



Studie zur vergangenen und zukünftigen Schneedeckenentwicklung im Skigebiet Brunnalm - Hohe Veitsch

Roland Koch, Andreas Gobiet und Marc Olefs
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Österreich
Kontakt: roland.koch@zamg.ac.at

1. Oktober 2020



Inhaltsverzeichnis

1	Skigebiet Brunnalm - Hohe Veitsch	5
2	SNOWGRID: Operationelle Modellierung der Schneehöhe	5
3	SNOWGRID-CL: Flächendeckende Schneeklimatologie	6
3.1	Validierung: Modellsimulationen vs. manuelle Schnee-Beobachtungen	6
4	Modellierung von technischer Schneeproduktion	8
4.1	Berechnung von Beschneigungszeiten über die Feuchtkugeltemperatur	8
4.2	Berechnung der Schneileistung	8
5	Emissionsszenarien	9
5.1	Emissionsszenarien für Österreich	9
5.1.1	Erklärung relevanter Begriffe	10
5.1.2	Beispiel: Projizierte Verläufe am Punkt Piste FIS (1230 m)	11
5.1.3	Zukünftiges Klimaänderungssignal	12
6	Beschreibung der Simulationen	13
6.1	Modellannahmen in der technischen Schneeproduktion und methodischer Ablauf	13
6.2	Konfiguration und verwendete Punkte innerhalb des Skigebietes	13
6.3	Unsicherheiten in der Modellierung der technischen Schneeproduktion	15
7	Beschreibung der Indikatoren	16
7.1	Schneeindikatoren	16
7.2	Temperatur und Niederschlag: MASH-Analyse	16
8	HISTALP: Vergangener Verlauf der saisonalen Lufttemperatur an der Station Schöckl	17
9	Ergebnisse	18
9.1	Vergangenheit: 1962 bis 2019	18
9.1.1	Zeitliche Verläufe der Gesamtschneehöhe und Schneedeckendauer im Überblick	18
9.1.2	Anomalien bezüglich der Referenzperiode 1981 bis 2010	19
9.1.3	Vergleich Naturschnee mit Naturschnee plus technische Schneeproduktion	22
9.1.4	Anzahl der möglichen Beschneistunden	24
9.1.5	Temperatur und Niederschlag: MASH-Analyse	26
9.1.6	Monatliche Änderungen in der Vergangenheit: Vergleich der Zeitperioden 1962 bis 1990 und 1991 bis 2019	29
9.1.7	Schneedeckenzuwachs in der jüngeren Vergangenheit	31
9.1.8	Änderungen in der Vergangenheit: Signifikanzprüfung	32
9.1.9	Periode 1991 bis 2019: Naturschnee versus technische Schneeproduktion	37
9.2	Zukunft: 1972 bis 2099	39
9.2.1	Zeitlicher Verlauf der Emissionsszenarien bis in die ferne Zukunft	39
9.2.2	Zeitlicher Verlauf der Anzahl der möglichen Beschneistunden bis in die ferne Zukunft	47
9.2.3	Emissionsszenario RCP8.5: Naturschnee und technische Schneeproduktion	49
9.2.4	Monatliche Änderungen in der Zukunft: Vergleich der Zeitperioden 1972 bis 2001 und 2021 bis 2050	51
9.2.5	Monatliche Änderungen in der Zukunft: Vergleich der Zeitperioden 1972 bis 2001 und 2070 bis 2099	55

9.2.6	Zeitlicher Verlauf der Schneeproduktionsstunden bis in die ferne Zukunft	60
9.2.7	Zukünftiges Klimaänderungssignal: Signifikanzprüfung	63
9.2.8	RCP8.5: Klimaänderungssignal für die nahe Zukunft 2021 bis 2050	64
9.2.9	RCP8.5: Klimaänderungssignal für die ferne Zukunft 2070 bis 2099	70
9.2.10	RCP2.6: Klimaänderungssignal für die ferne Zukunft 2070 bis 2099	76
10	Zusammenfassung	82
10.1	Vergangenheit	82
10.2	Zukunft	83
10.2.1	RCP8.5: nahe Zukunft 2021 bis 2050	83
10.2.2	RCP8.5 vs. RCP2.6: ferne Zukunft 2070 bis 2099	83
11	Literatur	85

1 Skigebiet Brunnalm - Hohe Veitsch

Im Zuge der Auftragsstudie werden für das Skigebiet Brunnalm - Hohe Veitsch im Mürztal (Abbildung 1) die täglichen Schneehöhen, basierend auf natürlichem und technisch produziertem Schnee, für den Zeitraum 1961 bis 2019, sowie für die nahe Zukunft (bis 2050) und ferne Zukunft (bis 2100) modelliert. Im Fokus der Auswertungen steht hierbei die für den Wintertourismus relevante Saison von Anfang November bis Ende April. Die Berechnungen unterschiedlicher Schneeeindizes sollen folglich einen guten Überblick über die Schneesituation seit 1961 in dem Skigebiet liefern. Des Weiteren werden Temperatur und Niederschlag untersucht, um Aussagen über die vergangenen und zukünftigen winterlichen Bedingungen treffen zu können.



Abbildung 1: Geographische Lage des Skigebietes Brunnalm - Hohe Veitsch im Mürztal (Quelle: Google Maps).

2 SNOWGRID: Operationelle Modellierung der Schneehöhe

Das physikalisch basierte und räumlich verteilte Schneedeckenmodell SNOWGRID (Olefs et al., 2013) wurde an der ZAMG entwickelt. Im operationellen Betrieb liefert das Modell Schneedaten in sehr hoher räumlicher (100 m horizontaler Gitterpunktsabstand) und zeitlicher (15 Minuten Zeitschritt) Auflösung.

Abhängig vom Modus wird SNOWGRID mit zwei Arten von meteorologischen Gitterdaten angetrieben. Der Analysemodus liefert Daten in naher Echtzeit (Abbildung 2) und verwendet operationelle Daten von INCA (Integrated Now Casting and Analysis system; Haiden et al., 2011). Der 72-Stunden Vorhersagemodus basiert auf Daten der NWP Modelle ECMWF und AROME (Wang et al., 2006; Seity et al., 2010), wobei AROME ebenfalls operationell an der ZAMG betrieben wird.

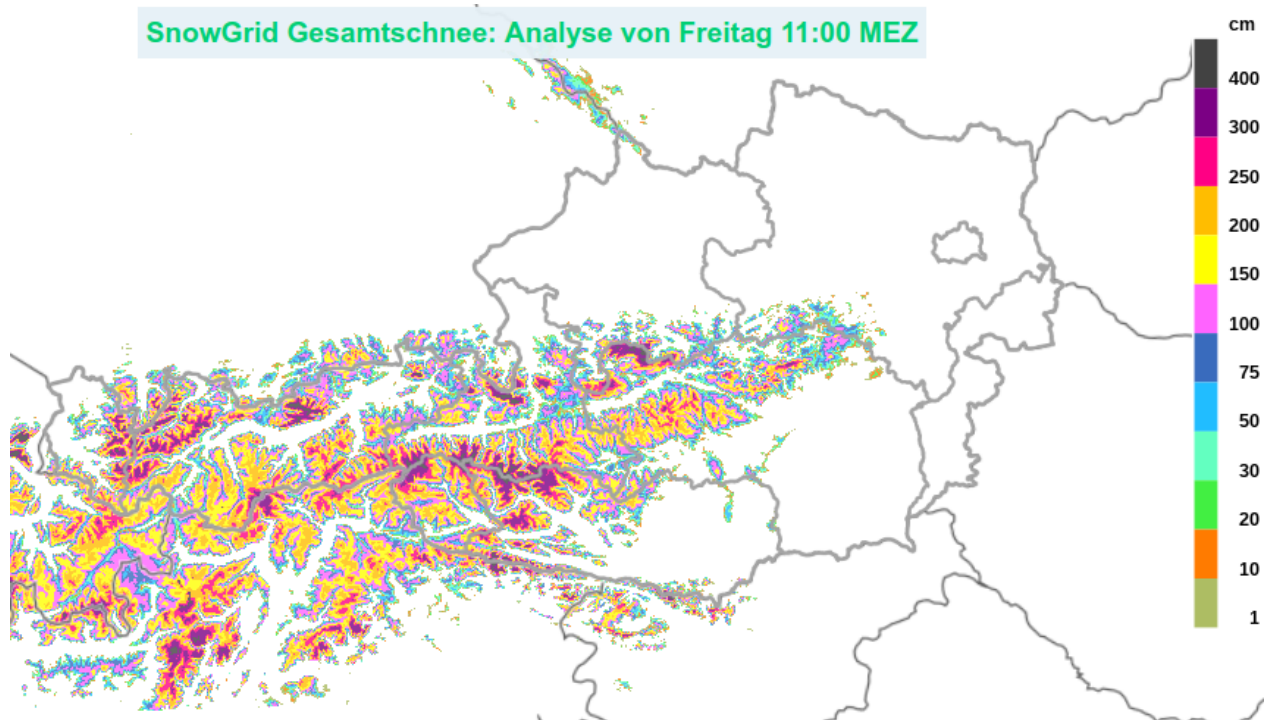


Abbildung 2: SNOWGRID Analyse der Gesamtschneehöhe gültig für den 20. März 2020, 1100 MEZ.

3 SNOWGRID-CL: Flächendeckende Schneeklimatologie

Zur Erstellung einer flächendeckenden Schneeklimatologie seit 1961 wurde das Schneedeckenmodell SNOWGRID-CL entwickelt (Klimaversion des operationellen SNOWGRID Modells). Hierbei handelt es sich um ein erweitertes Gradtag-Modell, welches zusätzlich die Globalstrahlung auf die reale Fläche (komplexes Gelände) und die Oberflächenalbedo berücksichtigt (Pellicciotti et al., 2005). Das Modell wird auf Tagesbasis mit den gegitterten SPARTACUS Beobachtungsdatensätzen der Minimum- und Maximumtemperatur (Hiebl und Frei, 2016), des Niederschlags (Hiebl und Frei, 2017) und der Evapotranspiration (Haslinger und Bartsch, 2016) angetrieben. Die Ergebnisse sind tägliche Gitterdatensätze der Gesamtschneehöhe und des Gesamt-Schneewasseräquivalents (SWE) seit 1961 mit einer räumlichen Auflösung von 1 km x 1 km.

Für die Modellierung der Schneehöhen im Skiegebiet wurde die Klimaversion SNOWGRID-CL verwendet. Aus den Simulationsergebnissen lassen sich Schneeindizes wie zum Beispiel die saisonal gemittelte Gesamtschneehöhe, oder Schneedeckendauer berechnen.

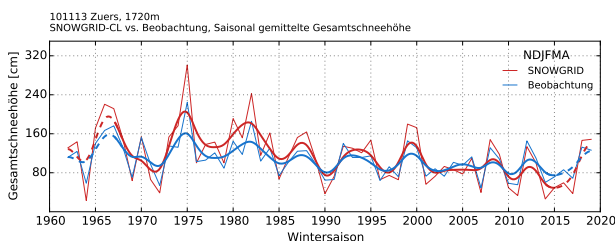
3.1 Validierung: Modellsimulationen vs. manuelle Schnee-Beobachtungen

Die Validierung der SNOWGRID-CL Simulationen ist eine wichtige und notwendige Voraussetzung. Dabei liegt der Schwerpunkt auf dem Vergleich von simulierter und tatsächlich gemessener Größen (z.B. tägliche Gesamtschneehöhe), um den Modellierungsfehler besser einschätzen zu können. Abbildung 3 zeigt den qualitativen Vergleich zwischen modellierten und beobachteten Schneeindikatoren für unterschiedliche Klima-Stationen. Grundsätzlich besteht zwischen den Beobachtungen und Modellergebnissen eine gute Übereinstimmung. Teilweise wird die mittlere Gesamtschneehöhe in einzelnen Jahren in der Modellierung überschätzt. Auch zeigt sich für Villacher Alpe in über 2000 m Seehöhe, dass weniger Schnee beobachtet worden ist. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass speziell in höheren Lagen der Windeinfluss

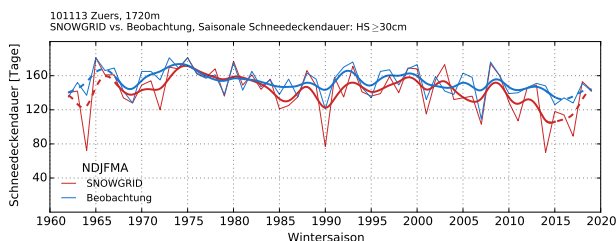
beim saisonalen Schneedeckenzuwachs eine wichtige Rolle spielen kann. Dieser Windeinfluss wird in der Modellierung parametrisiert. Auch kann bei Niederschlagsereignissen (Warmfront- Kaltfrontdurchgang, Fronten von Mittelmeertiefs) die Schneefallgrenze innerhalb kurzer Zeit deutlich schwanken. Diese kurzfristigen Temperaturschwankungen werden in den verwendeten Eingangsdaten (SPARTACUS) nicht abgebildet. Der Vergleich der Schneedeckendauer (hier: Anzahl der Tage mit einer täglichen Gesamtschneehöhe größer gleich 30 cm) zeigt eine gute qualitative und quantitative Übereinstimmung zwischen den Modellergebnissen und den Beobachtungen (Abbildung 3, rechte Spalte). Zusammenfassend werden Tendenzen vom Modell gut wiedergegeben. Der Vergleich mit 85 Klimastationen vom Hydrographischen Zentralbüro (HD) und der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) liefert eine hohe Korrelation für die Gesamtschneehöhe und die Schneedeckendauer (mittlerer Korrelationskoeffizient $R \geq 0.8$, Zeitraum 1962 bis 2019). Aufgrund der Unsicherheiten in den Eingangsdaten und Annahmen in der Modellierung kann eine eins zu eins Korrespondenz zwischen Beobachtung und Modell nicht erwartet werden. Der qualitative Vergleich verdeutlicht jedoch, dass die beobachteten zeitlichen Verläufe bzw. Tendenzen vom Modell meist gut wiedergegeben werden.

HD Zürs (1720 m)

mittlere Gesamtschneehöhe HS

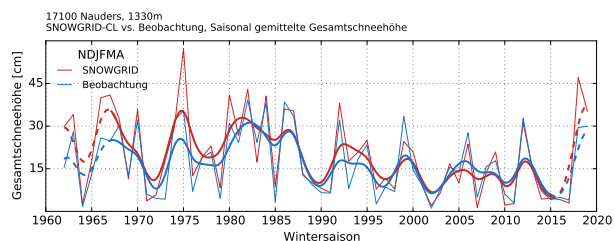


Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm

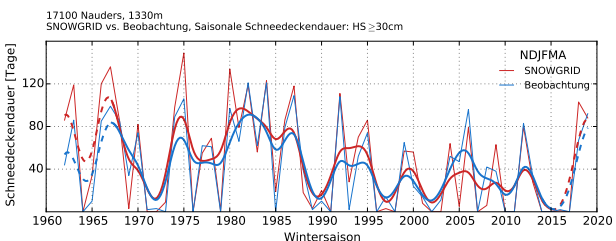


ZAMG Nauders (1330 m)

mittlere Gesamtschneehöhe HS

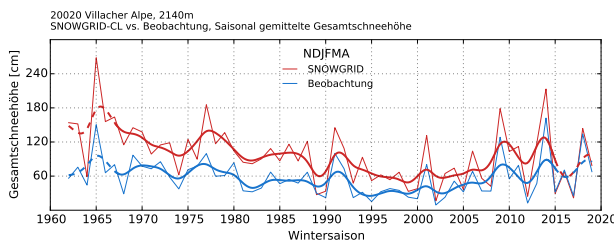


Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm



ZAMG Villacher Alpe (2140 m)

mittlere Gesamtschneehöhe HS



Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm

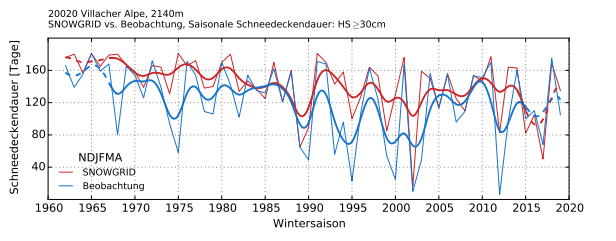


Abbildung 3: Vergleich saisonaler Schneeindikatoren (Naturschnee) basierend auf SNOWGRID-CL Simulationsergebnissen (rot) und Beobachtungen (blau) für die Klima-Stationen Zürs (oben, HD), Nauders (Mitte, ZAMG) und Villacher Alpe (unten, ZAMG). Die Zeitreihen sind mit einem Gauss-Tiefpassfilter mit einer Fensterbreite von 11 Jahren geglättet (dick ausgezogene Linien). Die Wintersaisonen umfassen die Monate November bis einschließlich April (NDJFMA). Die Schneedeckendauer ist hier definiert als die Anzahl der Tage, an denen die Schneehöhe HS mindestens so groß ist wie 30 cm.

