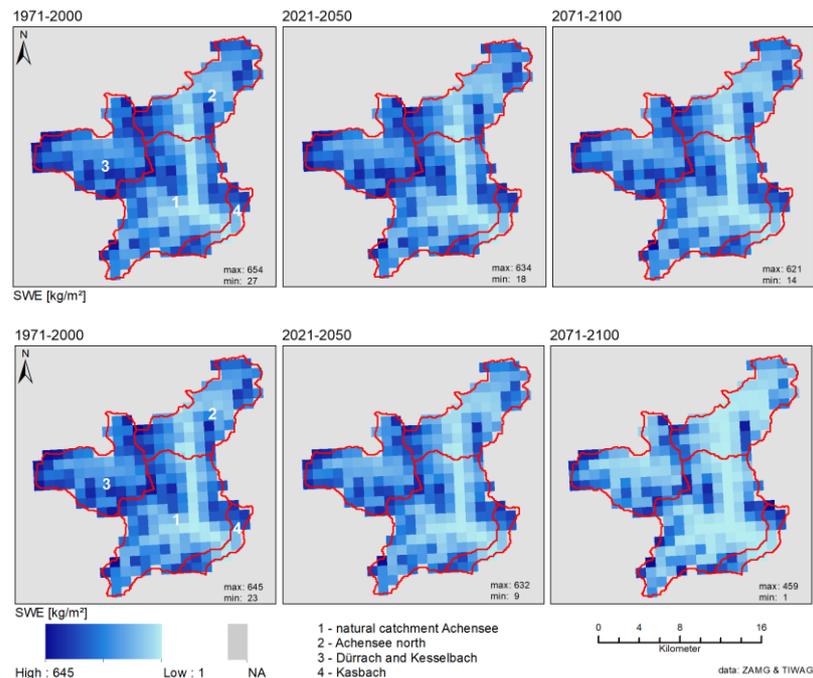


Abbildung 16: Ensemble-Mittelwert des SWE am 1. April für drei Perioden und RCP2.6 (oben) und RCP8.5 (unten).

Abbildung 17 zeigt den räumlichen Mittelwert von SWE am 1. April für Sub-Einzugsgebiet C1 und zeigt Abnahmen um bis zu -70% in RCP8.5. Weitere Indikatoren sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Klimawandel eine deutliche Auswirkung auf die Schneehydrologie in der Region Achensee hat. Die erwarteten Änderungen sind bis 2050 vergleichsweise klein, beschleunigen sich aber in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts im Fall von RCP8.5. Tiefer liegende Teile des Einzugsgebietes sind stärker betroffen als höher liegende Teile. Im schlimmsten Fall wird eine Abnahme des im Schnee gespeicherten Wassers um bis zu -70% erwartet. Unvermeidbar scheint zumindest eine Abnahme von -20% zu sein (RCP2.6).

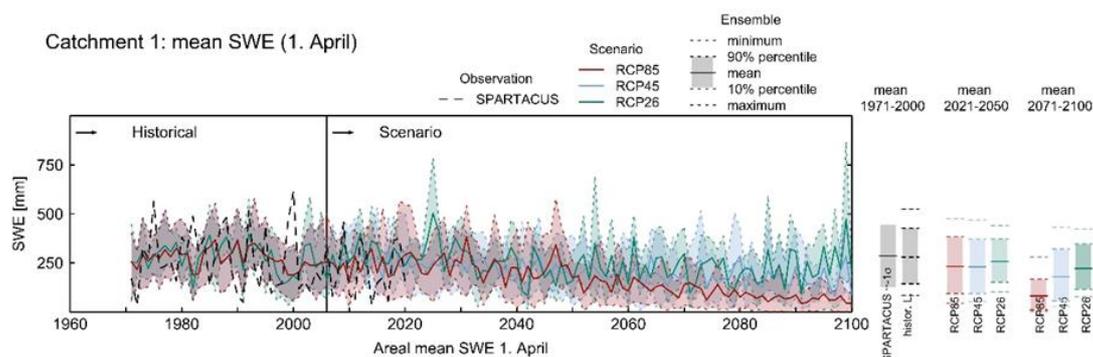


Abbildung 17: Räumliches Mittel des SWE am 1. April in Sub-Einzugsgebiet C1 (Achensee).

