



Forschungsreihe:

Auswirkungen des Klimawandels auf Oberösterreich

Entwicklung der natürlichen Schneedecke in der Pyhrn-Priel Region in Oberösterreich (Snowclim-PP)

Im Auftrag von

Umweltlandesrat Stefan Kaineder

November 2020



Universität für Bodenkultur Wien
Department Wasser-Atmosphäre-Umwelt
Institut für Meteorologie
und Klimatologie (BOKU-Met)

Institut für Meteorologie und Klimatologie (BOKU-Met)

Department Wasser-Atmosphäre-Umwelt

Universität für Bodenkultur Wien

Gregor-Mendel-Straße 33

A-1180 Wien, Österreich

Projektleiter:

Assoc. Prof-Prof. Dr. Herbert Formayer

E-Mail: herbert.formayer@boku.ac.at, Tel: +43 1 47654-81415, Fax 47654-81410

Projektmitarbeiter:

Fabian Lehner MSc

E-Mail: fabian.lehner@boku.ac.at, Tel: +43 1 47654-81441, Fax 54654-81410

<https://boku.ac.at/wau/met/forschungsthemen/klima-und-klimafolgen/>

Projektpartner:

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG)

Abteilung Klimaforschung

Hohe Warte 38

1190 Wien

Projektmitarbeiter:

Mag. Dr. Marc Olefs

E-Mail: marc.olefs@zamg.ac.at, Tel: +43 1 36026 2233

Mag. Roland Koch

E-Mail: roland.koch@zamg.ac.at, Tel: +43 1 36026 2218

Entwicklung der natürlichen Schneedecke in der Pyhrn-Priel Region in Oberösterreich (Snowclim-PP)

Autoren:

Herbert Formayer¹, Fabian Lehner¹, Marc Olefs², Roland Koch²

¹ Institut für Meteorologie und Klimatologie, Universität für Bodenkultur, Wien

² Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

Dieser Bericht soll folgendermaßen zitiert werden:

Formayer, H., Lehner, F., Olefs, M., Koch, R. (2020). Entwicklung der natürlichen Schneedecke in der Pyhrn-Priel Region in Oberösterreich (Snowclim-PP). Forschungsbericht im Auftrage des Landes Oberösterreich.

Im Auftrag von Umweltlandesrat Stefan Kaineder

Wien im November 2020

Inhaltsverzeichnis

Inhalt

INHALTSVERZEICHNIS.....	4
1. KERNAUSSAGEN.....	5
2. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	6
1. DATENMATERIAL UND METHODEN.....	7
ANALYSEREGION	7
BEOBACHTUNGSDATEN.....	8
AUSWERTEVERFAHREN	9
2. AUSWERTEERGEBNISSE.....	10
TEMPERATUR	10
SCHNEEDECKE.....	12
<i>Geschlossene Schneedecke (Schnee ≥ 5 cm).....</i>	<i>12</i>
<i>Schneedecke ≥ 30cm.....</i>	<i>14</i>
<i>Variabilität der Schneedecke von Jahr zu Jahr.....</i>	<i>18</i>
ABHÄNGIGKEIT DER SCHNEEDECKE VON DER TEMPERATUR UND NIEDERSCHLAG	21
ANTEIL DES SCHNEES AM GESAMTNIEDERSCHLAG	23
3. INTERPRETATION UND ZUSAMMENFASSUNG.....	24
TEMPERATUR	24
GESCHLOSSENE SCHNEEDECKE (SCHNEEDECKE ≥ 5 CM)	24
<i>Schneedecke geeignet für sportliche Aktivitäten (Schneedecke ≥ 30cm)</i>	<i>24</i>
VARIABILITÄT DER SCHNEEDECKE.....	24
KORRELATION SCHNEEDECKE MIT TEMPERATUR UND NIEDERSCHLAG	25
ANTEIL DES SCHNEES AM GESAMTNIEDERSCHLAG	25
BEDEUTUNG FÜR DEN WINTERTOURISMUS.....	25
ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG	26
4. LITERATURVERZEICHNIS.....	27
5. ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS	27

1. Kernaussagen

- Die Temperatur ist in der Pyhrn - Priel Region im Winterhalbjahr verglichen mit der Periode 1961-1990 um rund 1,2 °C gestiegen. Die Erwärmung erfolgte aber nicht gleichmäßig, sondern war im Jänner und im April besonders ausgeprägt.
- In den Tallagen hat sich der Zeitraum in dem die Mitteltemperatur unter Null Grad liegt im selben Zeitraum um 4 Wochen verkürzt.
- Die Tage mit einer geschlossenen natürlichen Schneedecke haben in Lagen unter 1750 m signifikant abgenommen. Die Abnahme ist in den Tallagen am stärksten und beträgt etwa 2 Wochen. Hier hat nun nur mehr etwa die Hälfte aller Wintertage eine geschlossene Schneedecke. In der Periode 1961-1991 hatten dies noch 2/3 aller Tage.
- Auch die Anzahl an Tagen mit zumindest 30 cm Schnee haben in Lagen unter 2000 m abgenommen. In den Tallagen haben sie sich faktisch halbiert und nicht einmal mehr in 3 Wochen im Winter wird dieser Schwellwert erreicht. Selbst in 1000 m Seehöhe haben diese um knapp 2 Wochen abgenommen und nur etwas mehr als die Hälfte aller Wintertage erreicht noch diese natürliche Schneehöhe.
- Durch die Erwärmung der letzten Dekaden hat sich die Variabilität der geschlossenen Schneedecke erhöht. Dies gilt besonders für Höhenlagen zwischen 750 und 1500 m.
- Der Anteil des Schnees am Gesamtniederschlag hat im Winter in den letzten Jahrzehnten in allen Höhenlagen und allen Monaten des Winterhalbjahres mit Ausnahme von Höhenlagen über 1500 m im Dezember abgenommen.
- Der Rückgang einer geschlossenen Schneedecke reduziert in den Tallagen die Tage mit einem winterlichen Erscheinungsbild. Dies besonders in der Adventzeit und während der Weihnachtsferien. Dadurch werden Aktivitäten wie Pferdekutschenfahrten, Winter- und Schneeschuhwandern sowie die Anreisen zu Adventmärkten in die Region weniger attraktiv.
- Der Rückgang einer Schneedecke von zumindest 30 cm ist besonders in Lagen um 1000 m Seehöhe problematisch, da hier Schitourengeher und Variantenfahrer besonders betroffen sind, wenn Abfahrten nicht mehr bis ins Tal möglich sind und längere Fußmärsche in Kauf genommen werden müssen.
- Durch das Sinken des Schneeanteils am Gesamtniederschlag muss man nun in der Region auch im Winterhalbjahr häufiger mit Regen rechnen. Dies besonders im Frühwinter, also auch im Advent. Bei Regen sinkt natürlich die Attraktivität von Freiluftaktivitäten.
- Die hier beschriebene Veränderung wurde durch eine mittlere Erwärmung von 1.2 °C verursacht. Dies ist in etwa die gleiche Erwärmung die wir bis zur Mitte des Jahrhunderts nicht mehr verhindern können. Man muss dabei von ähnlich starken Auswirkungen auf die Schneedecke ausgehen, welche sich am stärksten in Lagen zwischen 1000 und 1500 m Seehöhe auswirken werden.

- Aufgrund des Einsatzes von technischer Beschneigung stellen sich die Verhältnisse innerhalb bewirtschafteter Pistenflächen von Skigebieten anders dar. Hier sind spezifische Studien notwendig.

2. Einleitung und Zielsetzung

Der Klimawandel hat sich in den letzten Jahren immer deutlicher bemerkbar gemacht. Hierbei lag die öffentliche Aufmerksamkeit vor allem auf den heißen und trockenen Sommern und den damit verbundenen Auswirkungen auf die Land- und Forstwirtschaft, aber auch die Verhältnisse im Winterhalbjahr verändern sich sukzessive. Hierbei kommt der Ausprägung einer Schneedecke eine besondere Rolle zu. Nicht unbedingt nur für Skigebiete – hier kann mit technischer Beschneigung meist eine Schneedecke auf den Skipisten während des Winters sichergestellt werden.

Die Tourismusregion Pyhrn-Priel liegt südlich des oberösterreichischen Zentralraumes und erstreckt sich vom Alpenvorland bis zu den Gipfeln der nördlichen Kalkalpen an der Grenze zur Steiermark.

Diese gebirgige Region ist im Sommer ein beliebtes Ausflugs- und Wandergebiet, aber touristisch bedeutender ist die Wintersaison. Durch die Nähe zum dicht besiedelten oberösterreichischen Zentralraum und die rasche Anbindung dorthin über die Autobahn A9 wird diese Region sehr stark von Tages- und Wochenendbesucher genutzt.

Mit Hinterstoder-Höss und der Wurzeralp nahe Spital am Pyhrn, liegen zwei stark frequentierte Skigebiete in dieser Region. Die Region setzt aber auch verstärkt auf touristische Aktivitäten abseits des Pistenschifahrens. In den letzten Jahren sind Winterwandern, Schneeschuhwandern sowie Skitouren bei sportlichen Besuchern immer beliebter geworden, aber auch gemütlichere Aktivitäten wie der Besuch von Adventmärkten oder Pferdeschlittenfahrten haben stark zugenommen. All diese Aktivitäten hängen aber direkt von einer natürlichen Schneedecke ab, da sie ohne diese massiv an Attraktivität verlieren, oder gar nicht durchführbar sind.

Im Rahmen des Projektes Snowclim-PP wird die zeitliche und räumliche Entwicklung der natürlichen Schneedecke in der Pyhrn-Priel Region untersucht. Diese Region ist eines der Zentren des Wintertourismus in Oberösterreich und das Vorhandensein einer natürlichen Schneedecke und dem damit verbundenen winterlichen Landschaftsbild ist ein wesentlicher Faktor bezüglich der Attraktivität dieser Region im Winter

Ziel dieser Untersuchungen ist eine Darstellung der klimatischen Verfügbarkeit von einer natürlichen geschlossenen Schneedecke, sowie den Aufbau einer Schneedecke in der saisonalen Entwicklung, also vom Frühwinter (November, Dezember) bis ins Frühjahr (März, April) für das aktuelle Klima – die letzten 30 Jahre - darzustellen. Hierbei werden nicht nur die mittleren Verhältnisse für verschiedenen Höhenstufen analysiert, sondern auch die Schwankungen zwischen den einzelnen Jahren dargestellt. Darüber hinaus wird die langfristige Entwicklung seit 1961 hinsichtlich Trends und dekadischer Schwankungen untersucht. Dadurch kann objektiv und quantitativ dargestellt werden, welche Auswirkungen der anthropogene Klimawandel der letzten Jahrzehnte, auf die natürliche Schneedecke in der Pyhrn-Priel Region hatte.

1. Datenmaterial und Methoden

Analyseregion

In Abbildung 1 ist eine Karte der Analyseregion dargestellt. Man erkennt den stark gebirgigen Charakter der Region mit einer Seehöhenerstreckung von rund 500 m Seehöhe in den Tallagen bis über 2400 m am Großen Priel. Die Legende der Karte orientiert sich an den Seehöhenstufen für die Auswertung der Schneedaten, welche in 250 m Schritten erfolgt. Die Seehöhenstufe 750 m reicht daher von der Seehöhe 625 m bis 875 m. Alle Rasterzellen, welche in diesen Seehöhenbereich fallen, werden gemittelt und dieser Seehöhenstufe zugeordnet.

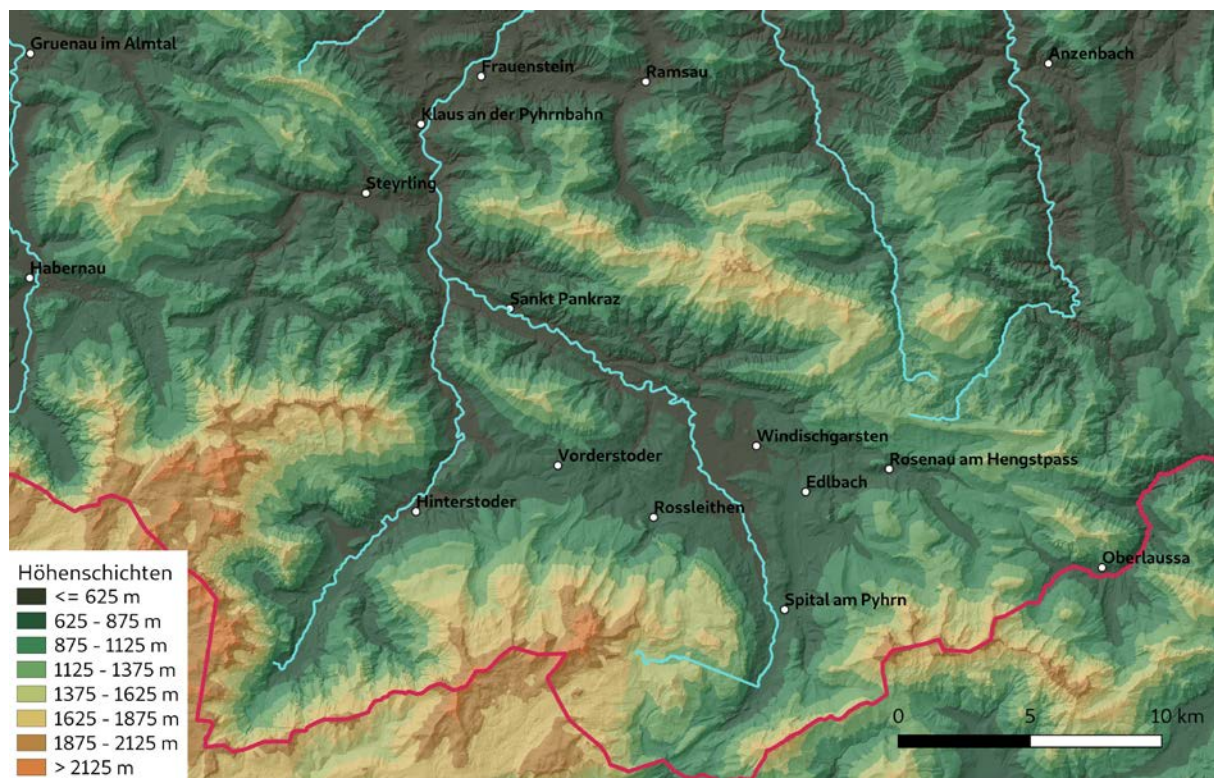


Abbildung 1: Ausschnitt der Region Pyhrn Priel wie er für die Auswertungen in dieser Studie verwendet wird. Die Einteilung der Seehöhenstufen entspricht den Seehöhenstufen der Analysen.