4 Modellierung von technischer Schneeproduktion

In der technischen Beschneigung spielen Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit eine wesentliche Rolle. Ein Maß, das beide meteorologischen Elemente kombiniert, ist die sogenannte Feuchtkugeltemperatur T_f . Diese ist die niedrigste Temperatur, die sich durch Verdunstungsabkühlung erreichen lässt. Die Temperaturabsenkung ist dabei umso größer, je trockener die Umgebungsluft ist. Für die Schneeproduktion bedeutet das, dass die produzierte Schneemenge mit steigender Temperatur sinkt, um die erforderliche (Schnee-)Qualität einhalten zu können.

4.1 Berechnung von Beschneigungszeiten über die Feuchtkugeltemperatur

Für die Berechnung der Beschneigungszeiten über die Feuchtkugeltemperatur T_f wurde die in Hofstätter, 2008, vorgestellte Methode FPOL verwendet. Diese Methode erlaubt es, über die täglichen SPARTACUS Minimum- und Maximumtemperaturen für jeden Tag einen gereihten 24-Stunden-Verlauf (ansteigend sortierter Tagesgang vom Minimum zum Maximum) der Feuchtkugeltemperatur zu ermitteln. Für die Berechnung der Feuchtkugeltemperatur ist weiters die relative Luftfeuchtigkeit erforderlich. Diese wurde hierbei über Monatsmittelwerte, jeweils für Berg- oder Tallage (Höhe ≤ 1600 m) parametrisiert.

Mit dieser Methode ist es somit möglich, jene Zeiten eines Tages zu bestimmen, an denen die Schneeproduktion wirtschaftlich und effizient ist. Es können somit die Stunden eines Tages gezählt werden, an denen die Feuchtkugeltemperatur T_f kleiner als ein vordefinierter Schwellwert (z.B. $T_f \leq -6^\circ\text{C}$) ist. In weiterer Folge lässt sich über die berechnete Feuchtkugeltemperatur die Schneileistung für Propellermaschinen und Schneilanzen bestimmen.

4.2 Berechnung der Schneileistung

Im Skigebiet werden Propellermaschinen (PPF) und Schneilanzen (PPAW) verwendet. In der Modellierung wird der technische Schnee vereinfacht nur für Propellermaschinen berücksichtigt. Hierbei wird die Schneileistung als Funktion der berechneten Feuchtkugeltemperatur T_f abgeleitet (Olefs et al., 2010). Für Propellermaschinen ergibt sich bei einer Feuchtkugeltemperatur von -6°C eine Schneileistung von ca. $32 \text{ m}^3/\text{h}$, und für Schneilanzen eine Schneileistung von ca. $20 \text{ m}^3/\text{h}$ (Abbildung 4).

Über den gereihten 24-Stunden Verlauf der Feuchtkugeltemperatur lässt sich somit die Schneileistung für jeden Tag in Abhängigkeit eines definierten Schwellwertes ermitteln. Unter Verwendung einer bestimmten Kunstschneedichte kann der Wasserverbrauch pro Zeiteinheit abgeleitet werden.

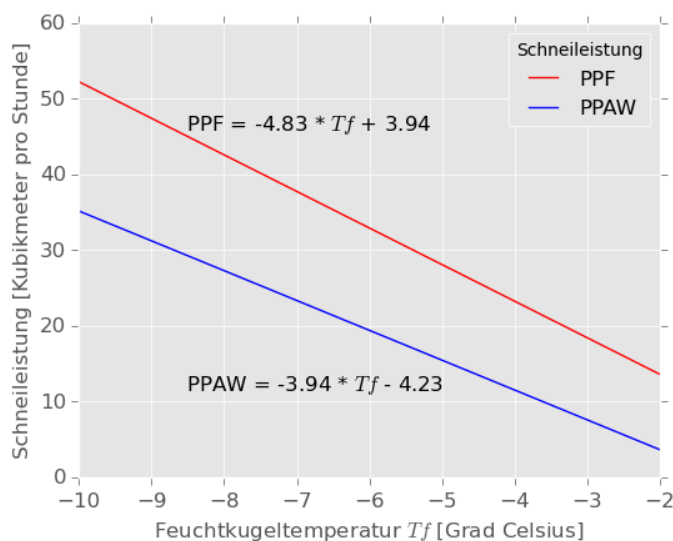


Abbildung 4: Schneileistung als Funktion der Feuchtkugeltemperatur T_f für Propellermaschinen (PPF) und Schneilanzen (PPAW).

5 Emissionsszenarien

Emissionsszenarien (Klima-Szenarien) sind im Allgemeinen Repräsentationen von möglichen zukünftigen Zuständen des Klimas, basierend auf den Modelllösungen von numerischen Klimamodellen. Um die Auswirkungen von sogenannten Emissionsszenarien (RCP - Representative Concentration Pathways) global zu beschreiben, werden den (globalen) Klimamodellen Randbedingungen vorgegeben. Diese Randbedingungen beinhalten unterschiedliche Konzentrationen klimawirksamer Treibhausgase und Aerosole. Die RCPs werden durch ihren Strahlungsantrieb (radiative forcing) bis Ende des 21. Jahrhunderts unterschieden.

Im Emissionsszenario **RCP8.5** (kein Klimaschutz, worst-case Szenario) wird angenommen, dass der Anstieg der Treibhausgasemissionen kontinuierlich steigen wird, sodass die Zufuhr von anthropogenen Treibhausgasen zu einem Strahlungsantrieb von $8,5 \text{ Wm}^{-2}$ im Jahr 2100 führt, relativ zum vorindustriellen Jahr 1750. Der Treibhausgasausstoß ist ungebremst (3fach-erhöhte Treibhausgaskonzentration bis 2100 im Vergleich zu heutigen Verhältnissen).

Im Gegensatz dazu werden im **RCP4.5** Emissionsszenario (begrenzt Klimaschutz-Szenario) klimapolitische Maßnahmen berücksichtigt, welche die Treibhausgasausstöße bis 2070 unter den momentan beobachteten Wert senkt, und zu einem reduzierten Strahlungsantrieb von $4,5 \text{ Wm}^{-2}$ führt. Die Maßnahmen führen zwar zu einer Eindämmung der Emissionen, dennoch steigt der Gehalt in der Atmosphäre bis ca. 2070.

Das klimafreundliche Szenario **RCP2.6** ist gekennzeichnet von ehrgeizigen Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen und führt zu einem gemäßigten Strahlungsantrieb von $2,6 \text{ Wm}^{-2}$ bis ins Jahr 2100. Aufgrund der konsequenten Klimapolitik wird die Zunahme der anthropogenen Treibhausgase in der Atmosphäre bis ca. 2040 / 2050 gestoppt. Einzig bei RCP2.6 wird das 2°C Ziel (Pariser Klimaabkommen 2016) erreicht.

Aufgrund der groben horizontalen Auflösung von globalen Klimamodellen, werden regionale Klimamodelle (RCMs) mit einer höheren räumlichen Auflösung in das globale Klimamodell eingebettet. Das regionale Klimamodell wird folglich vom globalen Modell angetrieben (Nesting oder dynamic downscaling). Regionale Klimaprojektionen können jedoch keine detaillierte Vorhersage des regionalen zukünftigen Klimas liefern. Vielmehr zeigen sie mögliche zukünftige Klimaentwicklungen auf. Des Weiteren sind Lösungen von numerischen Modellen im Allgemeinen mit Unsicherheiten behaftet. Im Hinblick auf regionale Klimamodelle hängt die Güte der regionalen Klimaprojektionen sowohl von den Fehlern des Regionalmodells (Modellfehler) als auch von den verwendeten Anfangsbedingungen ab. Zur Schätzung dieser Unsicherheiten wird im Allgemeinen ein Ensemble an regionalen Klimamodellen (Klimaszenarien) verwendet. Das heißt, es werden viele Modellsimulationen mit verschiedenen Klimamodellen zusammengefasst. Der Ensemble-Ansatz lässt Aussagen über die Bandbreite (Unsicherheit) zu. Darüber hinaus können nichtlineare Wechselwirkungen zwischen den in der Modellierung abgebildeten Komponenten des Klimasystems (Atmosphäre, Ozean, Eis- und Schneebedeckung, Boden und Vegetation) zur Unsicherheit beitragen und die Bandbreite erhöhen (modellerte, natürliche Klimavariabilität).

5.1 Emissionsszenarien für Österreich

Im Rahmen der Projekte ÖKS15 - Klimaszenarien für Österreich (Chimani et al., 2016) und Starc-Impact wurden gegitterte Klimadaten und Emissionsszenarien für die österreichische Klimaforschung aufbereitet. Das in diesen Projekten verwendete Ensemble besteht für die beiden Klima-Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 aus 16 EURO-CORDEX (www.euro-cordex.net) Klimamodellen (Ensemble-Mitglieder) und für RCP2.6 aus 8 Klimamodellen. Die horizontale Auflösung der EURO-CORDEX Ensemble-Simulationen beträgt 12,5 km. Die Daten der regionalen Klimamodelle aus der EURO-CORDEX Initiative wurden in einem ersten Schritt auf das Gitter der SPARTACUS-Beobachtungsdaten (1 km horizontale Gitterweite) interpoliert. Danach wurden systematische Abweichungen zu den Beobachtungen (Bias) pro RCM mit Hilfe des sogenannten Scaled Distribution Mappings (Switanek et al., 2017) entfernt. Dies geschieht für jede Gitterzelle. Räumliche Korrelationen wurden nicht berücksichtigt. Die Bias-Korrektur der Temperatur erfolgte über den Beobachtungsdatensatz SPARTACUS (Hiebl und Frei, 2016), und der Niederschlagssumme über den Beobachtungsdatensatz GPARD1 (Hofstätter et al., 2015). Die Kontrollläufe (historical runs, historische Läufe) der Emissionsszenarien RCP2.6, RCP4.5

und RCP8.5 sind grundsätzlich bis 2005 gleich. Diese werden mit der beobachteten natürlichen und anthropogenen Treibhausgaszusammensetzung angetrieben. Allgemein sollten nur lange Zeitperioden (z.B. Mittel über 30 Jahre, 1972 bis 2001) betrachtet und verglichen werden, da diese Läufe nicht mit dem tatsächlich beobachteten Klima synchronisiert sind (keine Assimilation von Beobachtungsdaten). Die Simulationen der Emissionsszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 beginnen ab 2006 (Zukunftsläufe). Durch die in ÖKS15 / Starc-Impact angewendete Bias-Korrektur sind die Kontrollläufe jedoch nicht deckungsgleich. In dieser Studie werden die gegitterten Klimadatensätze aus ÖKS15 und Starc-Impact verwendet. Es ist zu beachten, dass beim Ensemble-Ansatz keine "beste Modellkombination" gibt. Die einzelnen zukünftigen Emissionsszenarien der RCMs sind stark von den Anfangs- und Randbedingungen (globaler Antrieb) abhängig. Die Bandbreite an Ergebnissen ist somit ein Maß für die Unsicherheit, und muss bei der Interpretation von Klimaprojektionen berücksichtigt werden.

5.1.1 Erklärung relevanter Begriffe

1. Ensemble-Ansatz, Ensemble aus Simulationen (Klimamodellen):
Klimamodelle werden in einem Ensemble kombiniert, um die Bandbreite möglicher zukünftiger Zustände des Klimas abzubilden.
2. Ensemble-Mittelwert:
Der Ensemble-Mittelwert ist der über alle Simulationen des Ensembles gemittelte Wert eines meteorologischen Parameters (Temperatur, Schneehöhe,...).
3. Ensemble-Median (50% Perzentil):
Der Ensemble-Median eines bestimmten Parameters ist der Wert in der Mitte, wenn die Simulationslösungen nach der Größe geordnet werden. Folglich sind 50% der Simulationsergebnisse der Klimamodelle kleiner oder gleich dem Median und 50% der Simulationsergebnisse sind größer oder gleich dem Median.
4. Ensemble 90% Perzentil:
90% aller Simulationsergebnisse der Klimamodelle liegen unterhalb dieses Wertes, 10% liegen oberhalb.
5. Ensemble 10% Perzentil:
10% aller Simulationsergebnisse der Klimamodelle liegen unterhalb dieses Wertes, 90% liegen oberhalb.
6. „Ausreißer“ (Klimamodellsimulationen, die stark von allen anderen Modellsimulationen abweichen) werden bei der Darstellung über das 10% und 90% Perzentil nicht berücksichtigt.
7. Ensemble-Maximum:
Das Ensemble-Maximum ist der größte Wert der Simulationsergebnisse des Ensembles.
8. Ensemble-Minimum:
Das Ensemble-Minimum ist der kleinste Wert der Simulationsergebnisse des Ensembles.
9. Maximale Bandbreite:
Die maximale Bandbreite (Spannbreite) der Simulationsergebnisse (maximale Bandbreite möglicher zukünftiger Zustände des Klimas) ergibt sich über das Ensemble-Minimum und Ensemble-Maximum. Diese Bandbreite umfasst somit auch die „Ausreißer“ nach oben und nach unten.

5.1.2 Beispiel: Projizierte Verläufe am Punkt Piste FIS (1230 m)

Die Abbildung 5 zeigt beispielhaft den Verlauf der saisonalen (Dezember, Jänner und Februar, DJF) Niederschlagssumme und Mitteltemperatur der drei Emissionsszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 am Punkt Piste FIS (1230 m) bis ins Jahr 2099. Die Bandbreite der Simulationsergebnisse wird über das 10 und 90% Perzentil angegeben. Zusätzlich sind die 30-Jährigen mittleren Zustände, bezüglich der Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099, dargestellt. Die Schwankungsbreite der Beobachtung SPARTACUS (Temperatur) bzw. der Niederschlagssumme (GPARD1) wird über die Standardabweichung (σ , Streuung um den Mittelwert) angegeben. In den Abbildungen spannt die Schwankungsbreite einen Bereich "Mittelwert plus/minus einer Standardabweichung" auf (68% der Beobachtungsdaten liegen innerhalb dieses Bereiches). Tendenziell nimmt die winterliche Niederschlagssumme bis 2099 zu, wobei die drei Emissionsszenarien einen ähnlichen Verlauf zeigen. Alle drei Klima-Szenarien eine Zunahme der winterlichen Mitteltemperatur bis 2050. Aufgrund der Langlebigkeit der klimawirksamen Treibhausgase (z.B. CO₂) in der Atmosphäre und der Trägheit des Klimasystems sind die Verläufe der drei Klima-Szenarien bis Mitte des Jahrhunderts ähnlich. Ab 2050 ist ein Auseinanderdriften der Emissionsszenarien ersichtlich. Dies ist damit zu erklären, dass sich klimapolitische Maßnahmen zeitverzögert bemerkbar machen. Die stärkste Temperaturzunahme liefert erwartungsgemäß Emissionsszenario RCP8.5 (worst-case Szenario).