Tabelle 3: Übersicht über die für die Studie relevanten Indikatoren des Klimawandels in der Region Achensee.

| | Indicator | 1971 – 2000 | | 2021 – 2050 | | | 2071 – 2100 | | |
|-----|--|-------------|-----|-------------|---------|---------|-------------|---------|---------|
| | | Obs. | RCM | RCP 2.6 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 2.6 | RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| C1 | SWE April 1 (mm) | 285 | 279 | 257 | 229 | 232 | 221 | 179 | 81 |
| | Water storage snow, April 1 (10 ⁶ m ³) | 30 | 29 | 27 | 24 | 24 | 23 | 19 | 9 |
| | SWE yearly max. (mm) | 368 | 358 | 346 | 316 | 325 | 322 | 280 | 171 |
| | Water storage snow, yearly max. (10 ⁶ m ³) | 39 | 38 | 36 | 33 | 34 | 34 | 29 | 18 |
| | Snow days, Dec-Feb (nr. of days) | 88 | 88 | 84 | 86 | 86 | 83 | 82 | 70 |
| | Snow days, Nov-May (nr. of days) | 197 | 196 | 186 | 190 | 187 | 184 | 175 | 138 |
| C2 | SWE April 1 (mm) | 241 | 286 | 224 | 261 | 167 | 220 | 227 | 65 |
| | Water storage snow, April 1 (10 ⁶ m ³) | 15 | 18 | 14 | 16 | 11 | 14 | 14 | 4 |
| | SWE yearly max. (mm) | 330 | 377 | 362 | 328 | 335 | 339 | 282 | 166 |
| | Water storage snow, yearly max. (10 ⁶ m ³) | 21 | 24 | 23 | 21 | 21 | 21 | 18 | 10 |
| | Snow days, Dec-Feb (nr. of days) | 87 | 87 | 84 | 85 | 85 | 83 | 80 | 67 |
| | Snow days, Nov-May (nr. of days) | 192 | 193 | 181 | 185 | 182 | 180 | 167 | 125 |
| C3 | SWE April 1 (mm) | 355 | 401 | 367 | 330 | 334 | 321 | 256 | 110 |
| | Water storage snow, April 1 (10 ⁶ m ³) | 22 | 25 | 23 | 20 | 21 | 20 | 16 | 7 |
| | SWE yearly max. (mm) | 433 | 481 | 462 | 427 | 434 | 430 | 371 | 221 |
| | Water storage snow, yearly max. (10 ⁶ m ³) | 27 | 30 | 29 | 26 | 27 | 27 | 23 | 14 |
| | Snow days, Dec-Feb (nr. of days) | 88 | 88 | 85 | 87 | 86 | 84 | 83 | 71 |
| | Snow days, Nov-May (nr. of days) | 196 | 197 | 186 | 190 | 188 | 185 | 175 | 134 |
| C4 | SWE April 1 (mm) | 359 | 333 | 318 | 292 | 294 | 281 | 239 | 129 |
| | Water storage snow, April 1 (10 ⁶ m ³) | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 |
| | SWE yearly max. (mm) | 431 | 396 | 390 | 362 | 370 | 363 | 325 | 209 |
| | Water storage snow, yearly max. (10 ⁶ m ³) | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 5 | 5 | 3 |
| | Snow days, Dec-Feb (nr. of days) | 88 | 88 | 85 | 87 | 87 | 85 | 83 | 73 |
| | Snow days, Nov-May (nr. of days) | 200 | 199 | 190 | 194 | 192 | 190 | 183 | 154 |
| all | Water storage snow, April 1, (10 ⁶ m ³) | 72 | 77 | 69 | 64 | 60 | 61 | 53 | 22 |
| | Water storage snow, yearly max., (10 ⁶ m ³) | 93 | 98 | 94 | 85 | 88 | 87 | 75 | 45 |