In Abbildung 2 ist die Seehöhenverteilung der Analyseregion dargestellt. Etwa die Hälfte der Analyseregion liegt in den Seehöhenstufen von 750 und 1000 m, also zwischen 625 und 1125 m Seehöhe. Die dritthäufigste Seehöhenstufe liegt bei 1250 m gefolgt von den Tallagen und Lagen um 1500 m, welche etwa gleich häufig sind. Lagen über 1500 m machen nur mehr einen geringen Teil des Gesamtgebietes aus.

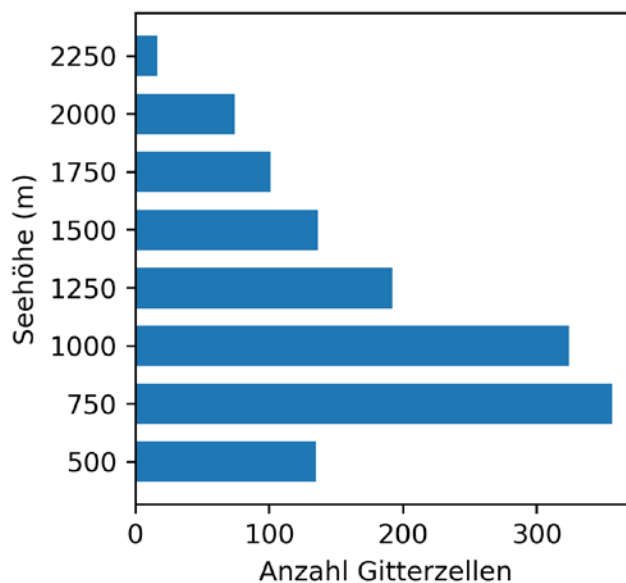


Abbildung 2: Seehöhenverteilung der Rasterzellen von Snowgrid in der Untersuchungsregion. Rund die Hälfte des Gebietes liegt in der Höhenstufe zwischen 625 und 1125 m Seehöhe.

Beobachtungsdaten

Ausgangsbasis für die Untersuchung der Schneedaten ist der Snowgrid Datensatz der ZAMG [Marc Olefs et al., 2019]. Dieser Schneedatensatz wird für ganz Österreich flächendeckend berechnet und liegt in zwei räumlichen und zeitlichen Auflösungen vor. Die hochaufgelöste Variante wird mit 15 min zeitlicher Auflösung sowie 100 m räumlicher Auflösung berechnet. Dieser komplexe Ansatz kann aber erst seit 2006 berechnet werden. Der gröber aufgelöste Berechnungsansatz verwendet Tagesdaten und eine räumliche Auflösung von 1x1 km [M. Olefs et al., 2020]. Zur Berechnung werden die SPARTACUS-Daten [Hiebl and Frei, 2016; 2018] verwendet, dadurch kann dieser Datensatz bis 1961 zurück berechnet werden.

Natürlich kommen durch die zwei unterschiedlichen Berechnungsansätzen nicht vollständig idente Ergebnisse heraus und in Abbildung 3 ist ein Vergleich der beiden Berechnungsmethoden für den Indikator Schneedecke ≥ 30 cm im Winter (Dezember bis Februar) für die verschiedenen Seehöhenstufen der Region dargestellt. Man erkennt, dass die komplexere Berechnung (blaue Balken) der Schneedecke zu etwas höheren Wahrscheinlichkeiten in allen Höhenstufen führt. Der größte Unterschied tritt bei 750 m auf, wo der Unterschied mehr als 10 Prozentpunkte beträgt.

Für die klimatologischen Analysen werden in dieser Arbeit dennoch die gröber aufgelösten Daten verwenden, da nur für diese 30 Jahre an Daten zur Verfügung stehen, welche notwendig sind, um Aussagen über die mittleren klimatischen Verhältnisse zu machen. Auch können nur für diesen Datensatz Trends zur zeitlichen Entwicklung seit 1961 gemacht werden. Aussagen zu den zeitlichen Entwicklungen, sowie anderen statistischen Auswertungen sind in sich konsistent.

Wahrscheinlichkeit für Tage mit Schneedecke >30 cm 2011-2020 im Winter (DJF)

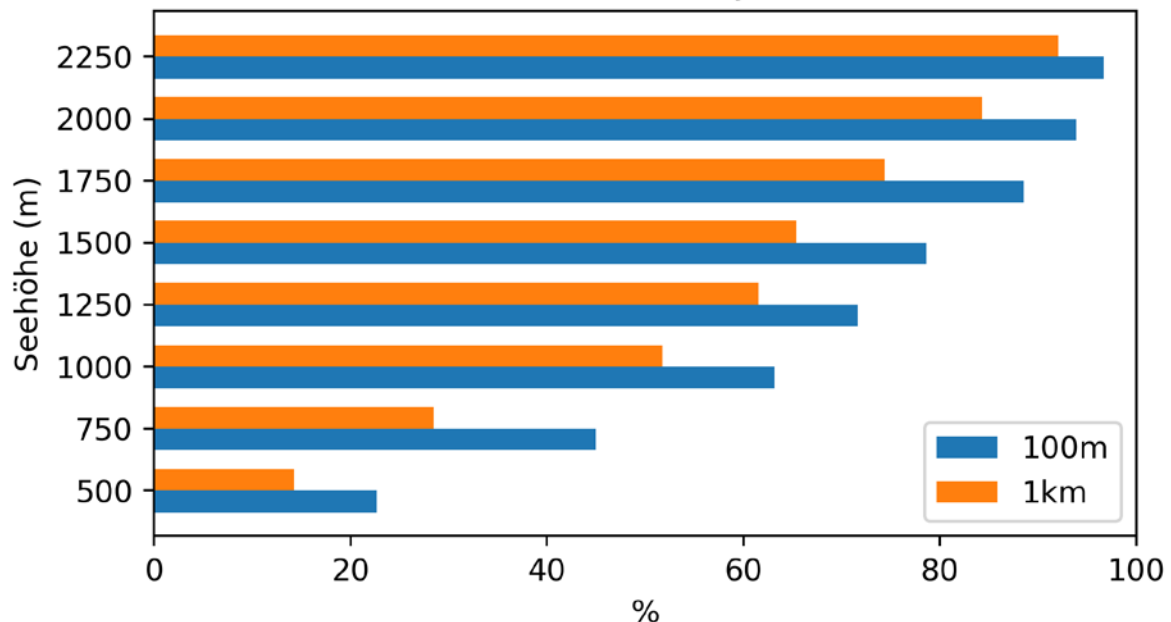


Abbildung 3: Wahrscheinlichkeit einer Schneedecke ≥ 30 cm pro Seehöhenstufe bestimmt aus dem Snowgrid Datensatz mit 1 km Auflösung (orange) und mit 100 m Auflösung (blau). Die zeitlich und räumlich höher aufgelöste Berechnungsmethode führt zu etwas höheren Wahrscheinlichkeiten.

Für die Analyse der Temperaturverhältnisse werden die SPARTACUS Daten verwendet, welche auch die Basis für die Schnee Berechnung darstellen.

Auswerteverfahren

Alle Auswertedaten liegen mit täglicher zeitlicher Auflösung auf dem 1x1 km Raster von Snowgrid und SPARTACUS vor und werden für die in Abbildung 1 dargestellten Analyseregion auf Seehöhenstufen mit 250 m Erstreckung zusammengefasst. Alle Werte der Rasterzellen welche innerhalb des 250 Höhenmeterfensters liegen werden arithmetisch gemittelt, um den Mittelwert der Seehöhenstufe zu bestimmen.

Es werden von Snowgrid die Schneehöhenangaben in Zentimeter verwendet. Dabei werden zwei Schwellwerte verwendet. Als Indikator für eine geschlossene Schneedecke auch in kubierte Gelände wird eine Schneehöhe von zumindest 5 cm angesetzt. Dieser Schwellwert stellt somit die Voraussetzung für ein winterliches Landschaftsbild dar. Als zweiter Schwellwert wird eine Schneedecke mit zumindest 30 cm Schneehöhe angesetzt. Bei einer derartigen Schneehöhe kann man von guten Bedingungen für das Schifahren auch abseits der Pisten ausgehen. Ab dieser Schneehöhe sollten keine Limitierungen bei Schitouren oder dem Variantenfahren im freien Gelände mehr auftreten.

Die Berechnung des Schneeanteils am Gesamtniederschlag erfolgte mit derselben Methode wie dies in Snowgrid mit 1x1 km Auflösung für die Akkumulation verwendet wurde [M. Olefs et al., 2020].

Alle Analysen basieren jeweils auf 30 jährige Zeitreihen. Damit sind 4 verschiedene Analysezeitreihen seit 1961 möglich, wobei jeweils eine Verschiebung des Zeitfensters um 10 Jahre

erfolgt. Die erste Analyseperiode beginnt mit dem Winter 1961/62 und endet mit dem Winter 1990/91. Die letzte Periode beginnt mit dem Winter 1990/91 und endet mit 2019/20. Eine Überlappung der beiden Perioden von einem Winter wurde in Kauf genommen, um die Verwendung von 30 Jahren sicher zu stellen. Für die Berechnung der Wahrscheinlichkeit der Schneedecke liegen daher für jede Auswertung auf Monatsbasis zwischen 840 und 930 Werte, je nach Länge des Monats, vor.

Die Auswertungen erfolgten generell auf Monatsebene, wobei bei der Interpretation der Fokus auf dem meteorologischen Winter (1. Dezember bis 28./29. Februar) als Zeitraum für die Hauptwintersaison, als auch die touristisch sehr wichtigen Weihnachtsferien (20. Dezember bis 10. Jänner) gelegt wird. Für die Berechnung der zeitlichen Entwicklung während des Winterhalbjahres auf Tagesbasis (etwa Abbildung 4 oder Abbildung 7) wurde ein gleitendes Fenster von jeweils ± 7 Tagen verwendet um stabilere Ergebnisse zu bekommen. Werte für den 1. Jänner entsprechen daher dem Mittelwert der Periode 24. Dezember bis 8. Jänner.

Für die statistischen Auswertungen wurde für die Mittelwerte jeweils das arithmetische Mittel verwendet. Als Streuungsmaß wird die klassische Standardabweichung verwendet. Die Korrelationen wurden mittels Pearson Korrelationskoeffizient bestimmt. Bei der Testung der Signifikanz wurde die Hypothese getestet, ob die Werte der verschiedenen Zeitperioden denselben Mittelwert besitzen. Dies wurde mittels Students t-Test [*Student*, 1908] getestet. Es werden die Signifikanzniveaus 0,25 (*) und 0,1 (**) angegeben und (-) bedeutet, dass keine signifikante Änderung des Mittelwertes der beiden angegebenen Signifikanzniveaus erreicht wird.

2. Auswerteergebnisse

Temperatur

Betrachtet man die Entwicklung der mittleren Temperaturverhältnisse in der Wintersaison, so sieht man, dass in der Periode 1961-1991 in der Höhenstufe 2250 m Anfang November das erste Mal die Temperatur unter 0 °C sinkt (Abbildung 4 links oben). Noch im Laufe des Novembers sinken auch in den Tallagen die Temperaturmittel unter 0 °C und bleiben dies auch bis etwa dem 25. Februar. Bis etwa Mitte März erreichen auch die Lagen bis 1500 m die Null Grad Grenze, in 2250 wird diese aber bis Ende April nicht erreicht. Während der kältesten Periode von Ende Dezember bis etwa 25. Jänner sinkt die Mitteltemperatur selbst in den Tallagen unter -2 °C.

Betrachtet man hingegen die letzten 30 Jahre (Abbildung 4 rechts oben), so sieht man das zwar auf 2250 m die Null Grad Grenze kaum später als 1961-1991 erreicht wird, in den Tallagen diese aber erst weit im Dezember unterschritten wird. Der Zeitraum mit Mitteltemperaturen unter 0°C dauert auch nur mehr bis Anfang Februar und verkürzt sich damit um knapp 4 Wochen. Auch wird in den Tallagen das Temperaturniveau von -2°C nicht mehr erreicht. Bis Ende Februar steigt die Null Grad Grenze bereits auf 1250 m und selbst auf 2250 m wird diese um den 20. April überschritten.

Durch den anthropogenen Klimawandel zeigt sich auf Monatsbasis in allen Monaten des Winterhalbjahres und in allen Höhenstufen eine klare Erwärmung, wenn man die Klimaperiode 1961-1990 und 1990-2019 vergleicht. Die Temperaturzunahme liegt dabei zwischen 0,8 °C (Dezember für Regionen über 1500 m Seehöhe) und 1,8 °C (April für Regionen über 1000 m Seehöhe).