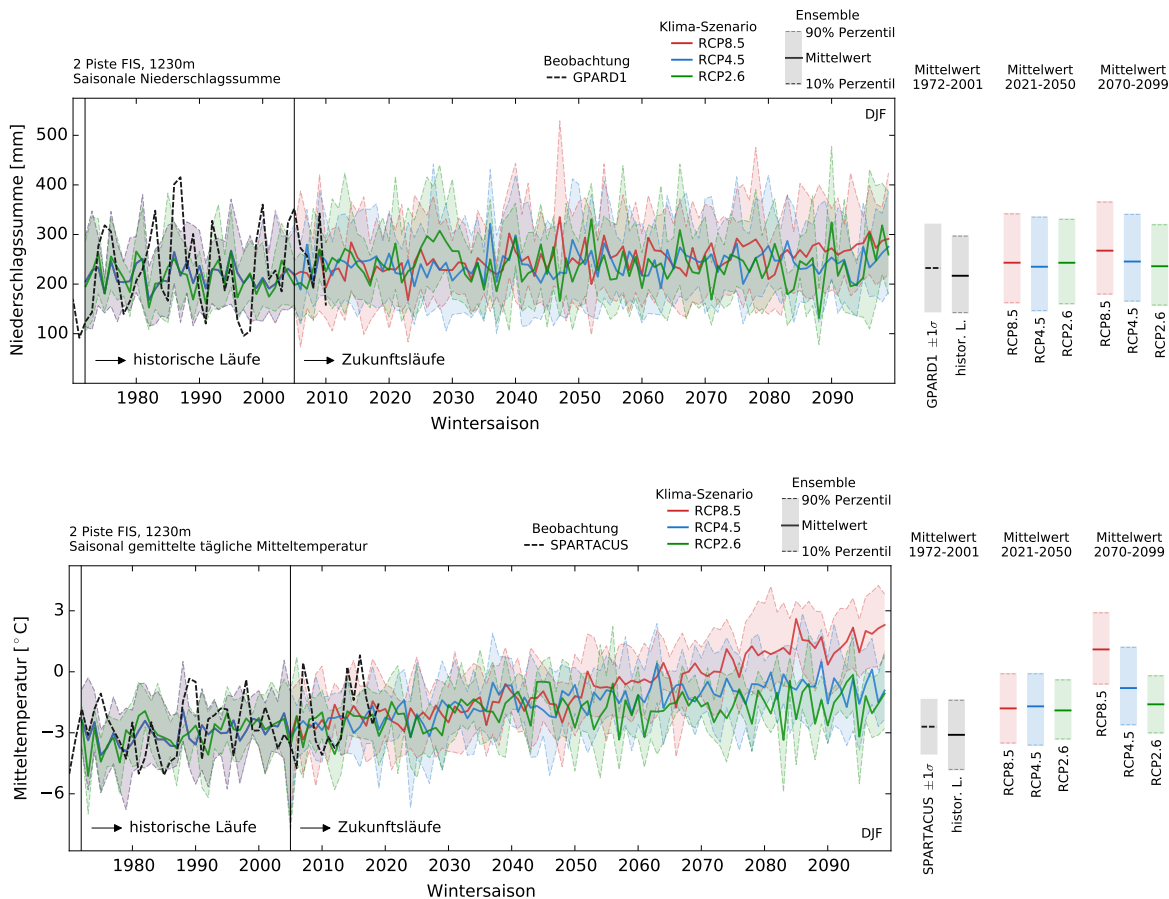


Abbildung 5: Linienverläufe der saisonalen (Dezember, Jänner und Februar, DJF) Niederschlagssumme (oben) und der Mitteltemperatur (unten) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 , RCP4.5 und RCP8.5 an dem Punkt Piste FIS (1230 m) bis ins Jahr 2099. Die dicken Linien stellen den Mittelwert der Simulationen dar (Ensemble-Mittelwert). Schattierte Flächen umfassen das 10 und 90% Perzentil des Modell-Ensembles (Bandbreite, Spannbreite, Unsicherheit). Historische Läufe bis 2005, ab 2006 beginnen die Zukunftsläufe. Die Zeitreihe, basierend auf den Beobachtungsdatensatz SPARTACUS/GPARD1, ist in schwarz dargestellt. 30-Jährige Mittelwerte, bezüglich der Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099, sind rechts abgebildet.

5.1.3 Zukünftiges Klimaänderungssignal

Das zukünftige Klimänderungssignal ist die Differenz der Mittelwerte zweier 30-Jähriger Zeiträume. In dieser Studie sind die Zeiträume 2021 bis 2050 (nahe Zukunft), 2070 bis 2099 (ferne Zukunft) und 1972 bis 2001 (Referenzperiode, historische Periode). Das zukünftige Änderungssignal wird in zwei Schritten berechnet. Zuerst wird für jede Klimasimulation (Ergebnis jedes einzelnen Ensemble-Mitglieds) die Differenz der Mittelwerte der z.B. Wintersaisonen (oder Wintermonate) 2021 bis 2050 und 1972 bis 2001 berechnet. Der Mittelwert (oder auch Median) dieser Differenzwerte ergibt schlußendlich das Klimaänderungssignal des Ensembles. Die Bandbreite des Ensembles wird über das Ensemble-Maximum und Ensemble-Minimum, beziehungsweise über die 10% und 90% Perzentile angegeben. In Tabelle 1 ist die Berechnung des zukünftiges Klimaänderungssignals näher erklärt.

Tabelle 1: Klima-Szenario RCP8.5: Berechnung des zukünftiges Klimaänderungssignals aus den einzelnen Modellsimulationen der saisonal gemittelten (Dezember, Jänner und Februar, DJF) täglichen Mitteltemperatur am Punkt Piste FIS (1230 m). Das Ensemble für RCP8.5 umfasst 16 regionale Klimamodelle. Die Spalte 'Periode P1' gibt die Mittelwerte der einzelnen regionalen Klimamodelle für die Periode 1972 bis 2001 an, Spalte 'Periode P2' die Mittelwerte für die Periode 2021 bis 2050. Die Spalte 'Differenz' ergibt sich aus der Differenz der Spaltenwerte von 'Periode P2' und 'Periode P1'. Minimum, Maximum, Median, Mittelwert und die Perzentile ergeben sich aus den Spaltenwerten von Spalte 'Differenz'. Das zukünftige Klimaänderungssignal ist der Mittelwert (oder auch Median) der Spalte 'Differenz'. Hier: Das zukünftige Klimaänderungssignal beträgt 1,3°C (mittlere Zunahme von 1,3°C im Vergleich zur Periode 1972 bis 2001).

		Temperatur [°C]				
		Periode P1	Periode P2	Differenz		
		1972 bis 2001	2021 bis 2050	P2 minus P1		
Klimamodell						
Modell 5		-3,3	-1,6	1,7		
Modell 4		-3,0	-2,1	0,9		
Modell 7		-3,0	-0,8	2,2		
Modell 6		-3,2	-1,6	1,6		
RCP8.5 Ensemble Mitglieder	Modell 1	-3,3	-2,6	0,7	Maximum:	2,4°C
	Modell 3	-3,3	-1,8	1,5	Minimum:	0,5°C
	Modell 2	-3,3	-2,3	1,0	Median:	1,3°C
	Modell 9	-3,1	-1,7	1,4	Mittelwert:	1,3°C
	Modell 8	-3,1	-1,8	1,3	90% Perzentil:	2,0°C
	Modell 15	-3,1	-2,0	1,1	10% Perzentil:	0,7°C
	Modell 14	-2,9	-2,4	0,5		
	Modell 16	-3,1	-1,5	1,6		
	Modell 11	-2,9	-0,5	2,4		
	Modell 10	-2,8	-1,1	1,7		
	Modell 13	-3,1	-2,2	0,9		
	Modell 12	-2,9	-2,3	0,6		

6 Beschreibung der Simulationen

In der SNOWGRID-CL Schneedeckenmodellierung wird die tägliche Gesamtschneehöhe über die tägliche Niederschlags- und Mitteltemperatur modelliert. Die Mitteltemperatur wird berechnet über die tägliche Minimum- und Maximumtemperatur:

$$T_{Mittel} = \frac{(T_{Min} + T_{Max})}{2}. \quad (1)$$

Die Modellierung umfasst für die Vergangenheit (SPARTACUS gegitterter Beobachtungsdatensatz) den Zeitraum 1. Oktober 1961 bis 31. August 2019, und die Periode 1. Oktober 1971 bis 31. August 2099 für die Klima-Szenarien RCP8.5, RCP4.5 und RCP2.6. Es werden monatliche und saisonale (November bis einschließlich April) durchgeführt.

6.1 Modellannahmen in der technischen Schneeproduktion und methodischer Ablauf

Der Effizienzverlust der Schneerzeuger aufgrund von Wind und Verdunstung während der Produktion beträgt 25%. Dies bedeutet, dass die berechnete Schneileistung pro Schneerzeuger mit 0,75 multipliziert werden muss.

Die maximale tägliche Schneileistung SPP [$\text{m}^3/\text{Produktionsstunden}$] an einem Gitterpunkt mit Beschneigung ist definiert als:

$$SPP = \sum_{h=1}^{h=24} \text{Schneileistung}(Tf_h \leq Tf^*), \quad (2)$$

wobei Tf^* der Schwellwert der Feuchtkugeltemperatur ist, ab der die Beschneigung aktiviert wird. Die täglichen Produktionsstunden sind die Summe der Stunden, an denen $Tf \leq Tf^*$ ist.

Während der Simulation wird zuerst für jeden Tag die natürliche Schneehöhe an allen Gitterpunkten modelliert. Danach erfolgt die Berechnung von SPP an jedem Gitterpunkt mit Beschneigung. Die Dichte des Kunstsnees beträgt in der Modellierung vereinfacht 400 kgm^{-3} . Die Höhe des technischen Schnees in Abhängigkeit der Produktionsstunden ergibt sich als Quotient von SPP und der modellspezifischen Einheitsfläche (10000 m^2). Anschließend wird der modellierte technische Schnee unter Berücksichtigung von Setzung zu dem modellierten Naturschnee addiert. Ab einer vordefinierten Gesamtschneehöhe, wird die technische Schneeproduktion während der Modellierung deaktiviert. Die technische Schneeproduktion wird während der Modellierung unabhängig von der jeweiligen Gesamtschneehöhe fortgesetzt.

6.2 Konfiguration und verwendete Punkte innerhalb des Skigebietes

Die Schneedeckenmodellierung erfolgt an drei repräsentativen Punkten innerhalb des Skigebietes Brunnalm - Hohe Veitsch. Die Tabelle 2 und Abbildung 6 geben einen Überblick über die verwendeten geographischen Punkte in unterschiedlichen Höhenlagen. In einem ersten Schritt werden die gegitterten SNOWGRID-CL Eingangsdaten (Temperatur, Niederschlag und Evapotranspiration) an den horizontal und vertikal nächsten Punkten extrahiert. Für diese extrahierten Gitterpunkte wird schlussendlich die Modellierung durchgeführt.

Die technische Beschneigung ist vom 15. November bis Ende Februar aktiviert. An den ausgewählten geographischen Punkten wird die Schneileistung modelliert. Der Schwellwert der Feuchtkugeltemperatur Tf beträgt $-3,5^\circ\text{C}$. Im gesamten Beschneigungszeitraum wird, wenn es die meteorologischen Bedingungen zulassen, an 24 Stunden pro Tag technischer Schnee produziert. Dies gilt für alle Schneerzeuger. Des Weiteren ist die Verlustleistung 25 % (Effizienzverlust). Am tiefst gelegenen Punkt eins erfolgt die technische Schneeproduktion mittels Schneekanone, darüber mittels Lanze (pro Punkt ein Schneerzeuger). Die technische Schneeproduktion in der Modellierung ist zwischen 15. November und Ende Februar solange aktiviert, bis 24h mal 14 Tage erreicht werden bei $Tf \leq -3,5^\circ\text{C}$.

Tabelle 2: Geographische Informationen der ausgewählten Punkte im Skigebiet Brunnalm - Hohe Veitsch.

Name	ID	Höhe [m]	Exposition [-]	Neigung [°]	geogr. Länge [Dezimalgrad]	geogr. Breite [Dezimalgrad]
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	15,42817197	47,63301061
Piste FIS	2	1230	SO	20	15,42327985	47,63611230
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	15,41679018	47,63835571

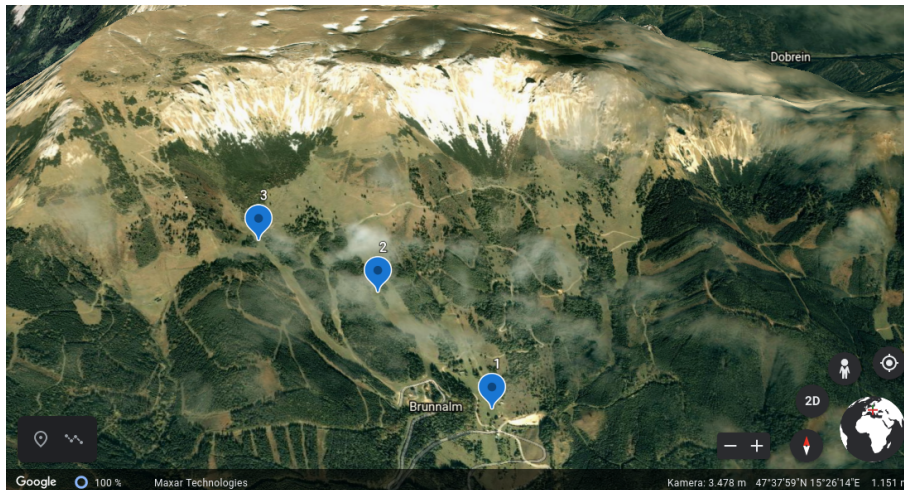


Abbildung 6: Geographische Lage der 3 ausgewählten Punkte im Skigebiet Brunnalm - Hohe Veitsch (blaue Markierungen). Der rote Pfeil in der Abbildung rechts unten zeigt in Richtung Norden (Google Earth).

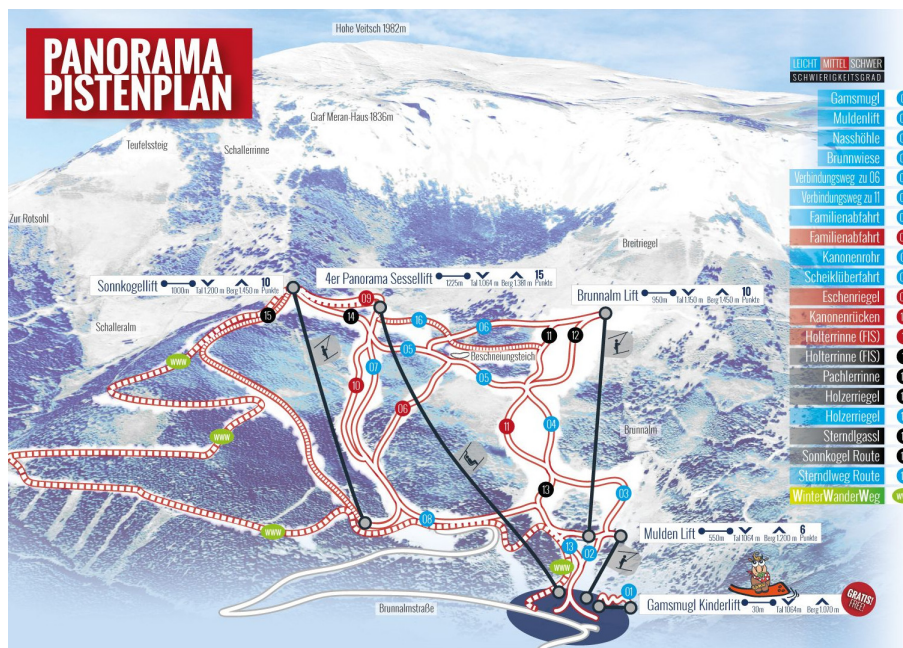


Abbildung 7: Lift- und Pistenplan (Quelle: <https://www.brunnalm-hoheveitsch.at/winter/>).