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die FuSE-AT Ergebnisse zeigen, dass die Auswirkungen des Klimawandels auf die Schneebedingungen in Österreich deutlich ausfallen. Das zeigt sich sowohl anhand von Daten der Vergangenheit, als auch anhand von Zukunfts-Szenarien. Insbesondere wird durch Vergleich eines optimistischen Szenarios („unvermeidbarer Klimawandel“, RCP2.6) mit einem pessimistischen Szenario („der fossile Weg“, RCP8.5) die Wichtigkeit von Klimaschutzbemühungen in den kommenden Jahrzehnten für die Schneeverhältnisse und den Wintertourismus in Österreich demonstriert: Einerseits ist die Stabilisierung der Schneeverhältnisse ab etwa 2050 auf einem Niveau, dass für viele betroffene Bereiche noch handhabbar ist, möglich (RCP2.6), andererseits führt ungebremster Klimawandel langfristig zu Verhältnissen, bei denen Schnee in tiefen und mittleren Lagen

Österreichs zu Seltenheit wird und auch die meteorologischen Bedingungen für technische Beschneigung sich deutlich verschlechtern. Ausnahmen bilden dabei nur hochalpine Bereiche über etwa 2000m Seehöhe.

Beispielsweise kann die Verkürzung der Naturschnee-Saison (Anzahl der Tage mit mehr als 10 cm Schneehöhe) auf -20% (über 1000 m Seehöhe) bis 40% (unter 1000 m Seehöhe) begrenzt werden, wobei diese Zahlen auf dem Szenario RCP2.6 beruhen und wohl als unvermeidbarer Klimawandel angesehen werden müssen. Andererseits würde ein „worst case“ Szenario (RCP8.5) in tiefen Lagen zu einer Reduktion von -90%, um 1000 m Seehöhe -70% und nur in sehr hohen Lagen über 2000 m unter -50% bleiben.

Zieht man technischen Schnee in Betracht, sind die Verluste durch den Klimawandel etwas geringer: Z.B. kann die Reduktion der möglichen Beschneigungszeit um etwa 1500 m Seehöhe in RCP2.6 auf -20%, über 2000 m sogar auf -5% begrenzt werden. RCP8.5 würde allerdings bis 2100 zu weiterer Reduktion führen: -60% (1500 m), bzw. -35% (über 2000m).

Entsprechend ist die Auswirkung des Klimawandels auf Naturschnee und technische Beschneigung in Österreich nicht nur sehr stark von Seehöhe, Exposition und lokalklimatischen Verhältnissen, sondern auch von den weltweiten Klimaschutzbemühungen in den kommenden Jahren und Jahrzehnten abhängig.

FuSE-AT Ergebnisse sind vorrausichtlich von großem Nutzen für die Klimawandel-Impakt-Forschungsgemeinschaft, insbesondere in den Bereichen Hydrologie, Landwirtschaft, Energiewirtschaft, Ökologie und Tourismusforschung. Weiter sind private und öffentliche Klimawandeldienstleister („Climate Services“) wichtige Zielgruppen für FuSE-AT Ergebnisse, um die Datensätze in nutzbringende Information für viele wirtschaftliche Sektoren und regionale Entscheidungsträger umzuwandeln und ihnen damit eine verbesserte Wissensbasis für langfristige Klimawandelanpassungsstrategien in die Hand zu geben.

Die Projektpartner selbst werden dafür Sorge tragen, dass die in FuSE-AT entwickelten Methoden und Datensätze nicht nur in der Forschungsgemeinschaft weitere Verwendung finden und Climate Services daraus generiert werden, sondern dass auch Schnee-Variablen zum Standard-Output bei der Erzeugung der nächsten Generation von nationale Klimaszenarien für Österreich gehören werden.

C) Projektdetails

6 Methodik

Der Forschungsansatz und die Methodik sind in Abschnitt 4, gemeinsam mit den Projektergebnissen begründet und beschrieben.

7 Arbeits- und Zeitplan

| | 2018 | | | | | | | | | | | | 2019 | | | | | | | | | | | | 2020 | | | | | | | | | | | | 2021 | | | | | |
|---|-----------|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|------|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|------|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|------|---|---|---|---|---|
| Project month | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Calendar month | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | | |
| WP1 - MODELS | Extension | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Task 1.1 Model development | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | |
| Task 1.2 Model evaluation | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | |
| Task 1.3 Production of snow scenarios | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | |
| WP2 - SCENARIOS | █ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Task 2.1 Ensemble construction | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | |
| Task 2.2 Synthesis analysis | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | |
| Task 2.3 User tailored indicators | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | |
| WP3 - KNOWLEDGE | █ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Task 3.1 Stakeholder workshops | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | |
| Task 3.2 Climate change indicator catalogue | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | |
| Task 3.3 Case studies | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | |
| WP4 - MANAGE | █ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Task 4.1 Reporting & communic. | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | |
| Task 4.2 Project progress supervision | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | |
| Task 4.3 project web-site and corp. design | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | |
| Task 4.5 Dissemination | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | | | | | | | | █ | | | | | |

Abb. 20: Übersicht über den Arbeits- und Zeitplan von FuSE-AT. Abweichungen vom ursprünglichen Plan laut Antrag sind mit fetten, schwarzen Rahmen markiert.