Eine zeitlich feiner aufgelöste Analyse der Temperaturdifferenzen der zwei Perioden zeigt jedoch, dass in der Zeit/Höhen Darstellung (Abbildung 4 unten) noch feinere Strukturen aufscheinen. Zwar treten in allen Höhenstufen und Tagen positive Temperaturveränderungen auf, jedoch liegen diese etwa Mitte November in Lagen über 1500 m, sowie Ende Jänner in Lagen zwischen 1250 m und 1750 m nur ganz knapp über Null. Andererseits sieht man Anfang bis Mitte Jänner in allen Seehöhenstufen aber besonders in den tiefen Lagen, sowie in der zweiten Aprilhälfte in allen Höhenstufen eine markant stärkere Erwärmung von deutlich über 2 °C.

Generell sieht man, dass die historische Erwärmung im Winterhalbjahr in der Pyhrn-Priel-Region nicht gleichmäßig ist und auch in den Seehöhenstufen differenziert erfolgt, wobei aber keine explizite Seehöhenabhängigkeit der Erwärmung zu beobachten ist. Der mittlere Erwärmungstrend ist in allen Seehöhenstufen gleich.

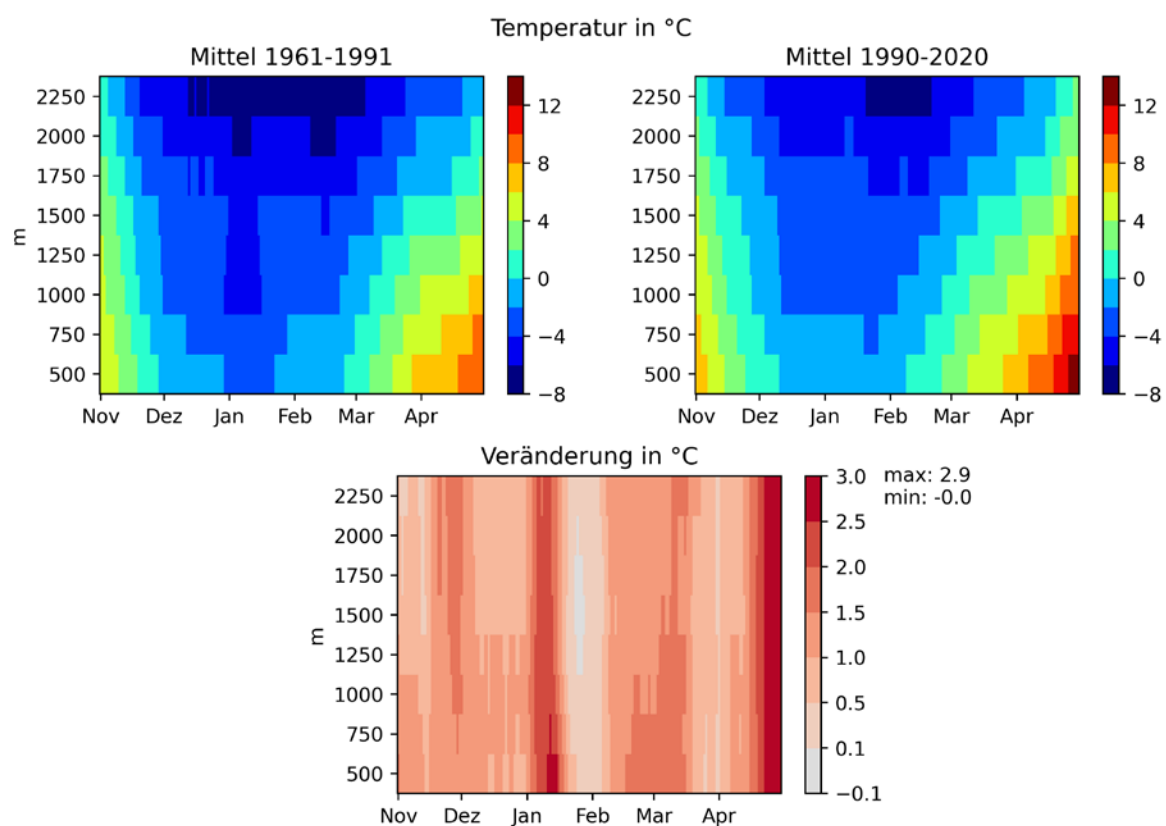


Abbildung 4: Temperaturverlauf vom 1. November bis 30. April für die verschiedenen Höhenstufen im 30 jährigen klimatologischen Mittel 1961-1990 (links oben) sowie 1990- 2020 (rechts oben). In der unteren Reihe ist die Temperaturänderung zwischen den beiden Perioden dargestellt. Für das gesamte Winterhalbjahr beträgt die Erwärmung rund 1.2 °C

Schneedecke

Geschlossene Schneedecke (Schnee ≥ 5 cm)

Betrachtet man die Wahrscheinlichkeit für eine geschlossene Schneedecke in der Region, so sieht man eine klare Seehöhenabhängigkeit. Während in den Hochgebirgslagen über 2000 m in allen 4 Perioden faktisch immer eine geschlossene Schneedecke vorhanden ist (Abbildung 5, weiße Bereiche), so muss man in den Tallagen im Mittel mit zumindest 4 Wochen ohne eine geschlossene Schneedecke rechnen. In den letzten 30 Jahren ist dieser Wert in einzelnen Gebieten (Abbildung 5, dunkelbraun) sogar auf zumindest 6 Wochen angestiegen. Generell kann man im gesamten Gebiet einen Rückgang der Tage mit geschlossenen Schneedecke beobachten.

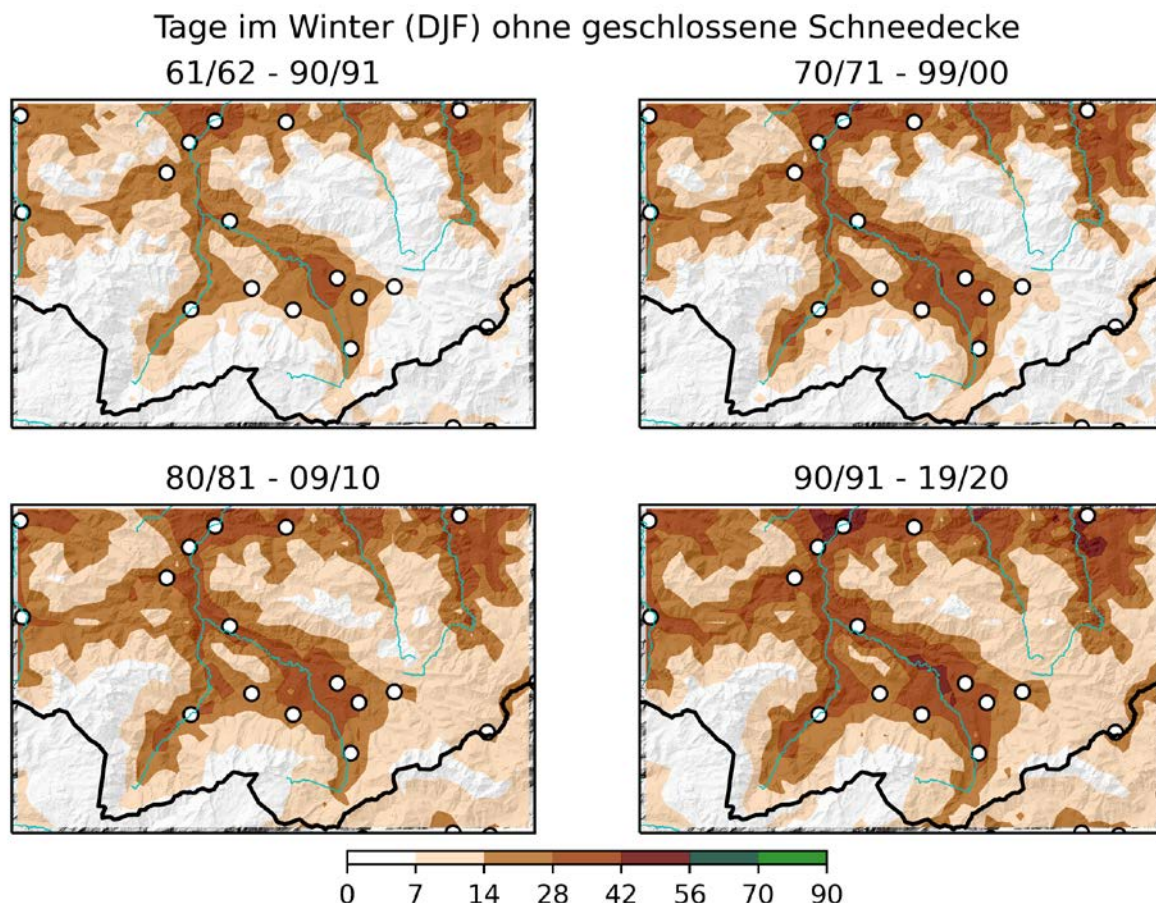


Abbildung 5: Anzahl der Tage im Hochwinter (Dezember bis Februar) an denen keine geschlossene Schneedecke vorhanden ist. In der aktuellen Klimaperiode (rechts unten) kommt in Tallagen bereits in mehr als 6 Wochen keine geschlossene Schneedecke vor (dunkelbraune Gebiete).

Betrachtet man die touristisch wichtige Weihnachtszeit (Abbildung 6) so sieht man, dass in der Periode 1961-1991 in den Tallagen um Hinterstoder und Spital am Pyhrn zwischen 4 und 7 (von maximal 22) Tage ohne geschlossene Schneedecke im Mittel vorkamen und erst talaus von Klaus auswärts, Werte zwischen 7 und 10 Tagen er-

reicht wurden. In den letzten 30 Jahren werden diese Werte bereits in Hinterstoder und auch rund um Windischgarsten erreicht und in den nördlichen Talausgängen liegen die Werte zwischen 10 und 14 Tagen. Damit kann man heute in den Tallagen im Mittel nur an der Hälfte aller Tage in den Weihnachtsferien mit einer geschlossenen Schneedecke rechnen.

Tage zwischen 20. Dez und 10. Jan ohne geschlossene Schneedecke

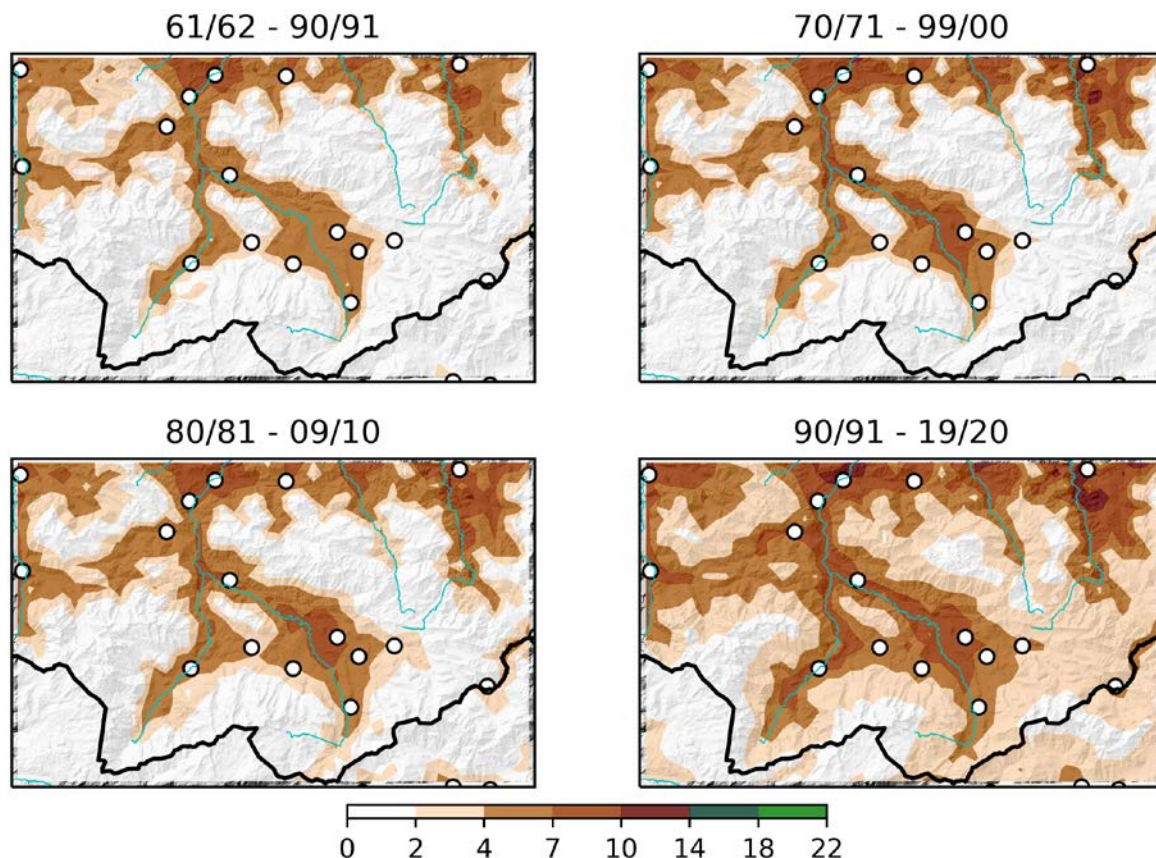


Abbildung 6: Wie Abbildung 4 nur für die Weihnachtsferien. In der aktuellen Klimaperiode (rechts unten) kommt in Tallagen bereits an 10 Tagen und damit etwa die Hälfte der Weihnachtsferien keine geschlossene Schneedecke mehr vor.