6.3 Unsicherheiten in der Modellierung der technischen Schneeproduktion

Die technische Schneeproduktion beinhaltet im Allgemeinen viele Freiheitsgrade. Die vordefinierten Annahmen in der Modellierung können natürlich stark von der Realität abweichen. Speziell der Schwellwert der Feuchtkugeltemperatur wird üblicherweise in der Schneeproduktion flexibel gehalten (Grundbeschneigung versus Nachbeschneigung) und ist stark von den vorherrschenden winterlichen Wetterlagen und der Schneesituation abhängig.

Im Allgemeinen wird am Anfang der Wintersaison die Grundbeschneigung durchgeführt, unabhängig von der natürlichen Schneeauflage. Ziel ist hierbei, den Skibetrieb (Saisonstart) sicherzustellen. Bis Ende Jänner / Februar erfolgt die kontinuierliche Nachbeschneigung. Sowohl Grundbeschneigung als auch Nachbeschneigung werden durch Erfahrungswerte gesteuert und können in Intensität und Dauer variieren. In der Modellierung sind Zeitpunkte und Schwellwerte jedoch festgelegt.

An den ausgewählten geographischen Punkten produzieren Schneeerzeuger Kunstschnee.

Der Effizienzverlust bei der Schneeproduktion kann in der Realität erheblich schwanken.

Die verfügbare Menge an Wasser stellt eine weitere große Unsicherheit dar. Die Schneeproduktion wird über den Wasserdurchsatz und Verfügbarkeit limitiert.

Vor allem in der Nachbeschneigung laufen die Schneeerzeuger meist nur während der Nachtstunden. Ein Grund dafür ist die Tatsache, dass z.B. Propellermaschinen eine Wurfweite von 60 m bis 80 m haben. Dies kann zu einer Sichtbehinderung auf den Pisten führen. Auch stellt der unpräparierte, angehäufte Kunstschnee eine Gefahrenquelle auf der Piste dar. In der Modellierung wird der ansteigend sortierte Tagesgang (vom Minimum zum Maximum) der Feuchtkugeltemperatur verwendet, um die Zeiten zu ermitteln, an denen Beschneigung möglich ist. Über diesen Ansatz ist es grundsätzlich nicht möglich, zwischen Tag und Nacht zu unterscheiden.

Die Modellierung mit Kunstschnee wird für die Vergangenheit und Zukunft durchgeführt (Vergangenheit: 1961 bis heute, Zukunft 1971 bis 2099). Die technischen Informationen betreffend Beschneigung beziehen sich jedoch auf den aktuellen Stand im Skigebiet. In den 1960er, 1970er und 1980er Jahren hat es noch keine, in den 1990ern keine effiziente Beschneigung gegeben. In den letzten Jahren wurden in vielen Skiregionen Schneeerzeugernetze und Wasserspeicher kontinuierlich von Jahr zu Jahr ausgebaut. Es wird sozusagen die technische Schneeproduktion in der Vergangenheit und Zukunft mit der Information aus der Gegenwart modelliert. Man muss daher berücksichtigen, dass der über die Jahre schleichende Schneeerzeugerzuwachs und die steigende Wasserverfügbarkeit (steigende Anzahl der Speicherseen) nicht berücksichtigt werden. Auch kann davon ausgegangen werden, dass Schneeerzeuger älterer Generationen eine geringere Effizienz aufweisen.

7 Beschreibung der Indikatoren

Die saisonalen Schneeindikatoren werden allgemein bezüglich der Winterperioden NDJFMA (November, Dezember, Jänner, Februar, März und April) sowie für DJF (Dezember, Jänner und Februar) berechnet.

7.1 Schneeindikatoren

- Die Wintersaison DJFM eines bestimmten Jahres umfasst die Monate Dezember des Vorjahres sowie die Monate Jänner bis einschließlich März des Folgejahres. Zum Beispiel umfaßt die Wintersaison 2010 die Monate November und Dezember 2009 und die Monate Jänner bis April 2010.
- Die saisonal gemittelte Gesamtschneehöhe ist der saisonale Mittelwert der täglichen mittleren Gesamtschneehöhe innerhalb der Wintersaison.
- Die saisonale Schneedeckendauer ist definiert als die Anzahl der Tage mit einer täglichen mittleren Gesamtschneehöhe von größer gleich z.B. 1 cm (30 cm) innerhalb der Wintersaison.
- Die Dauer der Skisaison ist die Anzahl der Tage, an denen ein „Skibetrieb“ möglich ist, bezogen auf einen Start- und Endzeitpunkt innerhalb der jeweiligen Wintersaison. Sie ist die Periode, in der die längste, durchgehend geschlossene Schneedecke beobachtet wird. Die durchgehend geschlossene Schneedecke muss hierbei mindestens einen vordefinierten Schwellwert der Schneehöhe erreichen. Die Dauer der Skisaison wird für den Schwellwert 30 cm berechnet. Neben der Dauer werden auch Beginn und Ende der Skisaison berechnet. Der Bezugszeitraum ist 1. Oktober bis 31. August.
- Zeitreihen werden basierend auf einem Gauß-Tiefpassfilter mit einer Fensterbreite von 11 Jahren geglättet und sind in den Abbildung dick dargestellt.
- Anomalien für die Vergangenheit (Abweichungen zu einem langjährigen Mittelwert) sind bezüglich der Referenzperiode 1981 bis 2010 berechnet.

7.2 Temperatur und Niederschlag: MASH-Analyse

Die winterlichen großräumigen Wetterlagen und die damit verbundene Verteilung von Temperatur und Niederschlag spielen für die saisonale Schneedecke eine wesentliche Rolle. Temperatur- und Niederschlagszeitreihen sind oft durch eine starke saisonale und jährliche Variabilität gekennzeichnet. Diese von Jahr zu Jahr schwankenden Ausprägungen erschweren Aussagen über langfristige Änderungen. Um diese Variabilitäten zu reduzieren, wurde die sogenannte MASH-Analyse (Moving Average over Shifting Horizon, Anghileri et al., 2014) angewandt. Hierbei handelt es sich um eine Filtermethode, bei der Periodizitäten in den Zeitreihen (Temperatur und Niederschlag) geglättet werden. Die Glättung erfolgt hierbei in zwei Dimensionen. Einerseits über die gleichen Tage in aufeinanderfolgenden Jahren, andererseits über aufeinanderfolgende Tage im gleichen Jahr.

Ausgangspunkt für die MASH-Analyse sind die extrahierten täglichen SPARTACUS Mitteltemperatur- und Niederschlagszeitreihen an den geographischen Koordinaten der Punkte im Skigebiet. Die Tagesmitteltemperatur wurde über die Beziehung $(T_{\min}+T_{\max})/2$ berechnet. Die Zeitreihen Tagesmitteltemperatur wurden gleitend über 31 Tage und über 5 Jahre gemittelt. Die gleitende Mittelung über 5 Jahre soll hierbei die hoch-frequente Jahr zu Jahr Variabilität glätten. Die Zeitreihen der täglichen Niederschlagssumme wurden gleitend über 31 Tage summiert und über 5 Jahre gemittelt. Das Ergebnis der MASH-Analyse liefert somit Aussagen über Änderungen der täglichen, mittleren Lufttemperatur und der täglichen Niederschlagssumme.

8 HISTALP: Vergangener Verlauf der saisonalen Lufttemperatur an der Station Schöckl

HISTALP (Historical Instrumental Climatological Surface Time Series Of The Greater Alpine Region) ist eine internationale Klimadatensammlung der ZAMG für den Großraum Alpen. Der HISTALP-Datensatz besteht aus mehreren hundert Stationszeitreihen, die bis zu 250 Jahre in die Vergangenheit zurückreichen. Aufgrund besonderer Qualitätskriterien zählen die HISTALP-Stationszeitreihen zu den weltweit längsten und hochwertigsten Datenreihen.

In Abbildung 8 sind die Verläufe der Lufttemperatur in den meteorologischen Saisonen Winter, Frühling, Sommer und Herbst an der HISTALP Station Schöckl (1445 m Seehöhe) dargestellt. Die winterliche Temperatur zeigt von 1901 bis heute einen langfristigen Anstieg, wobei kühlere und wärmere Phasen sich wellenförmig abwechselten. Gegen Ende der 1980er Jahre ist die Wintertemperatur stark angestiegen. Ausgehend von diesem hohen Niveau gab es bis ca. 2010 eine Phase der Abkühlung. Am Höhepunkt dieser Abkühlungsphase wurde das Temperaturniveau wie vor 1989 erreicht. In den letzten Jahren sind wieder vermehrt deutlich wärmere Winter aufgetreten. Auffällig ist auch die hohe Jahr-zu-Jahr Variabilität der winterlichen Temperatur. Im Gegensatz dazu hat im Sommer die Lufttemperatur seit Beginn der 1980er Jahre markant zugenommen. Dies ist ebenfalls im Frühjahr beobachtbar. In den letzten Jahren ist auch im Herbst eine deutliche Erwärmung sichtbar. Langfristig ist die Lufttemperatur in allen Jahreszeiten seit 1850 gestiegen, wobei die größten Änderungen seit den 1980er Jahren aufgetreten sind. Andere Gipfelregionen in Österreich zeigen ähnliche Verläufe.

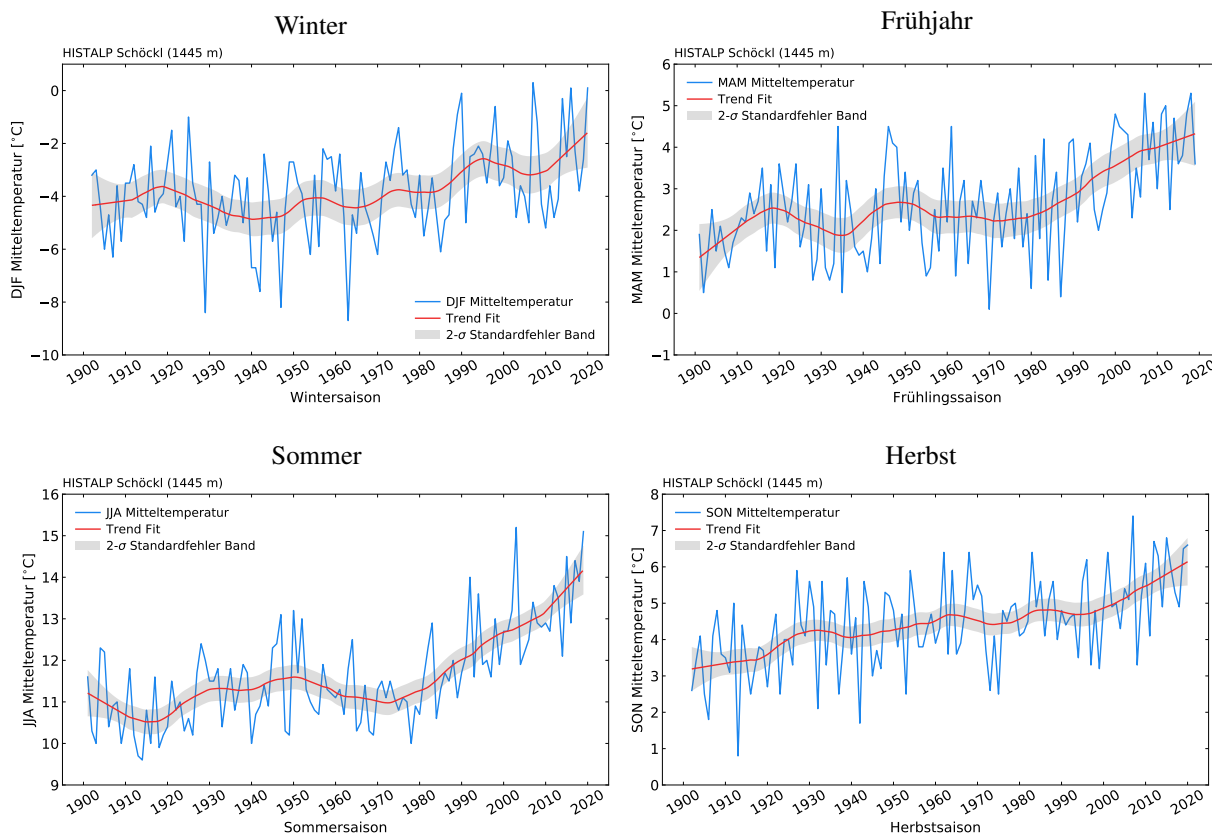


Abbildung 8: Verläufe der saisonalen Lufttemperatur an der HISTALP Station Schöckl (1445 m) seit 1901. Die geglättete rote Kurve gibt einen Trend Fit an (parameterfreie Regression nach Gasser und Müller, 1984). Die schattierte Fläche repräsentiert das Unsicherheitsbandes des Trend Fits (95% Konfidenzintervall). Der Winter umfasst die Monate Dezember, Jänner und Februar (DJF), das Frühjahr die Monate März, April und Mai (MAM), der Herbst die Monate September, Oktober und November (SON) und der Sommer die Monate Juni, Juli und August (JJA). Datenquelle: <http://www.zamg.ac.at/histalp/>.

9 Ergebnisse

9.1 Vergangenheit: 1962 bis 2019

9.1.1 Zeitliche Verläufe der Gesamtschneehöhe und Schneedeckendauer im Überblick

Einen ersten Überblick über die historische Entwicklung der natürlichen Schneehöhen im Skigebiet Brunnalm - Hohe Veitsch seit der Wintersaison 1962 liefert Abbildung 9. Die dargestellten Linienverläufe sind das Ergebnis der SNOWGRID-CL Schneedeckenmodellierung. Die Eingangsdaten (Temperatur, Niederschlag) für die Modellierung stammen aus dem SPARTACUS Beobachtungsdatensatz.

Gut ersichtlich ist, dass die saisonal (DJFM) gemittelte Gesamtschneehöhe an den Punkten eine hohe Jahr-zu-Jahr Variabilität aufweist (siehe Abbildung 9, oben). In den 1970er und 1980er Jahren gab es schneereiche Winter. Ab Ende der 1980er Jahre hat die winterliche Schneehöhe abgenommen. Im Zeitraum Beginn der 2000er bis 2015 gab es wieder vermehrt Wintersaisons mit einer größeren Schneehöhe. In den Jahren um 2015 waren die saisonalen Schneehöhen deutlich geringer als davor und danach. Langfristig gesehen deuten die Linienverläufe darauf hin, dass die Gesamtschneehöhe seit den 1960er Jahren zugenommen hat. Auch die Schneedeckendauer (Tage mit einer Gesamtschneehöhe von mindestens 30 cm, Abbildung 9, unten) weist eine sehr hohe Jahr-zu-Jahr Variabilität auf, wobei seit den 1980er Jahren die Schneedeckendauer in den tiefen Lagen tendenziell abgenommen hat. Die Zunahme der saisonalen Gesamtschneehöhe kann mit der gebietsweisen Zunahme des Niederschlags erklärt werden (zwischen 2005 und 2015), die leichte Abnahme der Schneedeckendauer mit der stetigen Temperaturzunahme (vorallem im Spätwinter).