Abbildung 20 zeigt den Arbeits- und Zeitplan von FuSE-AT. Das Projekt gliederte sich in 4 Arbeitspakete (WP):

WP1 Schneemodellierung: Anpassung und Evaluierung des numerischen Schneemodells SNOWGRID für Klimasimulationen (SNOWGRID-CL).

WP2 Schnee Szenarien und ihre Zuverlässigkeit: Der gesamte ÖKS15 Datensatz (RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5; van Vuuren et al., 2011) und gegitterte Beobachtungsdatensätze wurden als meteorologischer Antrieb für SNOWGRID-CL verwendet um ein umfassendes und ausbalanciertes Ensemble von Schneeszenarien für Österreich zu erzeugen. Die Ergebnisse wurden analysiert und ihre Zuverlässigkeit bewertet.

WP3 Nutzer-Integration: Co-Design und Durchführung von Fallstudien aus den Bereichen Winter Tourismus, Wasserkraft und Wasserversorgung, gemeinsam mit Betroffenen.

WP4 Management: Finanzielles Projektmanagement, Reporting, Fortschrittsüberwachung, Kommunikation mit dem Fördergeber und dem

wissenschaftlichen Beratungsgremium, Unterstützung des Stakeholder-Prozesses, Disseminierung, Datenmanagement und open Access-Strategie.

8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Wissenschaftliche Artikel – Peer Review (2 veröffentlicht, 1 eingereicht, 1 in Vorbereitung)

- Abegg, B., Morin, S., Demiroglu, O. C., François, H., Rothleitner, M., & Strasser, U. (2021). Overloaded! Critical revision and a new conceptual approach for snow indicators in ski tourism. *International Journal of Biometeorology*, 65(5), 691–701. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01867-3>
- Gobiet, A., Abegg, B., Koch, R., Olefs, M., Seitner, V., Strasser, U., & Warscher, M. (in preparation, to be submitted 2022). The future of natural and technical snow in Austria. *Climate*.
- Kotlarski, S., Gobiet, A., Morin, S., Olefs, M., Rajczak, J., & Samacoits, R. (submitted). 21st Century Alpine Climate Change. *Climate Dynamics*.
- 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*, 11(12), 1330. <https://doi.org/10.3390/atmos11121330>.

Berichte

- Koch, R., Gobiet, A., & Olefs, M. (2020a). *Studie zur vergangenen und zukünftigen Schneedeckenentwicklung im Brunnalm—Hohe Veitsch* (S. 86). ZAMG. https://fuse-at.ccca.ac.at/wp-content/uploads/2021/02/fuse_veitsch_001_20201001.pdf
- Koch, R., Gobiet, A., & Olefs, M. (2020b). *Studie zur vergangenen und zukünftigen Schneedeckenentwicklung im Skigebiet Obergurgl* (S. 112). https://fuse-at.ccca.ac.at/wp-content/uploads/2021/02/fuse_obergurgl_001_20201001.pdf

Datensätze

FuSE-AT veröffentlichte 251 zitierbare Datensätze im CCCA Datenzentrum (<https://data.ccca.ac.at/>). Eine vollständige Liste würde den Rahmen sprengen. Hier sind nur drei beispielhafte Datensätze zur Demonstration gelistet.