Betrachtet man die Wahrscheinlichkeit einer geschlossenen Schneedecke im zeitlichen Verlauf des Winterhalbjahres (Abbildung 7), so sieht man in der Periode 1961-1991 (links oben), dass sich in Lagen über 2000 m bereits im November meist eine Schneedecke aufgebaut hat und bereits Ende November die Wahrscheinlichkeit bei über 80 % lag. In den Tallagen lag diese Anfang November noch unter 5 %, erreicht Ende November zumindest 35 % und Mitte Dezember bei zumindest 65 %. Bis etwa dem 25. Februar bleibt die Wahrscheinlichkeit in den Tallagen bei Werten zwischen 65 und 80 %, sinkt dann bis Mitte März auf unter 50 % und nimmt dann Ende März-Anfang April sehr rasch ab. In den Lagen zwischen 1000 und 2000m erfolgt der Aufbau einer geschlossenen Schneedecke sehr rasch Anfang Dezember und mit Mitte Dezember konnte man mit 80 % Wahrscheinlichkeit mit einer Schneedecke rechnen. Durch die Schneeakkumulation über den Winter, erfolgt im Frühjahr die Abschmelze deutlich langsamer als in den Tallagen und über 1750 m konnte man auch Ende April von einer geschlossenen Schneedecke ausgehen.

In den letzten 30 Jahren gab es in Lagen über 1500 m Anfang November sogar eine leichte Zunahme der Wahrscheinlichkeit für eine geschlossene Schneedecke, in den

tieferen Lagen blieb sie eher konstant. Ab etwa Mitte November in höheren Lagen und mit Ende November auch in den tieferen Lagen kam es aber zu einer deutlichen Abnahme der Wahrscheinlichkeit. In den Tallagen wird eine Wahrscheinlichkeit von 65 % nur mehr etwa eine Woche lang Ende Jänner-Anfang Februar erreicht und auch auf 750 m nimmt die Wahrscheinlichkeit stark ab. Eine Wahrscheinlichkeit über 95 % wird heute nur mehr in Seehöhen über 1500 erreicht und diese auch deutlich kürzer.

Betrachtet man die Änderungen zwischen den beiden Perioden (Abbildung 7, unten), so sieht man in Lagen um und unter 1500 m generell eine Abnahme der Wahrscheinlichkeit einer geschlossenen Schneedecke, welche in den Tallagen Mitte März am stärksten ist, sowie in Lagen um 1000 und 1250 m im April.

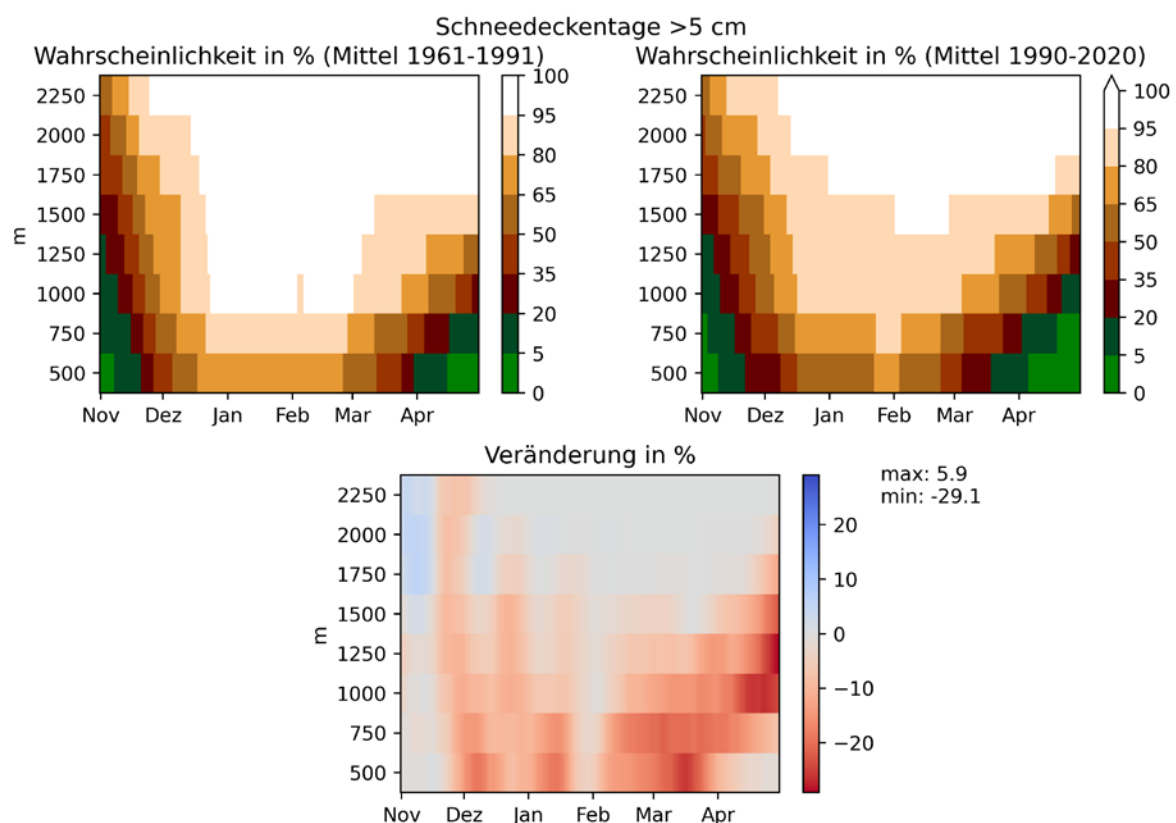


Abbildung 7: Wahrscheinlichkeit für eine geschlossene Schneedecke vom 1. November bis 30. April und für Seehöhenstufen im 30-jährigen klimatologischen Mittel 1961-1990 (links oben) sowie 1990- 2020 (rechts oben). In der unteren Reihe ist die Änderung zwischen den beiden Perioden dargestellt. Für Seehöhen unter 1500 m nimmt die Wahrscheinlichkeit einer Schneedecke um rund 10 % ab, darüber lediglich um 2 %.

Schneedecke $\geq 30\text{cm}$

Die Wahrscheinlichkeit für eine Schneedecke mit mindestens 30 cm ist natürlich wesentlich geringer als für eine geschlossene Schneedecke und in der Periode 1961-1991 wird diese in den Tallagen im Winter an mehr als 8 Wochen nicht erreicht. Erst in Lagen um und über 750 m wird an mehr als der Hälfte aller Wintertage eine derartige Schneehöhe erreicht. In Lagen über 2000 m kann man im Mittel mit einer gesicherten Schneelage mit dieser Mächtigkeit rechnen. In den Tallagen hat die Wahrscheinlichkeit in den letzten Jahrzehnten deutlich abgenommen, sodass in den letz-

ten 30 Jahre an mehr als 70 Tagen dieser Schwellwert nicht erreicht wurde und in allen Höhenstufen hat die Anzahl an Tagen, wo dieser Schwellwert nicht erreicht wird stark abgenommen. Besonders stark ist dieser Rückgang in Lagen unter 1000 m, wo die Wahrscheinlichkeit um knapp 15 Prozentpunkte oder etwa 14 Tage abgenommen hat

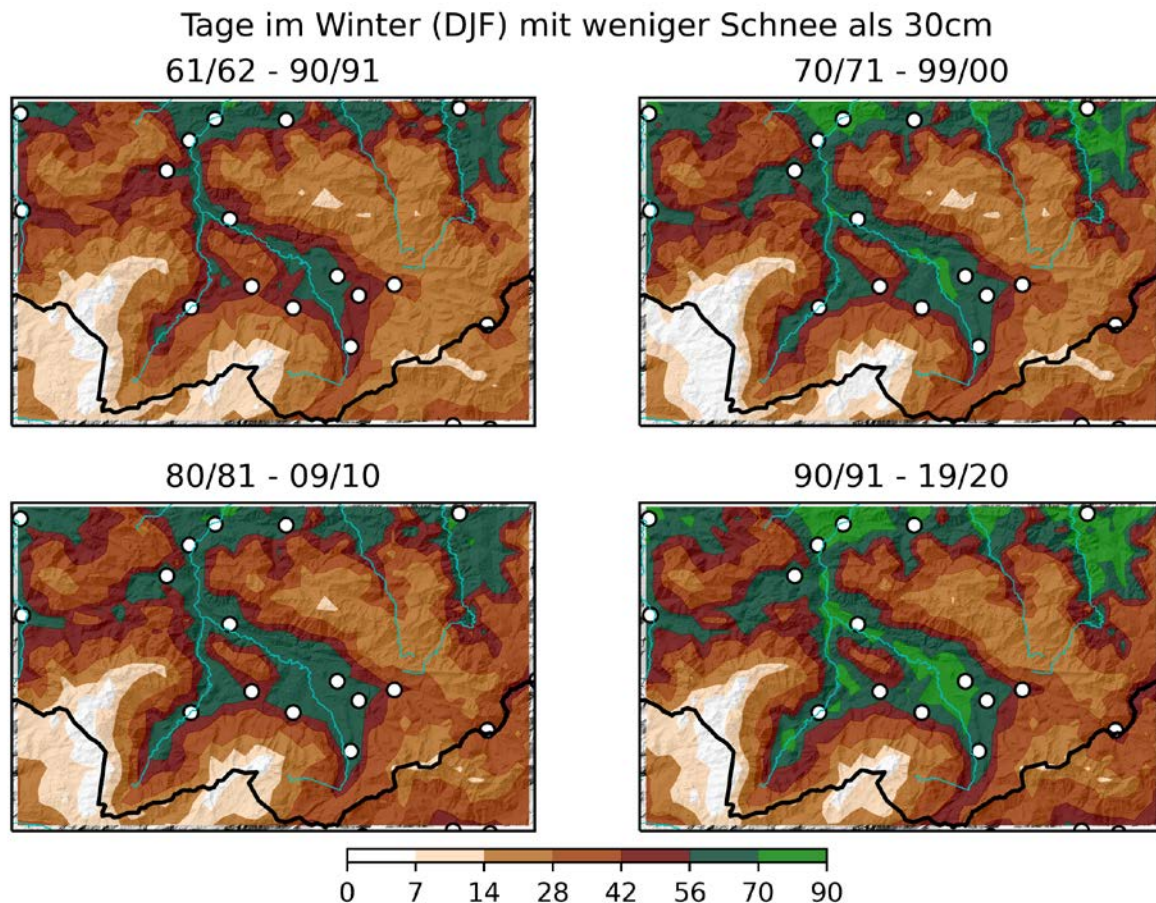


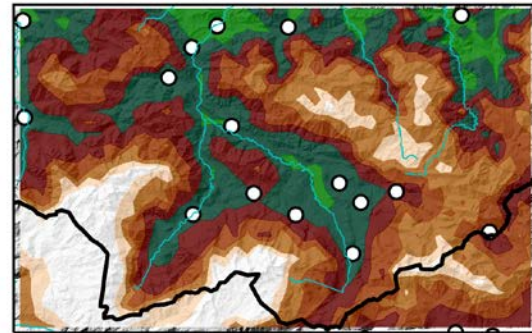
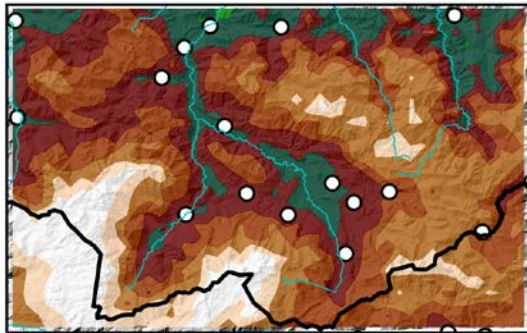
Abbildung 8: Anzahl der Tage im Hochwinter (Dezember bis Februar) an denen keine Schneedecke ≥ 30 cm vorhanden ist. In der aktuellen Klimaperiode (rechts unten) kommt in Tallagen bereits an mehr als 10 Wochen keine Schneedecke mit 30 cm mehr vor (hellgrüne Gebiete) und in Seehöhen um 1000 Meter sind es etwa 5 Wochen.

Betrachtet man die Weihnachtsferien (Abbildung 9) so ist die Entwicklung deutlich dramatischer. Kamen in der Periode 1961-1991 in den Tallagen im Mittel zumindest noch 4 Tage mit einer Schneedecke von zumindest 30 cm vor, so haben diese in den letzten 30 Jahren ebenso um rund 15 % und damit etwa 3 Tage abgenommen, so dass hier großflächig weniger als 4 Tage vorkommen. Man muss schon auf mehr als 1000 m Seehöhe gehen, um in den Weihnachtsferien an mehr als der Hälfte der Tage eine Schneedecke mit zumindest 30 cm zu erleben.