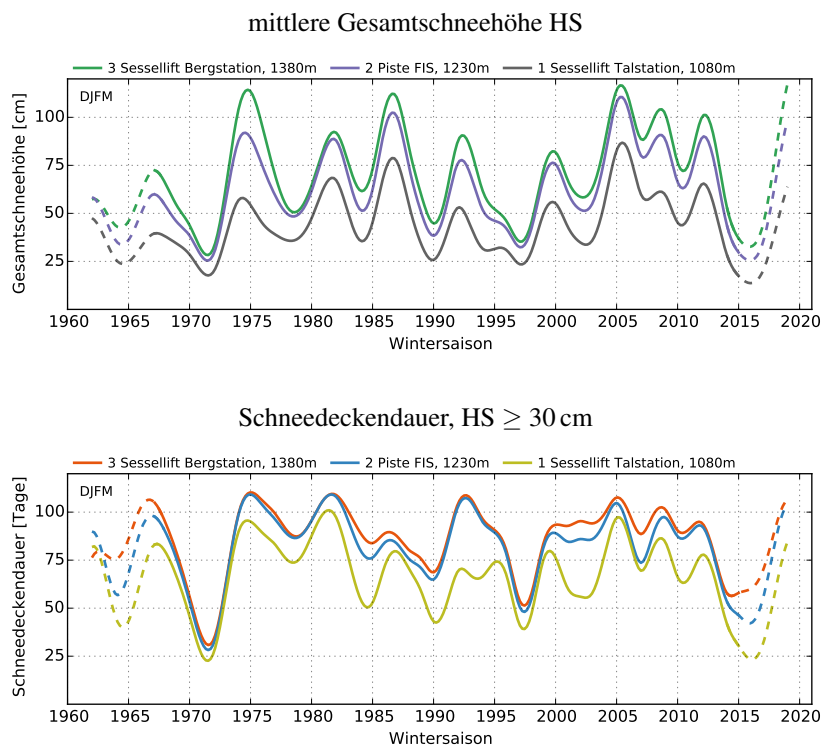


Abbildung 9: SNOWGRID-CL: Zeitliche Verläufe der saisonal (DJFM) gemittelten mittleren Gesamtschneehöhe HS (links) und der saisonalen (DJFM) Schneedeckendauer (unten) an den 3 Punkten im Skigebiet für die Wintersaisons 1962 bis 2019. Die Zeitreihen sind mit einem Gauss-Tiefpassfilter mit einer Fensterbreite von 11 Jahren geglättet (dicke Linien). Die saisonale Schneedeckendauer ist definiert als die Anzahl der Tage mit einer täglichen mittleren Gesamtschneehöhe von größer gleich 30 cm. Die SNOWGRID-CL Modellierungsergebnisse basieren auf den SPARTACUS Beobachtungsdatensatz.

9.1.2 Anomalien bezüglich der Referenzperiode 1981 bis 2010

Die Abweichung eines meteorologischen Parameters von seinem langjährigen Mittelwert wird in der Klimatologie als Anomalie bezeichnet. Die Berechnung erfolgt in zwei Schritten. Zuerst wird ein langfristiges Mittel des Parameters über eine definierte Referenzperiode berechnet. Dieser Mittelwert stellt die mittleren Verhältnisse dar. Anschließend wird von jedem Zeitpunkt (hier Wintersaisonen) dieser Mittelwert abgezogen.

Die Abbildungen 10 bis 12 zeigen die Anomalien (Abweichungen zum 30-Jährigen Mittelwert einer Referenzperiode) der Schneeindikatoren (Naturschnee) an den 3 ausgewählten Punkten im Skigebiet. Die 30-Jährige klimatologische Referenzperiode ist von 1981 bis 2010. Grundsätzlich zeigen die Anomalien der Schneeindikatoren eine hohe Jahr-zu-Jahr Variabilität, unabhängig von der Seehöhe. Anhand der Verläufe der Anomalien der mittleren und maximalen Gesamtschneehöhe ist deutlich zu erkennen, dass an allen Punkten im Skigebiet die Anzahl der Wintersaisonen mit einer überdurchschnittlich hohen Schneehöhe tendenziell zugenommen hat (blaue Balken). Im Vergleich dazu ist die Schneedeckendauer an den zwei tiefer gelegenen Punkten seit Ende der 1980er Jahre vermehrt unterdurchschnittlich (negative Anomalien, rote Balken). In den höheren Lagen ist dies weniger deutlich ausgeprägt. Auffällig sind die Jahre um 2015, in denen die Schneehöhen in aufeinanderfolgenden Wintersaisonen deutlich unterdurchschnittlich waren. Die letzten Wintersaisonen waren wieder meist überdurchschnittlich.

Anhand Tabelle 3 ist deutlich zu erkennen, dass die beobachtete Antikorrelation zwischen saisonaler Schneehöhe und Temperatur in allen Seehöhen sehr gering ist. Im Gegensatz dazu besteht zwischen der saisonalen Schneehöhe und der Niederschlagssumme eine erhöhte Korrelation. Dies deutet darauf hin, dass der winterliche Niederschlag eine wesentliche Rolle im Skigebiet spielt. Im Allgemeinen nimmt die Bedeutung der Niederschlagsverteilung mit zunehmender Seehöhe zu (Schöner et al., 2018). Speziell in Höhenlagen und Expositionen, in denen die winterliche Temperatur im Mittel meist unter dem Gefrierpunkt ist, spielt der Niederschlag eine wichtige Rolle für den winterlichen Schneedeckenzuwachs.

Tabelle 3: Korrelationskoeffizient R zwischen der saisonal (DJFM) gemittelten Gesamtschneehöhe (HS) und der Mitteltemperatur (Tmittel) sowie der Niederschlagssumme (Nied). Die Punkte sind nach der Höhenlage sortiert.

Name	ID	Höhe [m]	Korrelation	
			R(HS,Tmittel)	R(HS,Nied)
Sessellift Bergstation	3	1380	-0,2	0,7
Piste FIS	2	1230	-0,2	0,7
Sessellift Talstation	1	1080	-0,3	0,7

1 Sessellift Talstation (1080 m)

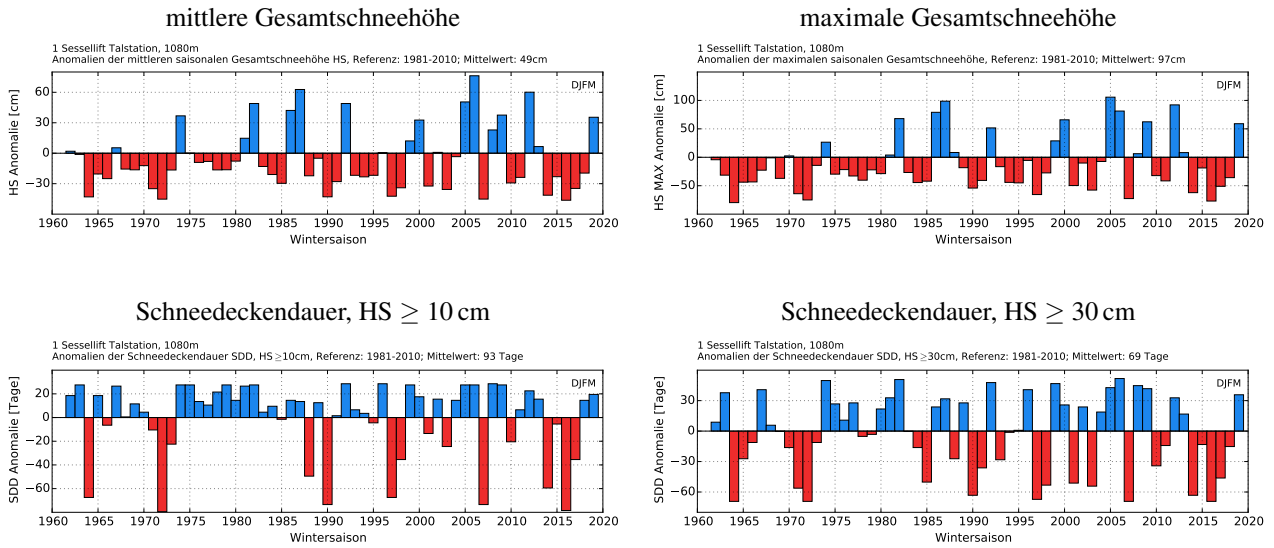


Abbildung 10: Anomalien (Abweichungen vom 30-Jährigen Mittelwert) der saisonalen Schneekindikatoren (Naturschnee) für den Punkt 1 Sessellift Talstation (1080 m). Die 30-Jährige Referenzperiode ist 1981 bis 2010. Wintersaison DJFM.

2 Piste FIS (1230 m)

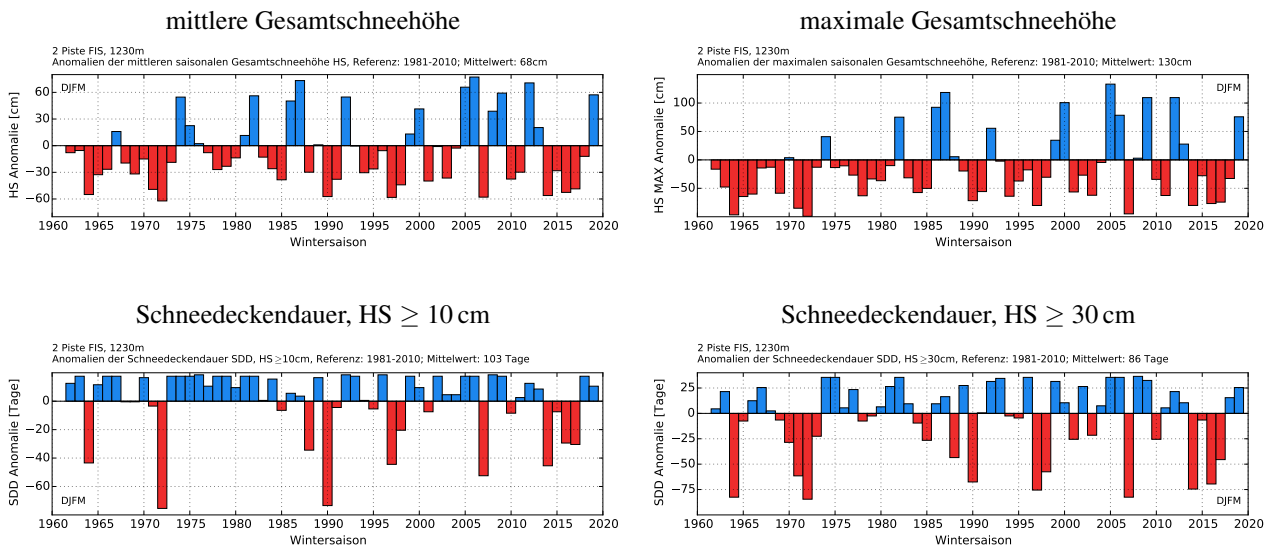


Abbildung 11: Anomalien (Abweichungen vom 30-Jährigen Mittelwert) der saisonalen Schneekindikatoren (Naturschnee) für den Punkt 2 Piste FIS (1230 m). Die 30-Jährige Referenzperiode ist 1981 bis 2010. Wintersaison DJFM.

3 Sessellift Bergstation (1380 m)

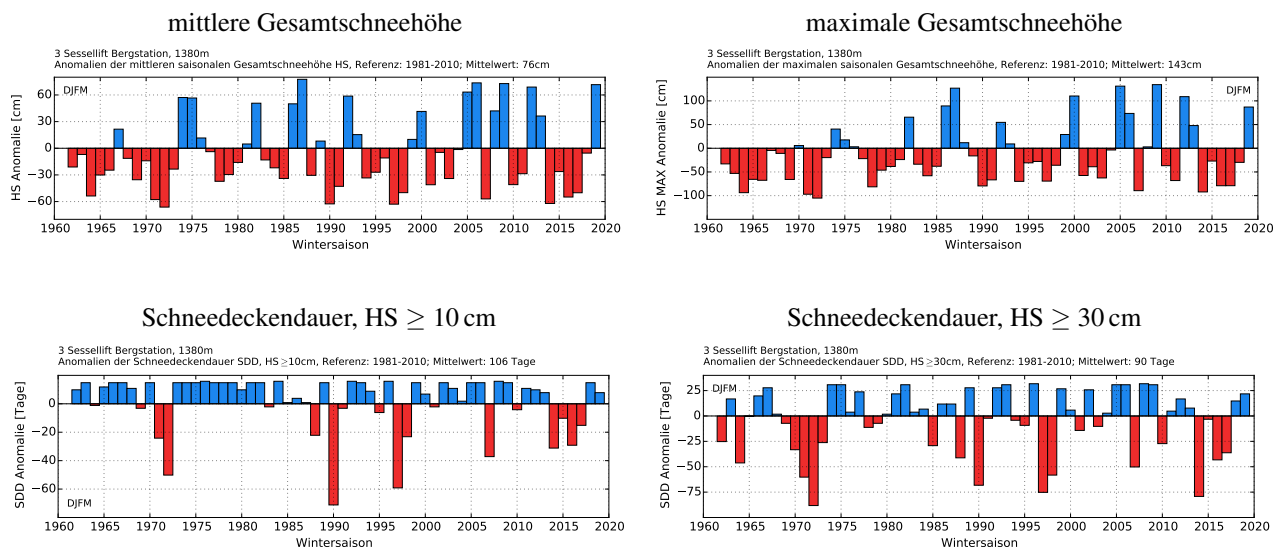


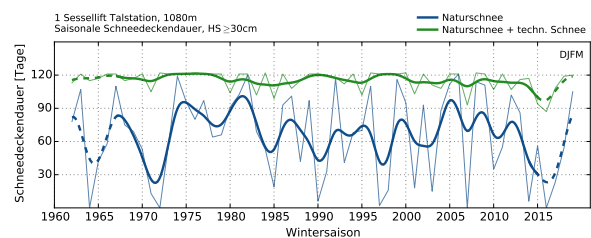
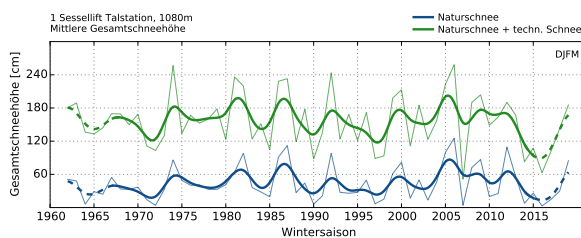
Abbildung 12: Anomalien (Abweichungen vom 30-Jährigen Mittelwert) der saisonalen Schneeindikatoren (Naturschnee) für den Punkt 3 Sessellift Bergstation (1380 m). Die 30-Jährige Referenzperiode ist 1981 bis 2010. Wintersaison DJFM.

9.1.3 Vergleich Naturschnee mit Naturschnee plus technische Schneeproduktion

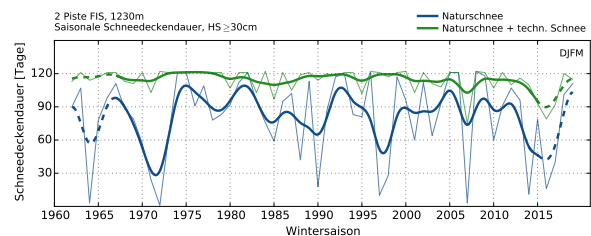
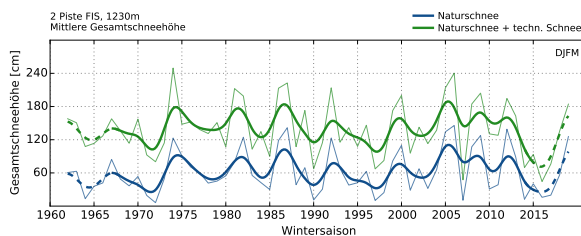
Der Einfluss der technischen Schneeproduktion soll anhand der modellierten Schneedeckendauer und der Dauer der Ski-saison aufgezeigt werden (siehe Kapitel 7 Indikatoren).

Abbildung 13 zeigt die modellierte saisonale (DJFM) mittlere Gesamtschneehöhe und Schneedeckendauer unter Berücksichtigung von Naturschnee und technischem Schnee an den drei ausgewählten Punkten im Skigebiet. Der Schwellwert der Schneehöhe für die Berechnung der Schneedeckendauer ist 30 cm. Deutlich wird, dass mit Hilfe der technischen Schneeproduktion (grüne Linien) die Gesamtschneehöhe deutlich erhöht wird. Auch wird die Schneedeckendauer merklich erhöht, vor allem in den schneeärmeren Wintersaisons. Dieser positive Effekt ist auch in den Wintersaisons um 2015 erkennbar, in denen die Schneedeckendauer im Allgemeinen sehr unterdurchschnittlich war. Die technische Schneeproduktion führt in allen Höhenlagen im Skigebiet zu einer Stabilisierung der Schneedeckendauer und zu einer gedämpften Jahr-zu-Jahr Variabilität.