- Koch et al. (2021). FuSE-AT Daily snowmaking hours: SMH_spartacus, Version 1. Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: <https://hdl.handle.net/20.500.11756/4e6a95ef>. [January 3, 2022]
- Koch et al. (2021). FuSE-AT Daily total surface snow depth: HS_SNOWGRID-CL_SDM_MPI-M_MPI-ESM-LR_r1i1p1_rcp85_MPI-CSC_REMO2009, Version 1. Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: <https://hdl.handle.net/20.500.11756/bfd4bbe6>. [January 3, 2022]
- Koch et al. (2021). FuSE-AT Surface runoff of current timestep resulting from snowmelt and rain: runoff_SNOWGRID-CL_SDM_ICHEC_EC-EARTH_r1i1p1_rcp45_KNMI_RACMO22E, Version 1. Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: <https://hdl.handle.net/20.500.11756/0f7ef1f8>. [January 3, 2022]

Artikel in Anwender-Fachzeitschriften, Newsletter

Roth, R., Becker, A., Ebner, P., Fischer, A., Helfricht, K., Koch, R., Kotlarski, S., Kunstmann, H., Lehning, M., Mühlbacher, G., Olefs, M., Rhyner, H., Rothleitner, M., Schmid, H.-P.,

Siller, H., Strasser, U., Warscher, M. and Ziegahn, K.-F. (2018) Gemeinsames Positionspapier Expertenforum 2018, FdSnow: Fachzeitschrift für den Skisport, ISSN 1864-5593, Sporthochschule Köln, 53, 6-7, Köln.

Umweltbundesamt (2021) FuSE-AT erforscht Schneetrends, Newsletter Klimawandelanpassung 46, <https://www.klimawandelanpassung.at/newsletter/kwa-nl-fuseat>

Konferenzbeiträge

- A. Gobiet, Koch, R., Olefs, M., Strasser, U. and Seitner, V. (2020) Die Zukunft des Schnees in Österreich: Erste Ergebnisse des Projekts FuSE-AT, abstracts of the 21. Österreichischer Klimatag, Leoben, Austria.
- A. Gobiet, Abbeg, B., Koch, R., Olefs, M., Seitner, V., Strasser, U., Warscher, M. (2022) Szenarien zukünftiger Entwicklung des natürlichen und technischen Schnees in Österreich, submitted for oral presentation to 22. Österreichischer Klimatag, 22.-24.4.2022, Vienna, Austria.
- A. Gobiet, Abbeg, B., Koch, R., Olefs, M., Seitner, V., Strasser, U., Warscher, M. (2022) Die Zukunft des natürlichen und technischen Schnees in Österreich, accepted as oral presentation at D-A-CH MeteorologieTagung, 21.-25.3.2022, Leipzig, Germany.
- A. Gobiet, Abbeg, B., Koch, R., Olefs, M., Seitner, V., Strasser, U., Warscher, M. (2022) Future perspectives of natural and technical snow in Austria, submitted for oral presentation to EGU general assembly, 3.4.-8.4.2022, Vienna, Austria.

Disseminierungs-Material

- A. Gobiet, Olefs, M., Koch, R., Seitner, V., Strasser, U., Abegg, B., Wolf, A., Rothleitner, M. (2021) Schneetrends in Österreich: Schnee bleibt immer kürzer liegen, CCCA Fact Sheet # 33 | 2021, <https://ccca.ac.at/wissenstransfer/fact-sheets>
- S. Tschürtz, Wolf, A., Gobiet, A. (2021) Schnee in Österreich, interactive infographic, <https://fuse-at.ccca.ac.at/infografik/>
- S. Tschürtz, Wolf, A., Gobiet, A. (2021) Schnee in Österreich, 3 print-out infographics, https://fuse-at.ccca.ac.at/wp-content/uploads/2021/09/1_Schnee_Vergangenheit_final.pdf, https://fuse-at.ccca.ac.at/wp-content/uploads/2021/09/2_Schnee_derunvermeidlicheKlimawandel_final.pdf, https://fuse-at.ccca.ac.at/wp-content/uploads/2021/09/3_Schnee_derfossileWeg_final.pdf.

Weitere Disseminierungsaktivitäten

Presseaussendung, März 2021: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/die-zukunft-des-schnees-in-oesterreich>

Presseaussendung im Februar 2022: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/schnee-im-klimawandel>.

Blog der Scientists for Future, November 2021: <https://at.scientists4future.org/2021/11/25/ade-schnee/>.

Zahlreiche Social-Media Artikel aus den Kanälen der ZAMG, CCCA und Schneezentrum Tirol (Facebook, Twitter).