Tage zwischen 20. Dez und 10. Jan mit weniger als 30cm Schnee

61/62 - 90/91

70/71 - 99/00



80/81 - 09/10

90/91 - 19/20

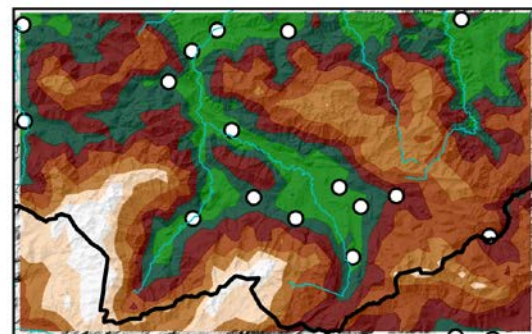
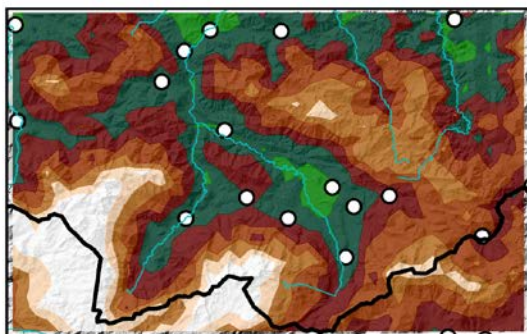


Abbildung 9: Anzahl der Tage in den Weihnachtsferien an denen keine Schneedecke ≥ 30 cm vorhanden ist. In der aktuellen Klimaperiode (rechts unten) kommt in Tallagen faktisch nie mehr eine Schneedecke mit 30 cm mehr vor (hellgrüne Gebiete) und in Seehöhen um 1000 Meter sind es etwa nur die Hälfte aller Tage.

Den zeitlichen Verlauf während des Winterhalbjahres sieht man in Abbildung 10. Konnte man in der Periode 1961-1991 in den Tallagen noch ab Mitte Dezember mit etwa 20-prozentiger Wahrscheinlichkeit mit einer derartigen Schneedecke rechnen (links oben), so wird in den letzten 30 Jahren diese Wahrscheinlichkeit erst um den 10. Jänner erreicht und übersteigt auch nicht mehr die Schwelle von 35 %. Diese Grenze wird in der vorigen Periode noch von Anfang Jänner bis Anfang März überschritten. Eine Wahrscheinlichkeit von zumindest 50 % wurde in der ersten Periode noch in der Seehöhenstufe 750 m von Anfang Jänner bis Mitte März erreicht, in den letzten Dekaden erfolgt dies erst ab 1000 m Seehöhe.

Betrachtet man die Veränderungen zwischen den beiden Perioden (Abbildung 10, unten), so sieht man in Lagen unter 1500 m über das gesamte Winterhalbjahr eine Abnahme der Wahrscheinlichkeit für eine Schneedecke von zumindest 30 cm. Diese Abnahme ist am stärksten in Lagen um 750 m Ende Dezember-Anfang Jänner, sowie im März, und im März und April in Lagen zwischen 1000 und 1500 m. Die Abnahme beträgt hier rund 20 Prozentpunkte. In Lagen um und über 2000 m ist das Bild nicht so einheitlich. Hier sieht man eine leichte Zunahme der Wahrscheinlichkeit Anfang November, dann eine Abnahme Anfang Dezember und ansonsten nur geringe Veränderungen.

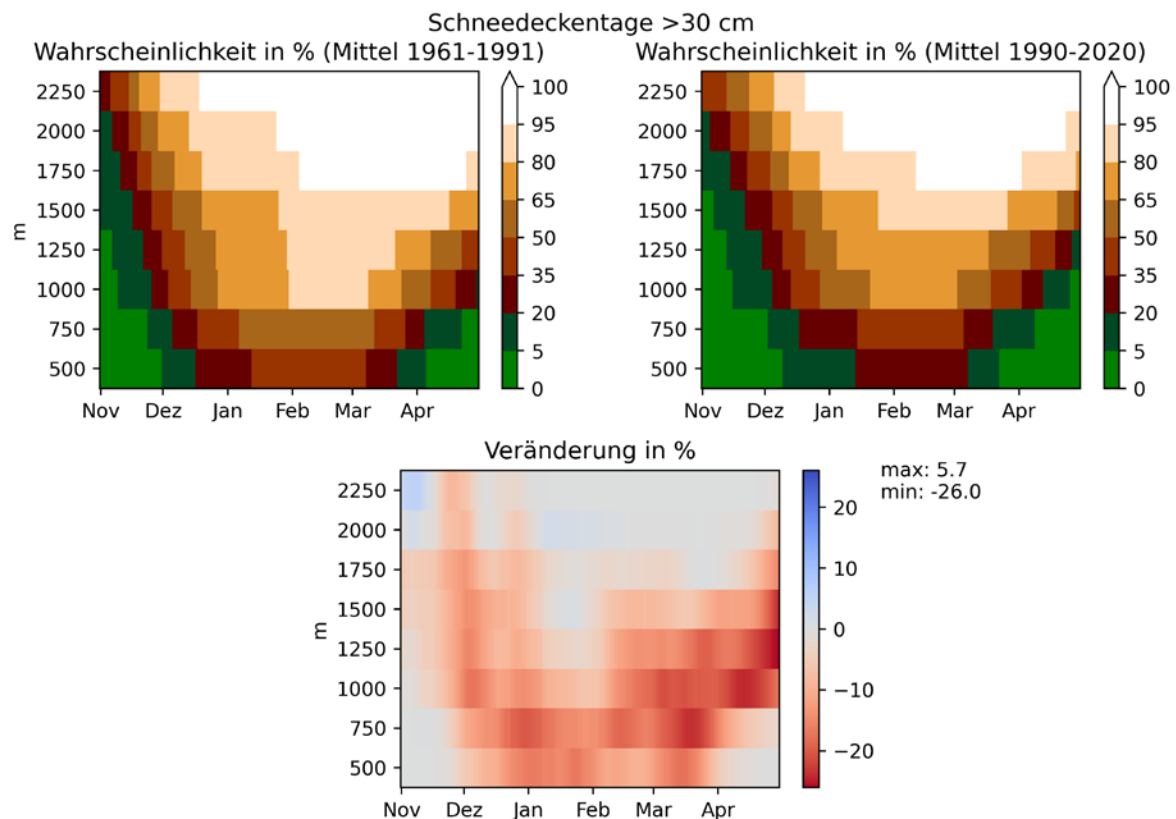


Abbildung 10: Wahrscheinlichkeit für eine Schneedecke ≥ 30 cm vom 1. November bis 30. April und für Seehöhenstufen im 30 jährigen klimatologischen Mittel 1961-1990 (links oben) sowie 1990- 2020 (rechts oben). In der unteren Reihe ist die Änderung zwischen den beiden Perioden dargestellt. Für Seehöhen unter 1500 m nimmt die Wahrscheinlichkeit einer Schneedecke um rund 12 % ab, darüber lediglich um 4 %.

Betrachtet man die Änderung der Wahrscheinlichkeit einer Schneedecke zwischen den beiden Perioden 1961-1991 sowie 1990-2020 in Abhängigkeit zur Seehöhe für den Winter (Abbildung 11), so erkennt man bei einer geschlossenen Schneedecke (links) die stärkste Abnahme in den Stufen 500 und 750 m, wobei in der untersten Stufe der Wert von etwa 60 Tagen auf unter 50 Tage zurückgeht. Von 1000 m bis 1750 m gibt es ebenfalls einen Rückgang, der mit zunehmender Seehöhe abnimmt. Erst ab 2000 m ist kaum einer Veränderung mehr festzustellen. Diese Abnahme der Schneedecke ist für Lagen bis 1000 m hoch signifikant ($\alpha = 0,1$) und für 1250 und 1500 m signifikant ($\alpha = 0,25$). Für eine Schneedecke von zumindest 30 cm (rechts) kommt es in den Tallagen fast zu einer Halbierung der Wahrscheinlichkeit und die größte Änderung erfolgt auf 750 m, mit einer Abnahme von mehr als 2 Wochen. Diese Abnahmen sind auch hoch signifikant. Auch Lagen zwischen 1000 und 1750 kommt es zu klaren Reduktionen, wobei aber nur mehr die Abnahme in 1000 m mit etwa einer Woche signifikant ist.

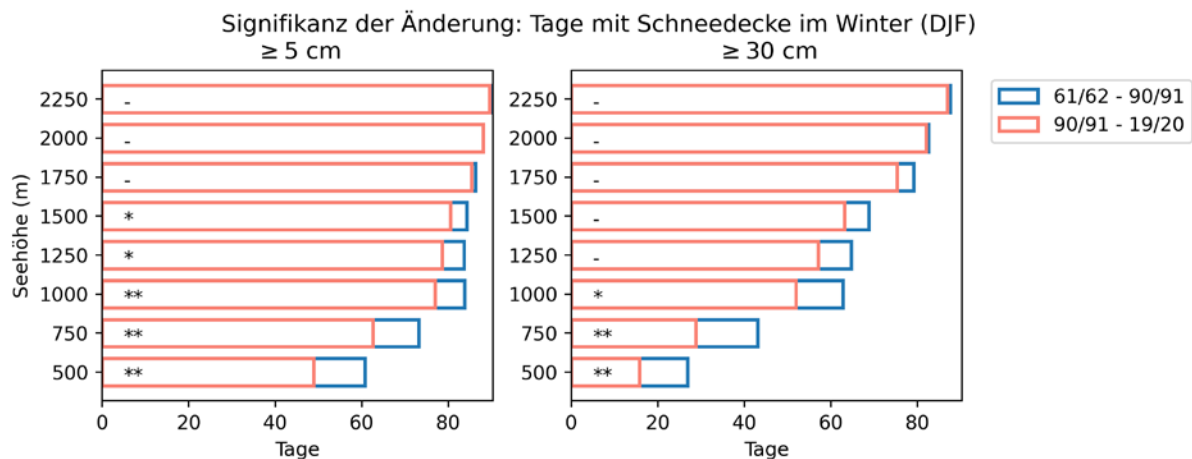


Abbildung 11: Änderung der Anzahl an Tagen mit geschlossenen Schneedecke (links) und einer Schneedecke ≥ 30 cm pro Höhenstufe zwischen den Perioden 1961-1990 und 1990-2020 mit Angabe der Signifikanz (** $\alpha=0.01$; * $\alpha=0.05$; - = nicht signifikant)

Variabilität der Schneedecke von Jahr zu Jahr

Neben den mittleren Schneebedingungen, spielt für die touristische Nutzung aber auch die Schwankung von Jahr zu Jahr eine große Rolle. Der Winter ist in Österreich die Jahreszeit mit der größten Schwankung von Jahr zu Jahr, da zu dieser Jahreszeit die Temperaturunterschiede zwischen dem Atlantik und dem Kontinent, sowie zwischen arktischen und subtropischen Luftmassen am größten ist. Je nach Anströmrichtung kann daher die Witterung sehr unterschiedlich sein. Dies wirkt sich natürlich auch auf die Schneedecke aus.

Untersucht man die Winter der letzten 30 Jahre und vergleicht die mittleren Verhältnisse mit den Extremwinter mit den meisten Tagen mit einer geschlossenen Schneedecke (Abbildung 12, blau) und den wenigsten (rot), so sieht man, dass in den Tälern um 500 m, wo im Mittel 48 Tage mit geschlossener Schneedecke vorkommen, sowohl Winter mit faktisch keiner Schneedecke, als auch Winter mit einer permanent geschlossenen Schneedecke unter dem aktuellen Klima möglich sind.

Generell sieht man in Abbildung 12, dass die negativen Abweichungen, also die roten Balken länger sein können als die positiven. Dies liegt daran, dass im Zeitraum Dezember bis Februar maximal 90 bzw. 91 Tage vorkommen können und damit die blauen Balken maximal die Länge zwischen dem Mittelwert und 90 betragen kann. In allen Höhenstufen sind daher in den letzten 30 Jahren Winter vorgekommen, wo an faktisch allen Tagen eine geschlossene Schneedecke aufgetreten ist. Aber ebenso sind in Lagen bis 1750 m Seehöhe Winter vorgekommen, in denen um mehr als 30 Tage weniger als im Mittel eine Schneedecke gelegen ist und damit weniger als der Hälfte aller möglichen Tage.

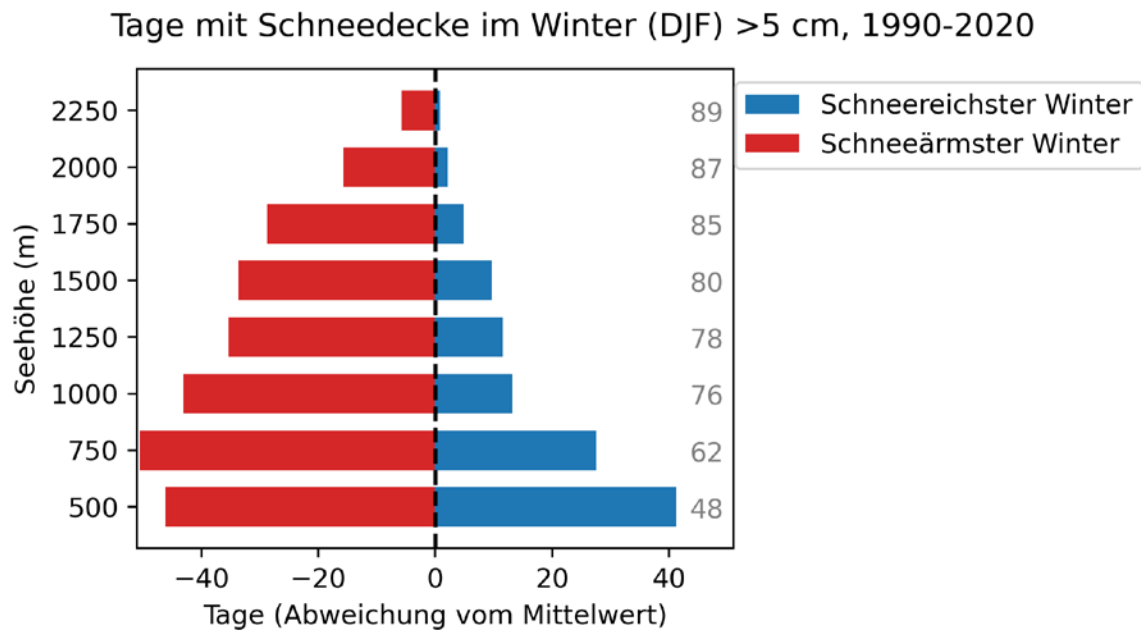


Abbildung 12: Abweichung des schneeeärmsten und schneereichsten Winter von den mittleren Verhältnissen bezogen auf die Anzahl der Tage mit geschlossener Schneedecke im Winter (Dezember-Februar) im Zeitraum 1990 bis 2020. Die Zahlen rechts geben die Anzahl der Tage im klimatologischen Mittel. Im schneeeärmsten Winter kommt unter 1000 m faktisch keine geschlossene Schneedecke mehr zusammen. Im schneereichsten liegt hingegen den ganzen Winter eine Schneedecke.