1 Sessellift Talstation (1080 m)



2 Piste FIS (1230 m)



3 Sessellift Bergstation (1380 m)

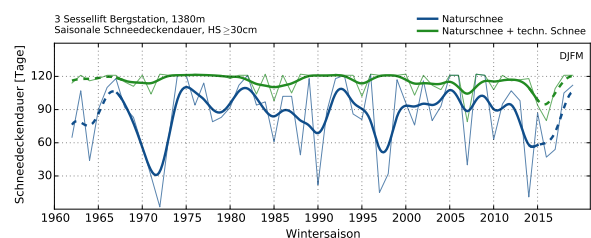
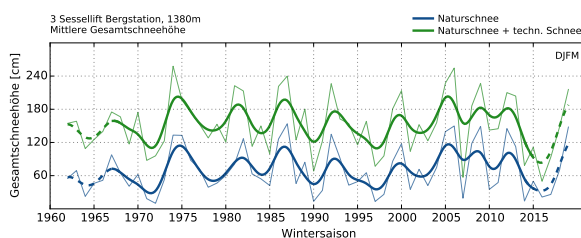
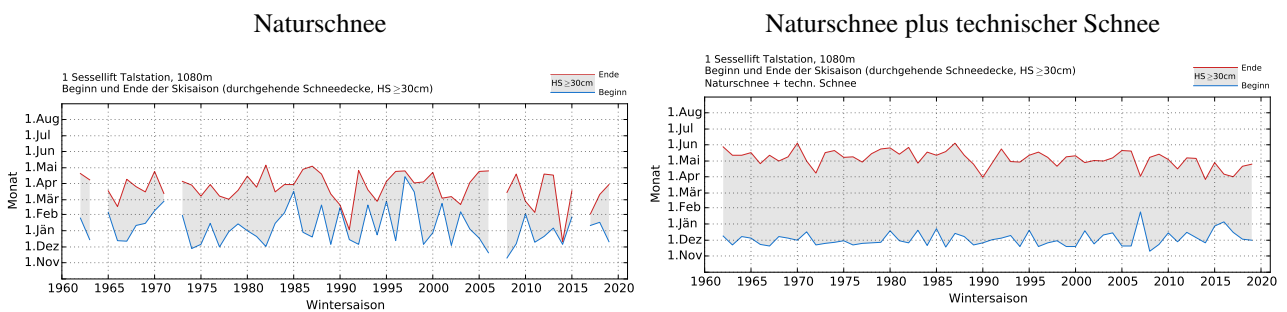


Abbildung 13: Modellerte saisonale (DJFM) Gesamtschneehöhe HS (links) und Schneedeckendauer (rechts) an den 3 Punkten im Skigebiet. Der Schwellwert der Schneehöhe HS beträgt 30 cm. Blau: Naturschnee; Grün: Naturschnee plus technischer Schnee. Fette Linien: Gauss-Tiefpassfilter mit einer Fensterbreite von 11 Jahren.

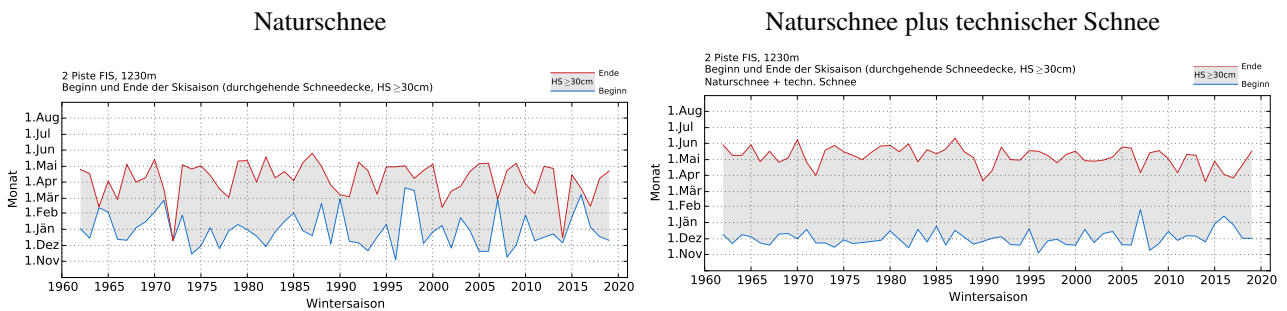
Der Beginn der Skisaison (Naturschnee) im Skigebiet zeigt seit der Wintersaison 1962 eine hohe Jahr-zu-Jahr Variabilität (Abbildung 14, linke Spalte). Ein deutlicher Trend ist nicht erkennbar. Einzig am tiefsten Punkt im Skigebiet hat es Wintersaisons gegeben, in denen es keine durchgehende Schneedecke mit mindestens 30 cm Schneehöhe gegeben hat. Im Vergleich dazu ist in allen Seehöhen das Saisonende seit Ende der 1980er Jahre früher eingetreten. Die Saisons (Naturschnee) sind folglich kürzer geworden (Abbildung 14, linke Spalte). Mit Hilfe der technischen Beschneigung kann die Skisaison früher starten (Abbildung 14, rechte Spalte). Auch wird das Saisonende nach hinten verschoben. Der positive Einfluss der technischen Beschneigung ist somit auch in der Dauer der Skisaison ersichtlich.

Beginn und Ende der Skisaison, $HS \geq 30$ cm: Naturschnee plus technischer Schnee

1 Sessellift Talstation (1080 m)



2 Piste FIS (1230 m)



3 Sessellift Bergstation (1380 m)

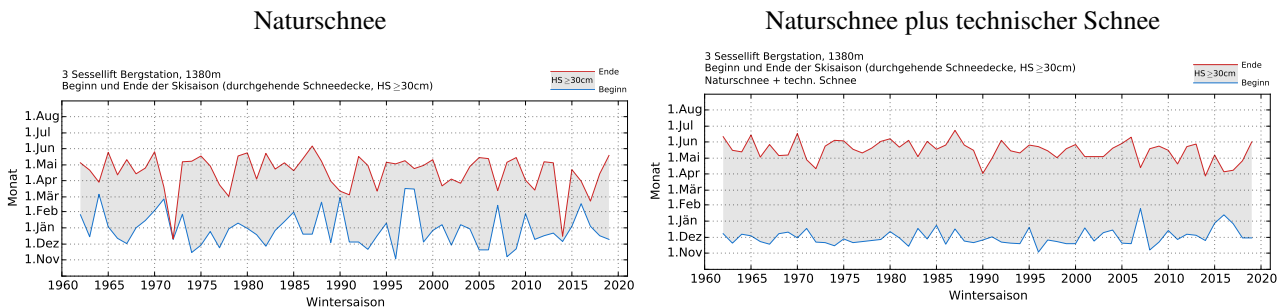


Abbildung 14: Beginn und Ende der Skisaison (durchgehend geschlossene Schneedecke mit einer mittleren Gesamtschneehöhe $HS \geq 30$ cm, innerhalb des Bezugszeitraumes 1. Oktober bis 31. August). Linke Spalte: Naturschnee; Rechte Spalte: Naturschnee plus technischer Schnee; Blau: Beginn der Skisaison; Rot: Ende der Skisaison.

9.1.4 Anzahl der möglichen Beschneistunden

Die Auswertung der berechneten Anzahl der möglichen Beschneistunden soll Auskunft darüber geben, inwieweit sich der Verlauf der modellierten Feuchtkugeltemperatur T_f seit 1961 geändert hat. Es werden die Stunden pro Tag gezählt, an denen T_f kleiner oder gleich eines definierten Schwellwertes ist.

Abbildungen 15 und 16 zeigen die möglichen Beschneistunden für die Punkte im Skigebiet, bezüglich unterschiedlicher Schwellwerte von T_f und Zeitperioden. Die Schwellwerte von T_f betragen -3°C , -4°C und -5°C , und die Perioden umfassen die Zeitfenster 15. November bis 15. Dezember, 15. November bis 6. Jänner und 15. November bis 31. Jänner. Innerhalb dieser Zeitfenster werden die Stunden gezählt, an denen T_f kleiner oder gleich dem jeweiligen Schwellwert ist.

An allen Punkten im Skigebiet und für alle Teilperioden ist die Anzahl der möglichen Beschneistunden seit den 1980er Jahren zurückgegangen, unabhängig vom Schwellwert der Feuchtkugeltemperatur. Das deutet darauf hin, dass die zeitlichen Möglichkeiten zur Beschneieung innerhalb der Zeitfenster abgenommen haben. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass trotz der Abnahme genügend Stunden für die Beschneieung zur Verfügung stehen. Auffallend ist, dass die Jahre um 2015 von einer verhältnismäßig geringen Anzahl an möglichen Beschneistunden geprägt sind, unabhängig von T_f -Schwellwert, Zeitfenster und Seehöhe.

Der Vergleich der unterschiedlichen Seehöhen verdeutlicht zusammenfassend, dass die zeitlichen Verläufe seit 1962 zwar auf einem jeweils unterschiedlichen Niveau angesiedelt sind, aber ähnliche Tendenzen zeigen. Die beobachtete Temperaturerhöhung ist somit in allen Höhenlagen im Skigebiet feststellbar.

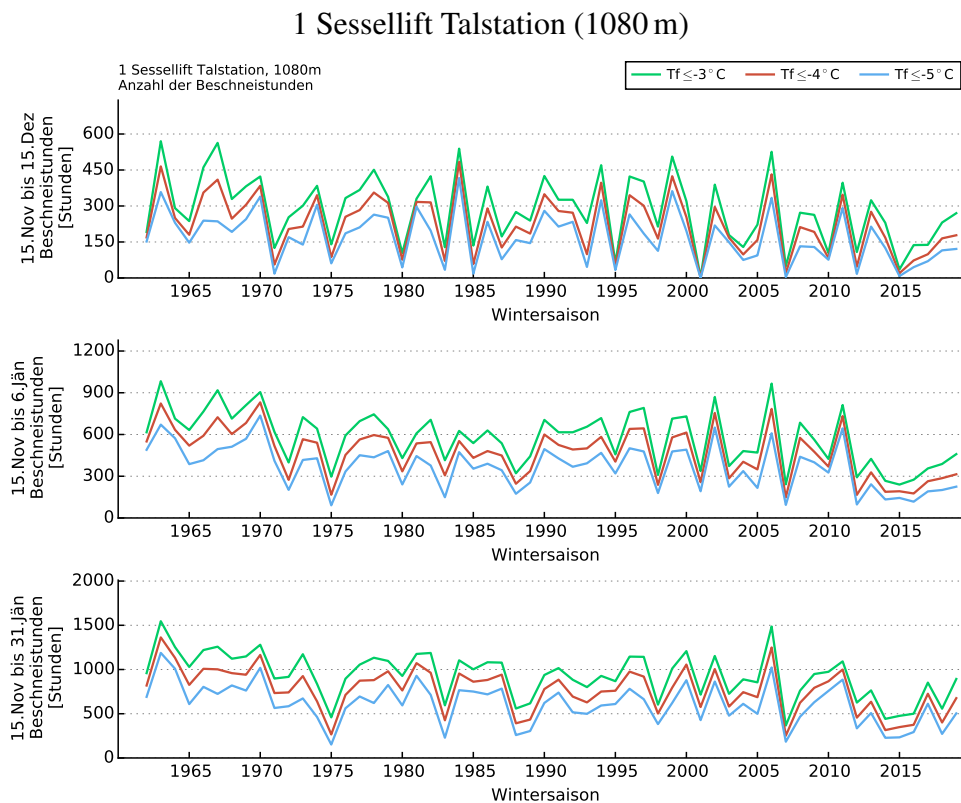


Abbildung 15: Anzahl der möglichen Beschneistunden bezüglich unterschiedlicher Perioden und Schwellwerte der Feuchtkugeltemperatur T_f für den Punkt 1 Sessellift Talstation (1080 m).

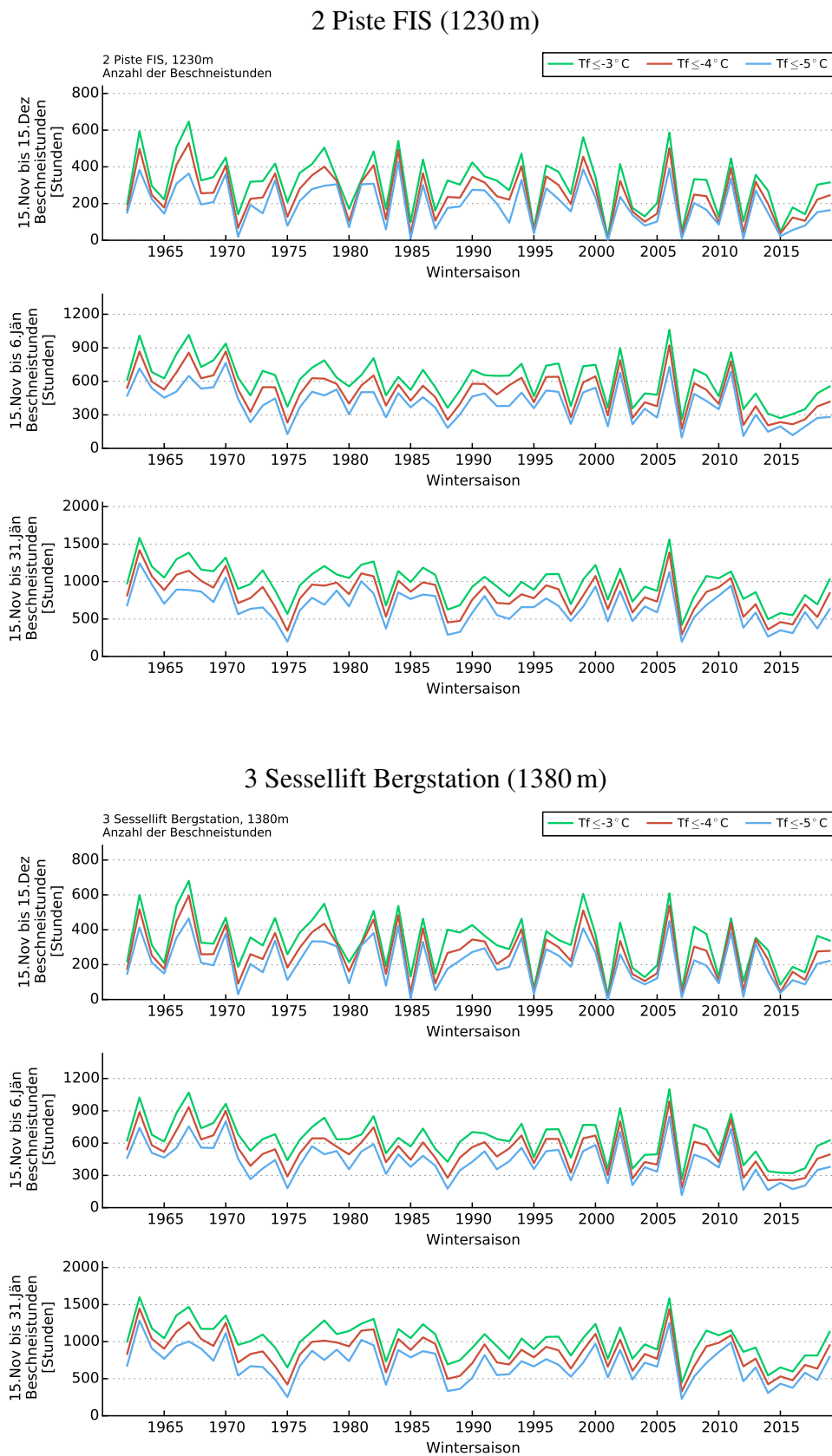


Abbildung 16: Anzahl der möglichen Beschneistunden bezüglich unterschiedlicher Perioden und Schwellwerte der Feuchtkugeltemperatur T_f für die Punkte Piste FIS (1230 m) und Sessellift Bergstation (1380 m).

9.1.5 Temperatur und Niederschlag: MASH-Analyse

Mit Hilfe der sogenannten MASH-Analyse (Filtermethode, siehe Kapitel 7.2) soll die Variabilität der Temperatur und der Niederschlagssumme näher untersucht werden. Es werden die Ergebnisse am Punkt 3 Sessellift Bergstation (1380 m) präsentiert. Die Temperatur- und Niederschlagsdaten stammen hierbei aus dem SPARTACUS-Datensatz, welche wiederum die Eingangsdaten für die SNOWGRID-CL Schneedeckenmodellierung sind.