Literaturverzeichnis

- Abegg, B., Morin, S., Demiroglu, O. C., François, H., Rothleitner, M., & Strasser, U. (2021). Overloaded! Critical revision and a new conceptual approach for snow indicators in ski tourism. *International Journal of Biometeorology*, 65(5), 691–701. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01867-3>
- 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., & Truhetz, H. (2016). ÖKS15—Klimaszenarien für Österreich. Daten, Methoden und Klimaanalyse [Project Report]. ZAMG.
- Chimani, B., Matulla, C., Eitzinger, J., Hiebl, J., Hofstätter, M., Kubu, G., Maraun, D., Mendlik, T., Schellander-Gorgas, T., & Thaler, S. (2019). GUIDELINE zur Nutzung der ÖKS15-Klimawandelsimulationen sowie der entsprechenden gegitterten Beobachtungsdatensätze. Climate Change Centre Austria. <https://ccca.ac.at/wissenstransfer/starc-impact-guideline>.
- Chimani, B., Matulla, C., Hiebl, J., Schellander-Gorgas, T., Maraun, D., Mendlik, T., Eitzinger, J., Kubu, G., & Thaler, S. (2020). Compilation of a guideline providing comprehensive information on freely available climate change data and facilitating their efficient retrieval. *Climate Services*, 19, 100179. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2020.100179>
- Hiebl, J., & Schöner, W. (2018). Temperature inversions in Austria in a warming climate – changes in space and time. *Meteorologische Zeitschrift*, 27(4), 309–323. <https://doi.org/10.1127/metz/2018/0899>
- Hofstätter, M., Jacobeit, J., Homann, M., Lexer, A., Chimani, B., Philipp, A., Beck, C., & Ganekind, M. (2015). WETRAX WEather Patterns, CycloneTRAcKS and related precipitation Extremes. Großflächige Starkniederschlagsereignisse im Klimawandel in Mitteleuropa (Projektbericht Nr. 19; Geographica Augustiana). Universität Augsburg. https://www.zamg.ac.at/cms/de/dokumente/klima/dok_projekte/wetrax/endbericht
- Koch, R., Gobiet, A., & Olefs, M. (2020a). Studie zur vergangenen und zukünftigen Schneedeckenentwicklung im Brunnalm—Hohe Veitsch. ZAMG (S. 89). <https://fuse-at.ccca.ac.at/3-bereiche/>
- Koch, R., Gobiet, A., & Olefs, M. (2020b). Studie zur vergangenen und zukünftigen Schneedeckenentwicklung im Skigebiet Obergurgl (S. 112). <https://fuse-at.ccca.ac.at/3-bereiche/>
- Kotlarski, S., Gobiet, A., Morin, S., Olefs, M., Rajczak, J., & Samacoits, R. (submitted). 21st Century Alpine Climate Change. *Climate Dynamics*.
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., & Stoffel, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps—A review. *Science of the Total Environment*, 493, 1138–1151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>
- Gobiet, A., & Kotlarski, S. (2020). Future Climate Change in the European Alps. In A. Gobiet & S. Kotlarski, *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.767>
- ZAMG. (2021, August 9). Klimafakten Österreich kompakt. ZAMG Klima News. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/klimafakten-oesterreich-kompakt>
- Hiebl, J., & Frei, C. (2016). Daily temperature grids for Austria since 1961—Concept, creation and applicability. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(1–2), 161–178. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1411-4>
- Hiebl, J., & Frei, C. (2018). Daily precipitation grids for Austria since 1961—Development and evaluation of a spatial dataset for hydroclimatic monitoring and modelling. *Theoretical and Applied Climatology*, 132(1–2), 327–345. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2093-x>
- Hofstätter, M. (2008). Methoden zur Berechnung von Beschneigungszeiten [Master Thesis]. University of Vienna.

- Olefs, M., Schöner, W., Suklitsch, M., Wittmann, C., Niedermoser, B., Neururer, A., & Wurzer, A. (2013). SNOWGRID – A New Operational Snow Cover Model in Austria. Proc. International Snow Science Workshop Grenoble – Chamonix Mont-Blanc - October 07-11, 2013, 038–045.
- 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*, 11(12), 1330. <https://doi.org/10.3390/atmos11121330>
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1–2), 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin/der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwertungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechteinhaberschaft am Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin/der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.