Bei Tagen mit einer Schneedecke von zumindest 30 cm (Abbildung 13) gibt es eine Limitierung der negativen Abweichungen also der roten Balken, da etwa auf 500 m im Mittel nur 15 solcher Tage vorkommen. Bis auf 1250 m Seehöhe gab es in den letzten 30 Jahren Winter, an denen kein einziger Tag mit einer derartigen Schneedecke vorgekommen ist. Selbst auf 2000 m beträgt die negative Anomalie rund 40 Tage und erst ab einer Seehöhe von 1750 sind auch die positiven Abweichungen limitiert, kommen also Winter vor, an denen an allen Tagen des Winters dieser Schwellwert überschritten wird. Die stärksten negativen Abweichungen treten zwischen 1000 und 1750 m Seehöhe auf und betragen um die 50 Tage also mehr als 50 % aller Wintertage.

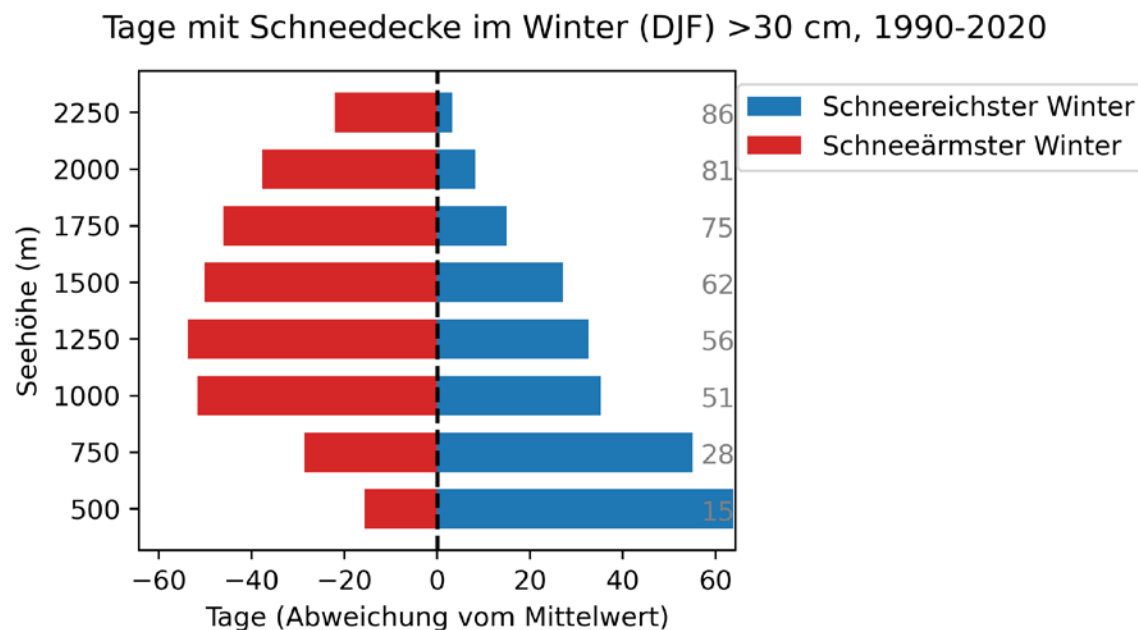


Abbildung 13: Abweichung des schneearmsten und schneereichsten Winter von den mittleren Verhältnissen bezogen auf die Anzahl der Tage mit einer Schneedecke ≥ 30 cm im Winter (Dezember-Februar) im Zeitraum 1990 bis 2020. Die Zahlen rechts geben die Anzahl der Tage im klimatologischen Mittel an. Im schneearmsten Winter kommt unter 1500 m faktisch keine Schneedecke ≥ 30 mehr vor. Im schneereichsten kommt hingegen sogar in den Tallagen an mehr als 70 Tagen eine derartige Schneedecke vor.

Betrachtet man die Standardabweichung, also ein Maß für die Variabilität von Jahr zu Jahr für den ganzen Winter (Abbildung 14), so sieht man, dass diese für eine geschlossene Schneedecke (links) ein Maximum in den Tallagen mit rund 25 Tagen hat und mit der Seehöhe sukzessive abnimmt. Die verschiedenfarbigen Striche geben dabei den Wert der Standardabweichung für die 4 verschiedenen Perioden ab. Hier zeigt sich eine klare Zunahme der Variabilität durch die Erwärmung, welche in Lagen um 1000 m am stärksten ist.

Für eine Schneedecke von zumindest 30 cm sieht die zeitliche Entwicklung anders aus. Hier hat die Variabilität in den untersten beiden Lagen stark abgenommen. Dies liegt jedoch daran, dass hier dieser Schwellwert inzwischen schon so selten vorkommt, dass die Variabilität sinken muss, da ja keine Werte kleiner Null vorkommen können. Gab es in der Periode 1961-1991 noch eine Abnahme der Variabilität mit der Seehöhe, so wird heute die höchste Variabilität in Lagen zwischen 1000 und 1250 m mit Werten um 28 Tagen erreicht. Auf 500m ist die Standardabweichung von mehr als 30 Tagen in der Periode 1961-1991 auf unter 20 gesunken.

Die Entwicklung der Standardabweichung für die Weihnachtsferien ist sehr ähnlich. Bei einer geschlossenen Schneedecke (Abbildung 15 links) zeigt sich in Lagen zwischen 750 und 1500 m eine starke Zunahme der Variabilität, für eine Schneedecke von zumindest 30 cm hingegen eine Abnahme in den Lagen 500 und 750 m.

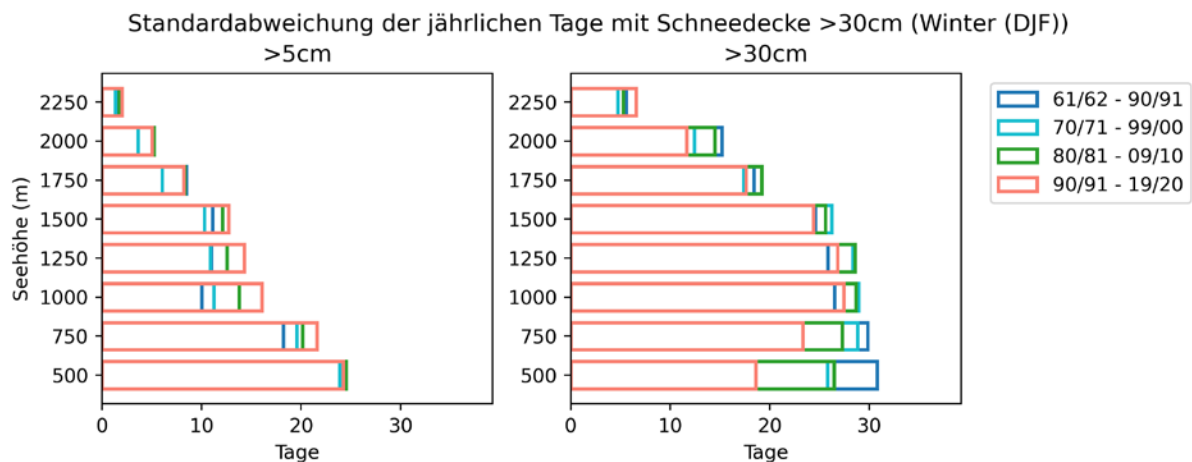


Abbildung 14: Standardabweichung der Tage mit einer geschlossenen Schneedecke (links) und eine Schneehöhe ≥ 30 cm im Winter (Dezember-Februar) und den Höhenstufen für 4 Klimaperioden.

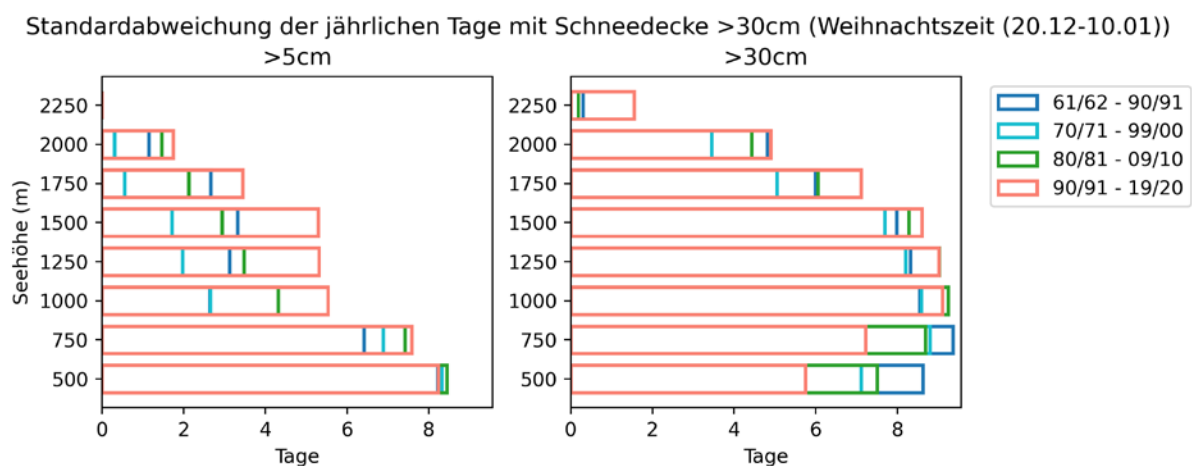


Abbildung 15: Standardabweichung der Tage mit einer geschlossenen Schneedecke (links) und eine Schneehöhe ≥ 30 cm in den Weihnachtsferien und den Höhenstufen für 4 Klimaperioden.

Abhängigkeit der Schneedecke von der Temperatur und Niederschlag

Der Aufbau einer Schneedecke hängt nicht nur von der Temperatur ab, sondern ist ein Zusammenspiel von Temperatur und Niederschlag. Hierbei ist die Schneedecke mit der Temperatur negativ korreliert (je kälter, umso wahrscheinlicher ist eine Schneedecke) und mit Niederschlag positiv. Ob hierbei die Temperatur relevanter ist oder der Niederschlag, hängt vom Temperaturniveau ab. In Lagen wo die Temperaturen sicher unter Null Grad liegen hängt diese überwiegend vom Niederschlag ab, in Lagen wo das Temperaturniveau gerade bei Null Grad liegt, spielt die Temperatur eine zentrale Rolle.

In Abbildung 16 ist links die Korrelation zwischen der Anzahl der Tage mit einer geschlossenen Schneedecke im Winter und der Mitteltemperatur für die verschiedenen Seehöhen dargestellt. Diese ist wie zu erwarten in den Lagen unter 2000 m negativ und ist bis 1500 m in den letzten 30 Jahren sehr ähnlich. Die Korrelationen haben aber in den letzten Jahrzehnten in allen Höhenstufen deutlich zugenommen, ganz besonders stark zwischen 1000 und 1750 m. Dies bedeutet, dass die Temperatur-

sensitivität der Schneedecke in diesen Höhenstufen durch die Erwärmung zugenommen hat. Für eine Schneedecke von zumindest 30 cm (rechts) ist die Korrelation unter 2000 m auch negativ, wobei die Werte etwas höher liegen als bei einer geschlossenen Schneedecke und auch hier zeigt sich in Lagen zwischen 750 und 2000 m eine starke Abnahme der Werte und damit einen stärkeren Zusammenhang zwischen Temperatur und Schneedecke aufgrund der Erwärmung.

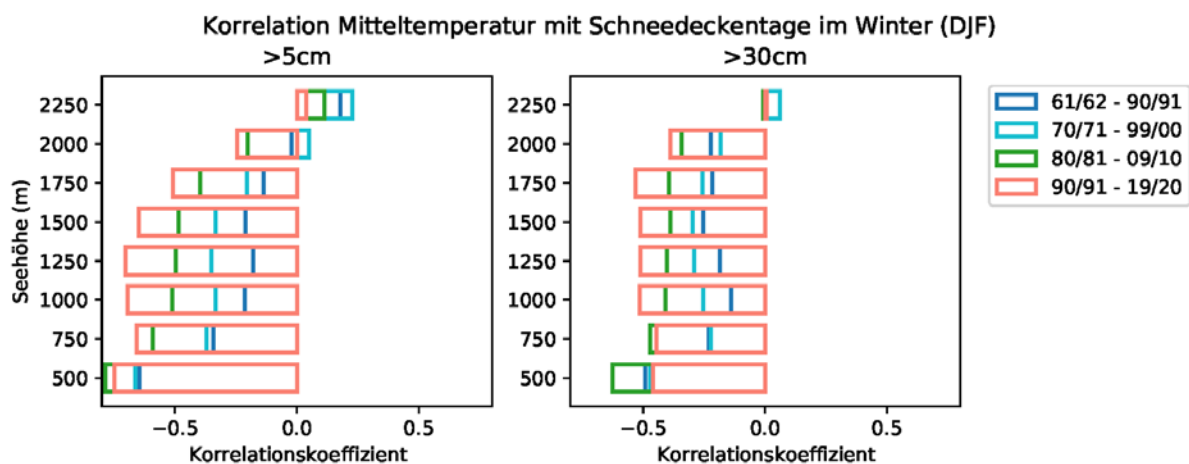


Abbildung 16: Korrelation zwischen der Tage mit einer Schneedecke (links 5 cm, rechts 30 cm) und der Mitteltemperatur im Winter (Dezember-Februar) in Abhängigkeit zur Seehöhe und für 4 Klimaperioden. Die Schneelage ist für beide Schwellwerte bis zu eine Seehöhe von 1750 m stark antikorreliert (~ -0.5), wobei die Abhängigkeit der Schneedecke von der Temperatur abgesehen von der tiefsten und der höchsten Seehöhenstufe stark zugenommen hat.