In der MASH-Analyse wird die hohe Jahr-zu-Jahr Variabilität in den Zeitreihen geglättet. Dies erfolgt für die Temperatur einerseits über eine gleitende Mittelung über 31 Tage innerhalb der Wintersaison und andererseits über eine gleitende Mittelung über 5 Jahre. Beim Niederschlag wird gleitend über 31 Tage summiert und gleitend über 5 Jahre gemittelt. Die Abbildungen 17 und 18 zeigen stellvertretend für das Skigebiet die Resultate der MASH-Analyse für Niederschlag und Temperatur am Punkt 3 Sessellift Bergstation (1380 m). An den anderen Punkten nehmen die Strukturen der MASH-Analyse vergleichbare Formen an. Auffällig ist die hohe Variabilität der Niederschlagssumme (Abbildung 17). Es wechseln sich trockene und feuchte Episoden ab. Auffallend ist, dass seit Mitte/Ende der 1990er Jahre die Monate Jänner, Februar und März durchwegs feuchter waren, als die Jahre davor. Ab den 1980er Jahren ist eine mehr oder weniger stetige Zunahme der täglichen Mitteltemperatur in den Monaten März, April und Mai erkennbar. Diese Temperaturerhöhung tritt auch in den letzten Jahren in den Monaten November und Dezember auf, wenngleich in abgeschwächter Form (Abbildung 18).

Die einzelnen 5-Jahres Horizonte der Niederschlagssumme (Summen) und der Temperatur (Mittelungen) werden in Abbildung 19 gezeigt. Hierbei sind ältere 5-Jahres Horizonte blau (z.B. 1962 bis 1966, 1963 bis 1967, usw.) und jüngere Horizonte (z.B. 2001 bis 2005, 2002 bis 2006, usw.) rot gefärbt. Die hohe Variabilität des Niederschlags ist hierbei gut erkennbar (Abbildung 19, oben). Seit Beginn der 1990er Jahre gab es in den Wintermonaten überdurchschnittlich viel Niederschlag (orange und rot gefärbte Linienverläufe). In den letzten Wintersaisons war vor allem der Jänner überdurchschnittlich feucht.

Die Mitteltemperatur ist im November und Dezember, sowie im März und April in der jüngeren Vergangenheit deutlich gestiegen (gelbe bis rote Linien in Abbildung 18, unten). Ein ähnliches Bild ergibt sich für die anderen Punkte im Skigebiet (hier nicht gezeigt).

Zusammenfassend kann für die Wintersaison gesagt werden, dass seit 1962 langfristig gesehen die Niederschlagssumme innerhalb der einzelnen Wintermonate eine hohe Variabilität aufweist. Es wechseln sich trockene und feuchte Perioden ab. Dennoch lässt sich sagen, dass ab den 1990er Jahren die Niederschlagssumme in den Wintermonaten vermehrt überdurchschnittlich war. Eine stetige Erhöhung der Tagesmitteltemperatur seit den 1980er Jahren ist in den Monaten März, April und Mai erkennbar, in den letzten Jahren auch im November und Dezember. Speziell die Kernwinter (Jänner und Februar) vor 1989 waren gekennzeichnet durch niedrige Tagesmitteltemperaturen. Die beobachtete Temperaturerhöhung in der Vor- und Nachsaison kann in tiefen Lagen zu einer Verkürzung der Wintersaison (Naturschnee) führen (verzögertes Einschneien und früheres Ausapern).

3 Sessellift Bergstation (1380 m)

Niederschlagssumme

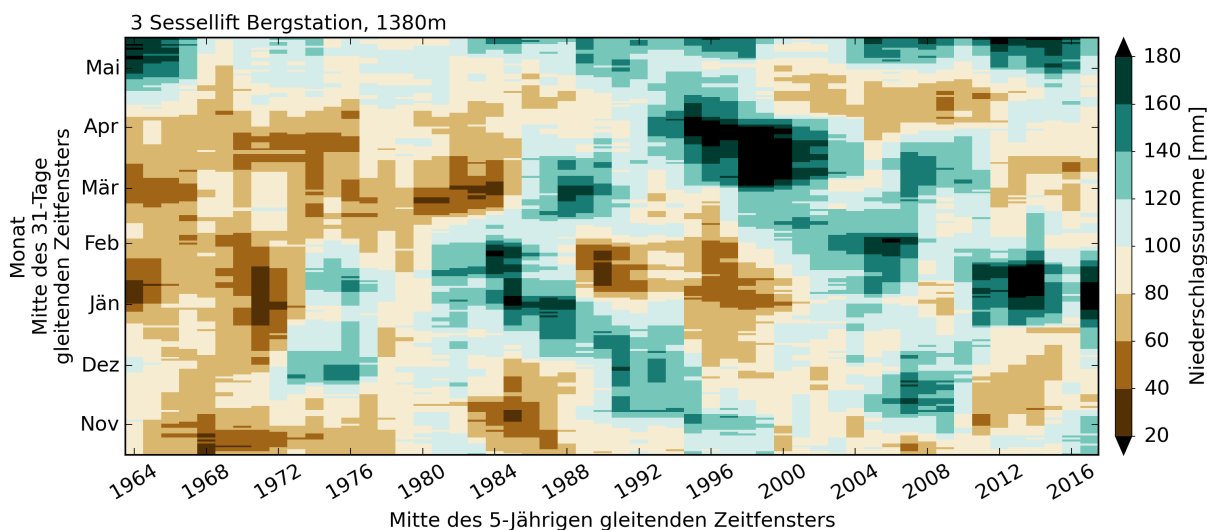


Abbildung 17: MASH-Analyse: tägliche Niederschlagssumme am Punkt 3 Sessellift Bergstation (1380 m). Auf der Ordinate sind die Zeitreihen gleitend über 31 Tage summiert, auf der Abszisse gleitend über 5 Jahre gemittelt.

Temperatur

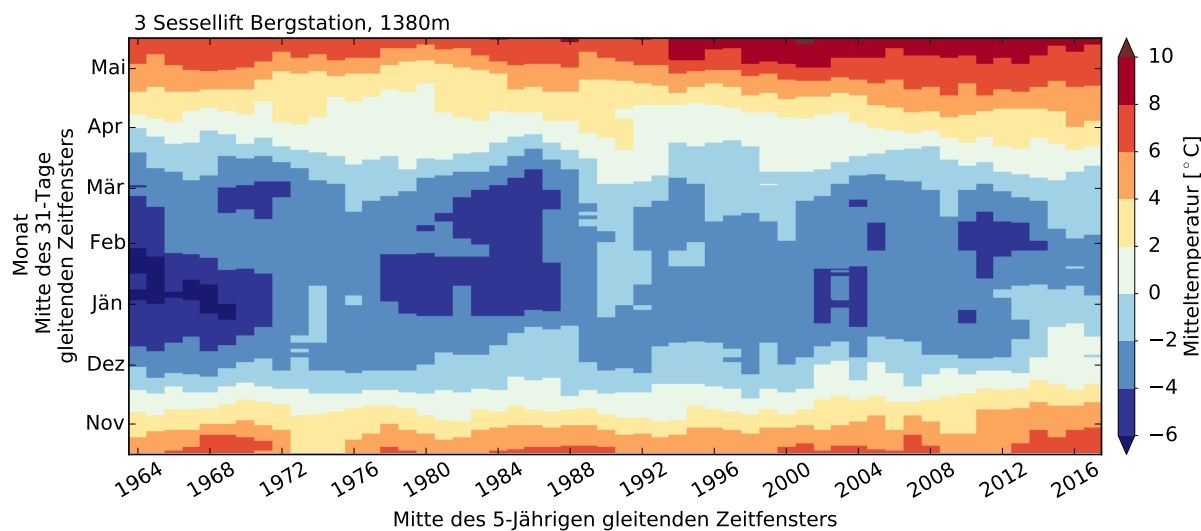


Abbildung 18: MASH-Analyse: Tagesmitteltemperatur am Punkt 3 Sessellift Bergstation (1380 m). Auf der Ordinate sind die Zeitreihen gleitend über 31 Tage gemittelt, auf der Abszisse gleitend über 5 Jahre.

3 Sessellift Bergstation (1380 m)

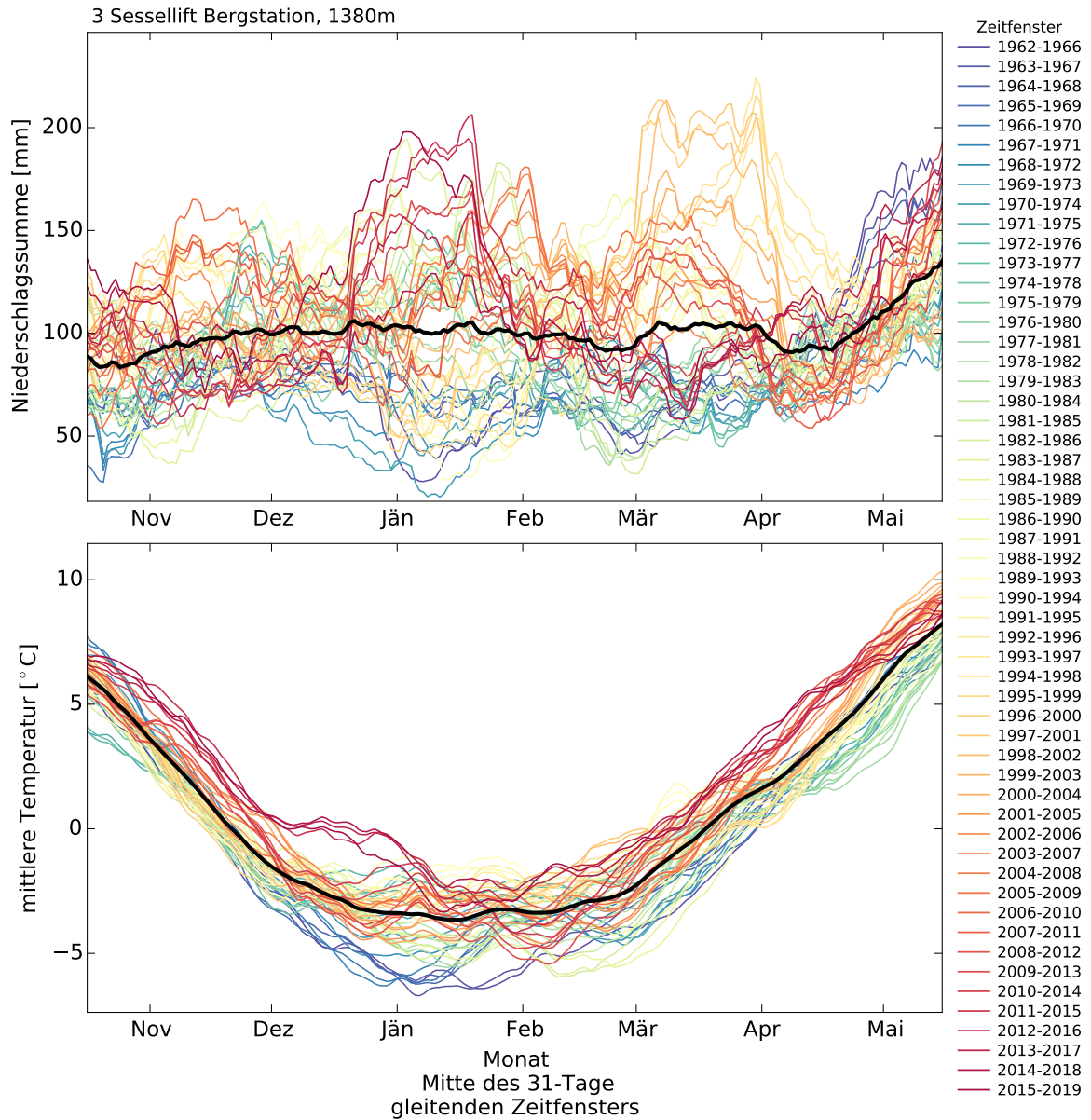


Abbildung 19: Resultat der MASH-Analyse (tägliche Niederschlagssumme, oben und Tagesmitteltemperatur, unten) am Punkt 3 Sessellift Bergstation (1380 m). Dargestellt ist die Variabilität der einzelnen 5-Jahres Horizonte. Die schwarze Linie ist der Mittelwert über alle Horizonte.

9.1.6 Monatliche Änderungen in der Vergangenheit: Vergleich der Zeitperioden 1962 bis 1990 und 1991 bis 2019

Die Änderung der klimatologischen Rahmenbedingungen in der Vergangenheit soll anhand eines Vergleiches zweier Zeitperioden (Referenzperioden) untersucht werden. Hierbei ist das Klimaänderungssignal definiert als die Differenz der Mittelwerte der Perioden 1962 bis 1990 und 1991 bis 2019. Genauer gesagt, das langjährige Mittel der Periode 1962 bis 1990 wird vom langjährigen Mittel der Periode 1991 bis 2019 abgezogen. Das Resultat ist die positive oder negative Änderung (Zunahme oder Abnahme).

Die Abbildung 20 zeigen die mittleren monatlichen Abweichungen an den 3 Punkten im Skigebiet Brunnalm - Hohe Veitsch. Die Niederschlagssumme (obere Reihe) zeigt an allen Punkten in den für die Skisaison relevanten Monaten November bis März eine deutliche positive Änderung (20 bis 60% Änderung) in der Periode 1991 bis 2019, wobei im März die Änderung mit 60% am deutlichsten ausfällt. Die größten Änderungen in der Mitteltemperatur (zweite Reihe von oben) gibt es im Winter, Frühjahr und Sommer (Zunahme von über 1,5°C im Vergleich zur Periode 1962 bis 1990), die geringsten im September und Oktober.

Die mittlere monatliche Schneehöhe (zweite Reihe von unten) hat an allen Punkten in den Monaten November bis März leicht zugenommen. Die Schneedeckendauer ($SH \geq 30$ cm, untere Reihe) hat in der Periode 1991 bis 2019 grundsätzlich in allen Höhenlagen im Skigebiet im November, Dezember und Jänner geringfügig zugenommen (2 bis 4 Tage), Februar und März abgenommen (bis zu 3 Tage weniger). Ein Grund ist die beobachtete Temperaturerhöhung im Spätwinter/Frühjahr. Die Zunahme der Gesamtschneehöhe sowie der Schneedeckendauer in den Monaten November bis Februar steht hierbei in engem Zusammenhang mit der Niederschlagszunahme (vergleiche auch Tabelle 3).