Beim Niederschlag (Abbildung 17) zeigt sich wie erwartet eine positive Korrelation zwischen Schneedecke und Niederschlagssumme, wobei die Werte bei 30 cm deutlich höher liegen. Bei der zeitlichen Entwicklung sieht man kein eindeutiges Signal, jedoch tendenziell eine Zunahme bei der geschlossenen Schneedecke und eine Abnahme bei 30 cm.

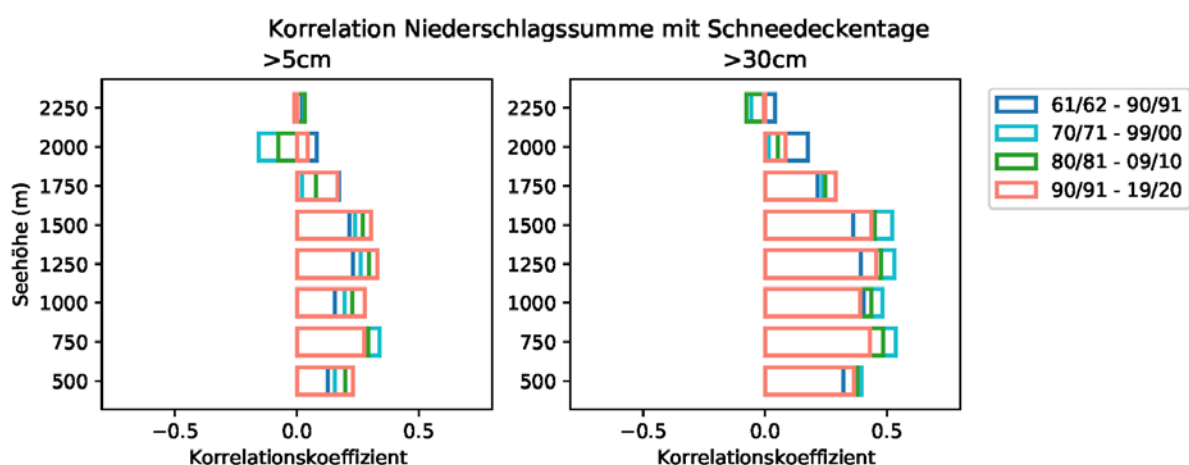


Abbildung 17: Korrelation zwischen der Tage mit einer Schneedecke (links 5 cm, rechts 30 cm) und der Niederschlagssumme im Winter (Dezember-Februar) in Abhängigkeit zur Seehöhe und für 4 Klimaperioden. Die Schneelage ist für beide Schwellwerte bis zu eine Seehöhe von 1750 m positiv korreliert, wobei die Abhängigkeit bei einer Schneedecke ≥ 30 deutlich stärker ist. Hier scheint jedoch der Zusammenhang durch die Erwärmung schwächer zu werden, was für eine geschlossene Schneedecke jedoch nicht stimmt.

Anteil des Schnees am Gesamtniederschlag

Neben der Schneelage verändert sich auch der Anteil des Niederschlages im Winter der in Form von Schnee fällt. Das hat auch Auswirkungen auf die touristische Attraktivität, da ein Spaziergang bei Schneefall in einer Winterlandschaft durchaus positiv besetzt ist, ein Spaziergang oder Schifahren bei Regen hingegen nicht. In Abbildung 18 sieht man den zeitlichen Verlauf des Anteils an Niederschlag der als Schnee fällt.

In der Periode 1961-1991 fiel in den Tallagen bereits Ende November mehr als die Hälfte des Niederschlages in Form von Schnee, Anfang Jänner stieg dieser Anteil für etwa 2 Wochen sogar auf mehr als 65%. Erst Anfang März sank der Schneeanteil wieder unter 50 % und Ende März unter 20 %. In Lagen um und über 2000m lag der Schneeanteil faktisch das gesamte Winterhalbjahr über 80 %.

In den letzten 30 Jahren wurde in den Tallagen ein 50 prozentiger Schneeanteil erst Mitte Dezember erreicht und dieser Zeitraum reicht auch nur mehr bis Anfang Februar. In den Lagen um und unter 1250 m haben sich die Schneeanteile in etwa um eine Seehöhenstufe nach oben verschoben. Betrachtet man die Differenzen zwischen den beiden Perioden (Abbildung 18 unten) so sieht man die stärksten Abnahmen des Schneeanteils in den tieferen Lagen im Übergang November zu Dezember, im März, sowie im April besonders in den höheren Lagen. Auffällig ist die Zunahme des Schneeanteils in Lagen zwischen 1250 und 2000 m im Dezember und dies obwohl auch in diesen Bereich eine Erwärmung stattgefunden hat (siehe Abbildung 4).

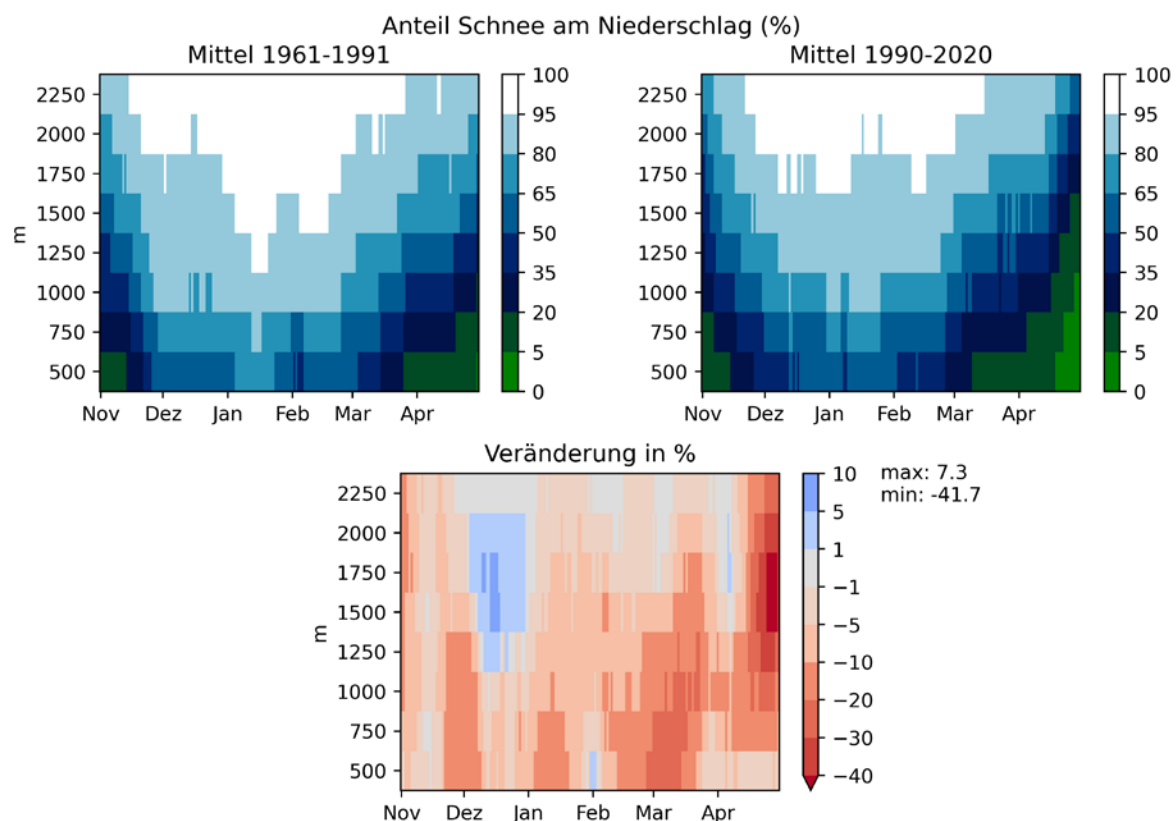


Abbildung 18: Anteil von Schnee am Gesamtniederschlag vom 1. November bis 30. April und für Seehöhenstufen im 30 jährigen klimatologischen Mittel 1961-1990 (links oben) sowie 1990-2020 (rechts oben). In der unteren Reihe ist die Änderung zwischen den beiden Perioden in Prozentpunkten dargestellt. Für Seehöhen unter 1500 m nimmt der Schneeanteil um rund 11 % ab, darüber lediglich um 5 %. Die stärksten Änderungen sind in den Tieflagen Anfang März und in den Hochlagen im April.

3. Interpretation und Zusammenfassung

Der anthropogene Klimawandel zeigt auch in der Pyhrn-Priel Region im Winter bereits klare Auswirkungen, nicht nur bei der Temperatur, sondern auch auf die touristisch hoch relevante Größe Schnee. Hier die wichtigsten Ergebnisse der Studie zusammengefasst:

Temperatur

Bei der Temperatur ergibt sich bei einem Vergleich der Perioden 1961-1990 versus der letzten 30 Jahre ein Temperaturanstieg zwischen 0.8 °C und 1.8 °C, je nach Monat und Seehöhenstufe. Dies entspricht einer Erwärmungsrate zwischen 0.27 und 0,6 °C pro Dekade. Bei höherer zeitlicher Differenzierung erkennt man eine besonders ausgeprägte Erwärmung in der ersten Jännerhälfte sowie Ende April. Eine relativ geringe Erwärmung zeigt sich in Lagen zwischen 1250 und 2000 m Ende Jänner-Anfang Februar. Die Bandbreite der 15 tägigen gleitenden Mittel reicht dabei von faktisch keiner Erwärmung bis 2,9 °C.

Diese Erwärmung führte dazu, dass in den letzten 30 Jahren in den Tallagen nur mehr von etwa dem 10. Dezember bis zum 10. Februar Tagesmitteltemperaturen unter Null Grad Celsius im Mittel vorkommen, wohingegen dieser Zeitraum 1961-1991 noch von Ende November bis etwa dem 25. Februar dauerte.

Geschlossene Schneedecke (Schneedecke $\geq 5\text{cm}$)

Die Anzahl der Tage mit einer geschlossenen Schneedecke hat im Winter in der Region in Lagen unter 1750 m signifikant abgenommen. Die Abnahme ist in den Tallagen am stärksten und beträgt etwa 2 Wochen. Hier hat nun nur mehr etwa die Hälfte aller Wintertage eine geschlossene Schneedecke. In der Periode 1961-1991 hatten dies noch 2/3 aller Tage. Auch in den Weihnachtsfeiertagen kann man nur an knapp mehr als der Hälfte aller Tage mit einer geschlossenen Schneedecke rechnen.

Schneedecke geeignet für sportliche Aktivitäten (Schneedecke $\geq 30\text{cm}$)

Auch die Tage mit zumindest 30 cm Schnee hat in Lagen unter 2000 m abgenommen. In den Tallagen hat sie sich faktisch halbiert und nicht einmal mehr in 3 Wochen im Winter wird dieser Schwellwert erreicht. Selbst in 1000 m Seehöhe hat diese um knapp 2 Wochen abgenommen und nur etwas mehr als die Hälfte aller Wintertage erreicht diese Schneehöhe.

Variabilität der Schneedecke

Die Variabilität der Schneedecke für beide Schwellwerte ist ausgesprochen hoch. In der Pyhrn-Priel Region können bereits bei derzeitigem Klima Winter vorkommen, wo sich in den Tallagen keine geschlossene Schneedecke mehr bildet. Winter ohne eine Schneedecke von zumindest 30 cm kommen bereits bis zu einer Seehöhe von 1250 m vor.

Durch die Erwärmung der letzten Dekaden hat sich die Variabilität der geschlossenen Schneedecke sogar noch erhöht. Dies gilt besonders für Höhenlagen zwischen 750 und 1500 m. Bei Schneedecken mit zumindest 30 cm hat die Variabilität in tiefen

Lagen unter 1000 m hingegen stark abgenommen, dies liegt aber daran, dass heute hier nur mehr sehr wenige derartige Tage vorkommen.

Korrelation Schneedecke mit Temperatur und Niederschlag

Die Korrelation der Schneedecke für beide Schwellwerte mit der Temperatur ist bis 2000 m negativ. Durch die Erwärmung hat dieser Zusammenhang speziell in Lagen zwischen 750 und 1750 stark zugenommen. Damit ist die Sensitivität der Schneedecke in diesen Lagen gegenüber Temperaturveränderungen angestiegen.

Die Korrelation der Schneedecke mit dem Niederschlag ist generell positiv, wobei die Werte bei einer Schneedecke von zumindest 30 cm deutlich höher liegen. Die zeitliche Entwicklung der Korrelation ist nicht eindeutig interpretierbar. Dies dürfte auch daran liegen, dass es keinen Trend bei der Niederschlagsentwicklung in diesen Zeitraum gegeben hat.

Anteil des Schnees am Gesamtniederschlag

Der Anteil des Schnees am Gesamtniederschlag hat in den letzten Jahrzehnten in allen Höhenlagen und allen Monaten des Winterhalbjahres mit Ausnahme von Höhenlagen über 1500 m im Dezember abgenommen. Die Abnahme war besonders im Frühwinter im Übergang von November zum Dezember in tieferen Lagen, in der ersten Hälfte des Jäanners sowie ab Mitte Februar sehr ausgeprägt. Die stärkste Änderung erfolgte in Lagen um 1750 m im April. In Lagen unter 1000 m ist dabei der Schneeanteil im Winter um rund 10 Prozentpunkte gesunken.

Die Zunahme des Schneeanteils in Lagen zwischen 1250 und 2000 m im Dezember steht im Widerspruch mit dem gleichzeitigen Temperaturanstieg in diesen Höhenstufen und dieser Jahreszeit. Dies kann nur bedeuten, dass die Temperaturentwicklung bei Niederschlag in diesem Zeitraum eine andere war als während des gesamten Zeitraum. In den letzten Jahrzehnten müssen daher im Dezember häufiger Niederschlagsereignisse bei Nordanströmung stattgefunden haben, als in den Perioden davor. Ähnliche Ergebnisse wurden auch schon von anderen Studien für diese Region gefunden [Schöner *et al.*, 2019].

Bedeutung für den Wintertourismus

Die beobachteten Veränderungen bei der natürlichen Schneedecke in der Pyhrn Priel Region seit 1961 haben klar negative Auswirkung auf die Attraktivität der Region für schneegebundene Aktivitäten im Winterhalbjahr. Der Rückgang einer geschlossenen Schneedecke reduziert in den Tallagen die Tage mit einem winterlichen Erscheinungsbild, dies besonders in der Adventzeit und während der Weihnachtsferien. Dadurch werden Aktivitäten wie Pferdekutschenfahrten, Winter- und Schneeschuhwandern sowie die Anreise zu Adventmärkten in der Region weniger attraktiv.

Der Rückgang einer Schneedecke von zumindest 30 cm ist besonders in Lagen um 1000 m Seehöhe problematisch, da hier Schitourengeher und Variantenfahrer besonders betroffen sind, wenn Abfahrten nicht mehr bis ins Tal möglich sind und längere Fußmärsche in Kauf genommen werden müssen.

Durch das Sinken des Schneeanteils am Gesamtniederschlag muss man nun in der Region auch im Winterhalbjahr häufiger mit Regen rechnen. Dies besonders im Frühwinter, also auch im Advent. Bei Regen sinkt natürlich die Attraktivität von Freiluftaktivitäten.

Durch die Erwärmung der letzten Jahrzehnte hat zudem auch noch die Variabilität der Schneedecke von Jahr zu Jahr zugenommen. Dies erhöht das Risiko, besonders ungünstige Schneeverhältnisse anzutreffen.

Aufgrund des Einsatzes technischer Beschneigung ist die vergangene Schneedeckenentwicklung innerhalb von bewirtschafteten Pistenflächen von Skigebieten differenziert zu betrachten.

Zukünftige Entwicklung

Die beschriebenen klimatischen Veränderungen in der Region beziehen sich auf die Veränderungen zwischen der Periode 1961-1991 sowie 1990 bis 2020. Dies entspricht jeweils den mittleren klimatischen Verhältnissen um 1965 sowie 2005. Es handelt sich also um die klimatischen Veränderungen in 29 Jahren mit einer mittleren Erwärmung von rund 1.2 °C.

Dies entspricht in etwa auch der weiteren Erwärmung bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts, welche wir nicht mehr verhindern können. Für die Schneedecke muss zusätzlich mit ähnlich starken Veränderungen gerechnet werden wie hier beschrieben. Es werden aber die Seehöhenstufe zwischen 1000 und 1500 m stärker betroffen sein als in der Vergangenheit.

Werden keine nennenswerten Klimaschutzmaßnahmen ergriffen, muss man mit einer weiteren Erwärmung von etwa 4 °C bis zum Ende des Jahrhunderts rechnen. Dies würde zu vollkommen geänderten Schneeverhältnissen in der Region führen. Grob kann man sagen, dass dann zum Höhepunkt des Winters Mitte Jänner Verhältnisse vorherrschen, wie sie derzeit etwa Mitte November vorkommen.

Auf künstlich bewirtschafteten Flächen, wie zum Beispiel auf Skipisten, hängt die vergangene und weitere Entwicklung der Schneesicherheit stark von den lokalen Gegebenheiten (Höhenlage, Mikroklima, Anzahl an Schneekanonen, verfügbare Wassermenge, Effizienz) und der weiteren technologischen Entwicklung der Beschneigungstechnik ab. Zudem sorgt der langfristige Anstieg der Wintertemperaturen in allen Höhenlagen für kürzere und seltenere Zeitfenster in denen technische Beschneigung möglich ist. Hier sind daher spezifische Studien unter Berücksichtigung der technischen Infrastruktur für die jeweiligen Skigebietsregionen notwendig.

4. Literaturverzeichnis

- Hiebl, J., and C. Frei (2016), Daily temperature grids for Austria since 1961—concept, creation and applicability, *Theor. Appl. Climatol.*, 124(1), 161-178, doi:10.1007/s00704-015-1411-4.
- Hiebl, J., and C. Frei (2018), Daily precipitation grids for Austria since 1961—Development and evaluation of a spatial dataset for hydroclimatic monitoring and modelling, *Theor. Appl. Climatol.*, 132(1-2), 327-345.
- Olefs, M., R. Koch, and A. Gobiet (2019), Klima und Schnee in Österreich – Beobachtete Vergangenheit und erwartete Zukunft, *FdSnow*, 53.
- Olefs, M., R. Koch, W. Schöner, and T. Marke (2020), Changes of Snow Depth, Snow Cover Duration and Potential Snowmaking Conditions in Austria, 1961-2020 – a Model Based Approach., *Atmosphere*, submitted.
- Schöner, W., R. Koch, C. Matulla, C. Marty, and A. M. Tilg (2019), Spatiotemporal patterns of snow depth within the Swiss-Austrian Alps for the past half century (1961 to 2012) and linkages to climate change, *International Journal of Climatology*, 39(3), 1589-1603, doi:10.1002/joc.5902.
- Student (1908), The probable error of a mean, *Biometrika*, 1-25.

5. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

- Abbildung 1: Ausschnitt der Region Pyhrn Priel wie er für die Auswertungen in dieser Studie verwendet wird. Die Einteilung der Seehöhenstufen entspricht den Seehöhenstufen der Analysen. 7
- Abbildung 2: Seehöhenverteilung der Rasterzellen von Snowgrid in der Untersuchungsregion. Rund die Hälfte des Gebietes liegt in der Höhenstufe zwischen 625 und 1125 m Seehöhe. 8
- Abbildung 3: Wahrscheinlichkeit einer Schneedecke ≥ 30 cm pro Seehöhenstufe bestimmt aus dem Snowgrid Datensatz mit 1 km Auflösung (orange) und mit 100 m Auflösung (blau). Die zeitlich und räumlich höher aufgelöste Berechnungsmethode führt zu etwas höheren Wahrscheinlichkeiten. 9
- Abbildung 4: Temperaturverlauf vom 1. November bis 30. April für die verschiedenen Höhenstufen im 30 jährigen klimatologischen Mittel 1961-1990 (links oben) sowie 1990- 2020 (rechts oben). In der unteren Reihe ist die Temperaturänderung zwischen den beiden Perioden dargestellt. Für das gesamte Winterhalbjahr beträgt die Erwärmung rund 1.2 °C 11
- Abbildung 5: Anzahl der Tage im Hochwinter (Dezember bis Februar) an denen keine geschlossene Schneedecke vorhanden ist. In der aktuellen Klimaperiode (rechts unten) kommt in Tallagen bereits in mehr als 6 Wochen keine geschlossene Schneedecke vor (dunkelbraune Gebiete). 12

- Abbildung 6: Wie Abbildung 4 nur für die Weihnachtsferien. In der aktuellen Klimaperiode (rechts unten) kommt in Tallagen bereits an 10 Tagen und damit etwa die Hälfte der Weihnachtsferien keine geschlossene Schneedecke mehr vor. 13
- Abbildung 7: Wahrscheinlichkeit für eine geschlossene Schneedecke vom 1. November bis 30. April und für Seehöhenstufen im 30-jährigen klimatologischen Mittel 1961-1990 (links oben) sowie 1990- 2020 (rechts oben). In der unteren Reihe ist die Änderung zwischen den beiden Perioden dargestellt. Für Seehöhen unter 1500 m nimmt die Wahrscheinlichkeit einer Schneedecke um rund 10 % ab, darüber lediglich um 2 %..... 14
- Abbildung 8: Anzahl der Tage im Hochwinter (Dezember bis Februar) an denen keine Schneedecke ≥ 30 cm vorhanden ist. In der aktuellen Klimaperiode (rechts unten) kommt in Tallagen bereits an mehr als 10 Wochen keine Schneedecke mit 30 cm mehr vor (hellgrüne Gebiete) und in Seehöhen um 1000 Meter sind es etwa 5 Wochen..... 15
- Abbildung 9: Anzahl der Tage in den Weihnachtsferien an denen keine Schneedecke ≥ 30 cm vorhanden ist. In der aktuellen Klimaperiode (rechts unten) kommt in Tallagen faktisch nie mehr eine Schneedecke mit 30 cm mehr vor (hellgrüne Gebiete) und in Seehöhen um 1000 Meter sind es etwa nur die Hälfte aller Tage. 16
- Abbildung 10: Wahrscheinlichkeit für eine Schneedecke ≥ 30 cm vom 1. November bis 30. April und für Seehöhenstufen im 30 jährigen klimatologischen Mittel 1961-1990 (links oben) sowie 1990- 2020 (rechts oben). In der unteren Reihe ist die Änderung zwischen den beiden Perioden dargestellt. Für Seehöhen unter 1500 m nimmt die Wahrscheinlichkeit einer Schneedecke um rund 12 % ab, darüber lediglich um 4 %..... 17
- Abbildung 11: Änderung der Anzahl an Tagen mit geschlossenen Schneedecke (links) und einer Schneedecke ≥ 30 cm pro Höhenstufe zwischen den Perioden 1961-1990 und 1990-2020 mit Angabe der Signifikanz (** $\alpha=0.1$; * $\alpha=0.25$; - = nicht signifikant)..... 18
- Abbildung 12: Abweichung des schneeärmsten und schneereichsten Winter von den mittleren Verhältnissen bezogen auf die Anzahl der Tage mit geschlossener Schneedecke im Winter (Dezember-Februar) im Zeitraum 1990 bis 2020. Die Zahlen rechts geben die Anzahl der Tage im klimatologischen Mittel. Im schneeärmsten Winter kommt unter 1000 m faktisch keine geschlossene Schneedecke mehr zusammen. Im schneereichsten liegt hingegen den ganzen Winter eine Schneedecke..... 19
- Abbildung 13: Abweichung des schneeärmsten und schneereichsten Winter von den mittleren Verhältnissen bezogen auf die Anzahl der Tage mit einer Schneedecke ≥ 30 cm im Winter (Dezember-Februar) im Zeitraum 1990 bis 2020. Die Zahlen rechts geben die Anzahl der Tage im klimatologischen Mittel an. Im schneeärmsten Winter kommt unter 1500 m faktisch keine Schneedecke ≥ 30 mehr vor. Im schneereichsten kommt hingegen sogar in den Tallagen an mehr als 70 Tagen eine derartige Schneedecke vor. 20
- Abbildung 14: Standardabweichung der Tage mit einer geschlossenen Schneedecke (links) und eine Schneehöhe ≥ 30 cm im Winter (Dezember-Februar) und den Höhenstufen für 4 Klimaperioden. 21

- Abbildung 15: Standardabweichung der Tage mit einer geschlossenen Schneedecke (links) und eine Schneehöhe ≥ 30 cm in den Weihnachtsferien und den Höhenstufen für 4 Klimaperioden. 21
- Abbildung 16: Korrelation zwischen der Tage mit einer Schneedecke (links 5 cm, rechts 30 cm) und der Mitteltemperatur im Winter (Dezember-Februar) in Abhängigkeit zur Seehöhe und für 4 Klimaperioden. Die Schneelage ist für beide Schwellwerte bis zu eine Seehöhe von 1750 m stark antikorreliert (~ -0.5), wobei die Abhängigkeit der Schneedecke von der Temperatur abgesehen von der tiefsten und der höchsten Seehöhenstufe stark zugenommen hat. 22
- Abbildung 17: Korrelation zwischen der Tage mit einer Schneedecke (links 5 cm, rechts 30 cm) und der Niederschlagssumme im Winter (Dezember-Februar) in Abhängigkeit zur Seehöhe und für 4 Klimaperioden. Die Schneelage ist für beide Schwellwerte bis zu eine Seehöhe von 1750 m positiv korreliert, wobei die Abhängigkeit bei einer Schneedecke ≥ 30 deutlich stärker ist. Hier scheint jedoch der Zusammenhang durch die Erwärmung schwächer zu werden, was für eine geschlossene Schneedecke jedoch nicht stimmt. 22
- Abbildung 18: Anteil von Schnee am Gesamtniederschlag vom 1. November bis 30. April und für Seehöhenstufen im 30 jährigen klimatologischen Mittel 1961-1990 (links oben) sowie 1990- 2020 (rechts oben). In der unteren Reihe ist die Änderung zwischen den beiden Perioden in Prozentpunkten dargestellt. Für Seehöhen unter 1500 m nimmt der Schneeanteil um rund 11 % ab, darüber lediglich um 5 %. Die stärksten Änderungen sind in den Tieflagen Anfang März und in den Hochlagen im April. 23