Mittlere monatliche Änderungen: 1991 bis 2019 vs. 1962 bis 1990

1 Sessellift Talstation (1080 m)

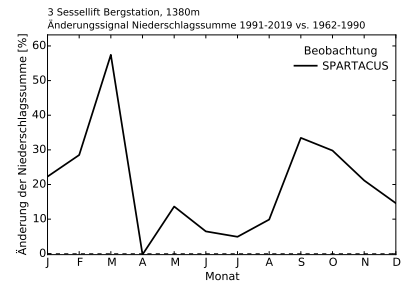
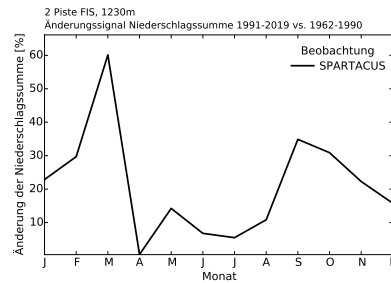
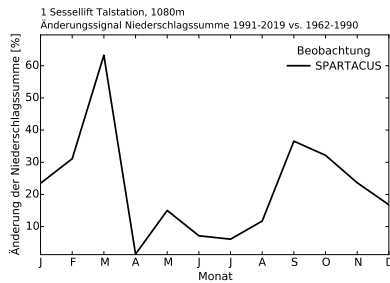
2 Piste FIS (1230 m)

3 Sessellift Bergstation (1380 m)

Niederschlagssumme

Niederschlagssumme

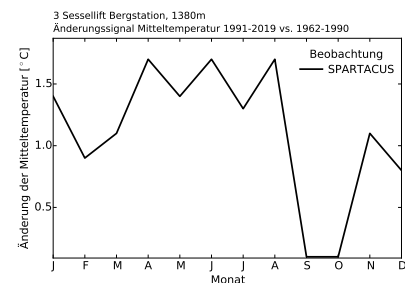
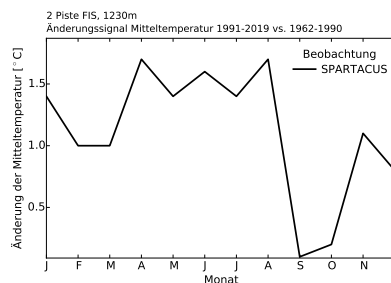
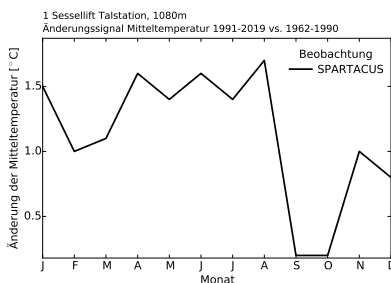
Niederschlagssumme



Mitteltemperatur

Mitteltemperatur

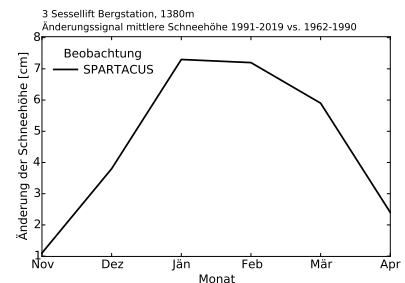
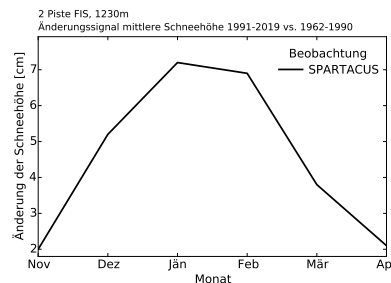
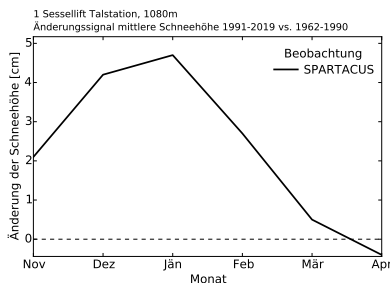
Mitteltemperatur



mittlere Schneehöhe HS

mittlere Schneehöhe HS

mittlere Schneehöhe HS



Schneedeckendauer (HS ≥ 30 cm)

Schneedeckendauer (HS ≥ 30 cm)

Schneedeckendauer (HS ≥ 30 cm)

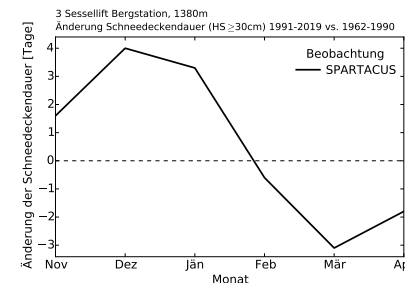
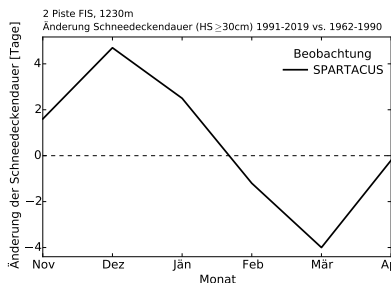
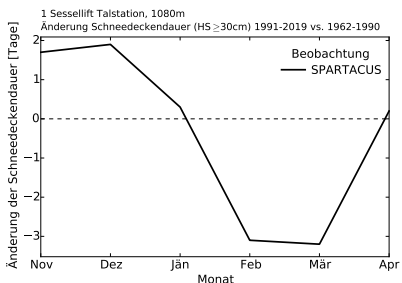


Abbildung 20: Vergleich zweier klimatologischer Zeitperioden: Änderung der mittleren monatlichen Niederschlagssumme, Mitteltemperatur, Gesamtschneehöhe und Schneedeckendauer (beides Naturschnee) zwischen 1991 bis 2019 und 1962 bis 1990 an den Punkten Sessellift Talstation (links), Piste FIS (Mitte) und Sessellift Bergstation (rechts). Die monatliche Änderung ergibt sich aus der Differenz von Periode 1991 bis 2019 und Periode 1962 bis 1990. Bei der Schneehöhe und Schneedeckendauer ($SH \geq 30$ cm) werden die Wintermonate NDJFMA bezüglich 1991 bis 2019 und 1962 bis 1990 verglichen.

9.1.7 Schneedeckenzuwachs in der jüngeren Vergangenheit

Innerhalb der Periode 1991 bis 2019 hat die monatliche Niederschlagssumme (gegitterter Beobachtungsdatensatz SPARTACUS) in den Monaten November bis März zwischen 20 und 60% zugenommen, im Vergleich zur Periode 1962 bis 1990. Abbildung 21 zeigt die zeitlichen Verläufe der monatlichen Niederschlagssummen am höchsten Punkt 3 Sessellift Bergstation in 1380 m Seehöhe. Die Niederschlagssumme hat in den Monaten Jänner und März langfristig signifikant zugenommen (durchgezogene orange Linien, signifikant bezüglich eines 95% Konfidenzniveaus). Im Dezember und Februar sind die Verläufe nicht signifikant, jedoch ist eine Tendenz hin zu mehr Niederschlag ersichtlich. Vor allem seit den 1990er Jahren gab es in den Wintermonaten höhere Niederschlagssummen. Diese niederschlagsreicheren Monate in der Periode 1991 bis 2019 führten augenscheinlich zu den höheren saisonalen Schneehöhen. Eine Erklärung für die größeren Niederschlagssummen ist, dass sich die Häufigkeit von niederschlagsbringenden Wetterlagen in dieser Periode erhöht hat.

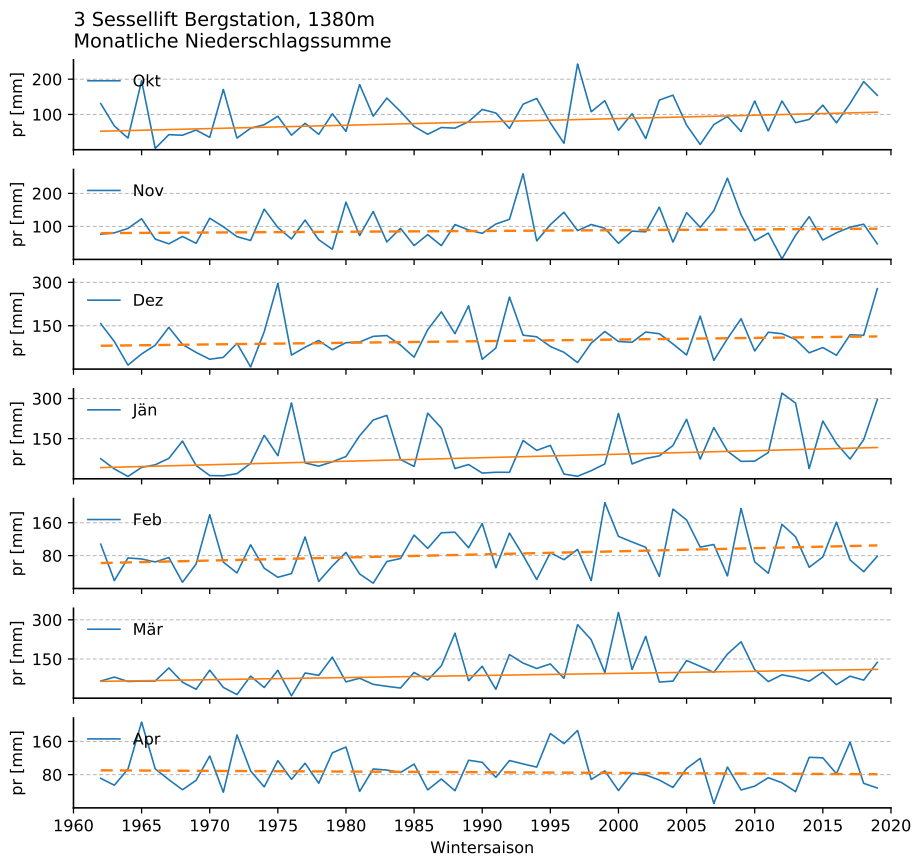


Abbildung 21: Monatliche (Oktober bis April) Niederschlagssummen am Punkt 3 Sessellift Bergstation (1380 m) für die Periode 1962 bis 2019. Die orangenen Linien stellen einen linearen Fit dar (Sen Ausgleichsgerade). Existiert in den monatlichen Verläufen ein signifikanter Trend bezüglich eines 95% Konfidenzniveaus (Mann-Kendall Trendstatistik), so wird die lineare Ausgleichsgerade durchgezogen dargestellt, sonst gestrichelt. Die Niederschlagssummen basieren auf den gegitterten SPARTACUS Beobachtungsdatensatz.

9.1.8 Änderungen in der Vergangenheit: Signifikanzprüfung

Unter Verwendung des rangbasierten, nicht-parametrischen statistischen Mann-Whitney-U Tests (Mann and Withney, 1947; Wilcoxon, 1945) wird getestet, ob zwischen den zwei Zeitperioden 1962 bis 1990 und 1991 bis 2019 ein signifikanter Unterschied besteht, bezüglich eines 95% Konfidenzniveaus. In diesem Test wird geprüft, ob die Verteilung bzw. die zentrale Tendenz (Mittelwert und Median) der Zeitreihen verschieden ist. Hierbei wird auf die Reihung (Rang) der Beobachtungswerte zurückgegriffen und nicht auf die tatsächlichen Messdaten. Für die Signifikanzprüfung bedeutet dies, dass nach Zuordnung von Rangplätzen die Signifikanzprüfung unabhängig von der Verteilung der Daten ist.

Tabellen 4 und 5 zeigen die Änderungen für die winterliche (DJFM) Niederschlagssumme und Mitteltemperatur. Die Perioden sind für die Niederschlagssumme signifikant unterschiedlich, wobei deutliche Zunahme von 30 bis 33% in der Periode 1991 bis 2019 ersichtlich ist (Tabelle 4). Die Zunahme von bis zu 1,2°C in der winterlichen Mitteltemperatur ist an allen Punkten im Skigebiet signifikant ((Tabelle 5).

Der Vergleich der zwei Perioden zeigt, dass die mittlere Gesamtschneehöhe (Naturschnee) im Skigebiet in allen Höhenlagen tendenziell um bis zu 10% zugenommen hat (Tabelle 6). Die Schneedeckendauer ($HS \geq 30$ cm, Anzahl der Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 cm) hat in den höheren Lagen leicht zugenommen (bis zu 4 Tage mehr), in den tiefen Lagen um 4 Tage abgenommen. Wird die technische Schneeproduktion berücksichtigt, so ist in der Periode 1992 bis 2019 eine Abnahme von bis zu 4 Tagen ersichtlich. Dies steht im Zusammenhang mit der Abnahme der potentiellen Beschneistunden in diesem Zeitraum (Tabelle 9).

Die Änderung der Anzahl der möglichen Beschneigungsstunden ($T_f \leq -4^\circ\text{C}$) für die Periode 15. November bis 15. Dezember beträgt bis zu 24% (Tabelle 10). Für die Beschneigungszeitfenster 15. November bis 6. Jänner und auch für 15. November bis 31. Jänner ((Tabellen 11 und 12) betragen die Änderungen zwischen -14 und -18%. Die Abnahmen der möglichen Beschneigungsstunden sind mit der beobachteten Temperaturzunahme erklärbar.

Tabelle 13 zeigt die Änderungen bezüglich Beginn und Ende der Skisaison für Naturschnee, wobei hier die Skisaison definiert ist als der Zeitraum in der die Schneehöhe durchgehend mindestens 30 cm beträgt. Gut ersichtlich ist, dass sich der Beginn in der Periode 1991 bis 2019 um bis zu 10 Tage nach vor verlegt hat, im Vergleich zur Periode 1962 bis 1990. Das Ende der Skisaison ist zwischen 4 und 8 Tage früher eingetreten. In Periode 1962 bis 1990 waren die Bedingungen für die technische Schneeproduktion besser, aufgrund der niedrigeren Temperaturen. Dies wird in Tabelle Tabelle 14 deutlich.

Niederschlagssumme

Tabelle 4: Mittlere akkumulierte Niederschlagssumme: Klimaänderungssignal, betreffend der Mittelwerte der Perioden 1991 bis 2019 und 1962 bis 1990. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und dem Mittelwert der Periode 1962 bis 1990. Rot: Perioden sind signifikant verschieden. Saison: DJFM.

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [mm]	Δ [%]	Sig
					1962-1990 [mm]	1991-2019 [mm]			
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	344,7	448,4	103,7	30	
Piste FIS	2	1230	SO	20	334,3	439,1	104,8	31	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	284,6	378,1	93,5	33	

Tagesmitteltemperatur

Tabelle 5: Mittlere Tagesmitteltemperatur: Klimaänderungssignal, betreffend der Mittelwerte der Perioden 1991 bis 2019 und 1962 bis 1990. Rot: Perioden sind signifikant verschieden. Saison: DJFM.

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [°C]	Sig
					1962-1990 [°C]	1991-2019 [°C]		
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	-3,0	-1,9	1,1	
Piste FIS	2	1230	SO	20	-2,6	-1,5	1,1	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	-2,2	-1,0	1,2	

mittlere Gesamtschneehöhe HS

Tabelle 6: Mittlere Gesamtschneehöhe (Naturschnee): Klimaänderungssignal, betreffend der Mittelwerte der Perioden 1991 bis 2019 und 1962 bis 1990. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und dem Mittelwert der Periode 1962 bis 1990. Rot: Perioden sind signifikant verschieden. Saison: DJFM.

Perioden Name	ID	Höhe [m]	Exp. [°]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [cm]	Δ [%]	Sig
					1962-1990 [cm]	1991-2019 [cm]			
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	67,4	73,5	6,1	9	
Piste FIS	2	1230	SO	20	59,0	64,8	5,8	10	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	42,0	45,0	3,0	7	

Schneedeckendauer, $HS \geq 1 \text{ cm}$

Tabelle 7: Mittlere Schneedeckendauer, $HS \geq 1 \text{ cm}$ (Naturschnee): Klimaänderungssignal, betreffend der Mittelwerte der Perioden 1991 bis 2019 und 1962 bis 1990. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und dem Mittelwert der Periode 1962 bis 1990. Rot: Perioden sind signifikant verschieden. Saison: DJFM.

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [Tage]	Δ [%]	Sig
					1962-1990 [Tage]	1991-2019 [Tage]			
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	117,4	113,7	-3,7	-3	
Piste FIS	2	1230	SO	20	115,8	112,1	-3,7	-3	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	112,9	105,2	-7,7	-7	

Schneedeckendauer, $HS \geq 30 \text{ cm}$

Tabelle 8: Mittlere Schneedeckendauer, $HS \geq 30 \text{ cm}$ (Naturschnee): Klimaänderungssignal, betreffend der Mittelwerte der Perioden 1991 bis 2019 und 1962 bis 1990. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und dem Mittelwert der Periode 1962 bis 1990. Rot: Perioden sind signifikant verschieden. Saison: DJFM.

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [Tage]	Δ [%]	Sig
					1962-1990 [Tage]	1991-2019 [Tage]			
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	84,3	87,8	3,5	4	
Piste FIS	2	1230	SO	20	80,2	82,2	2,0	2	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	68,2	64,2	-4,0	-6	

Schneedeckendauer, $HS \geq 30 \text{ cm}$ - Naturschnee plus technischer Schnee

Tabelle 9: Mittlere Schneedeckendauer, $HS \geq 30 \text{ cm}$ (Naturschnee plus technischer Schnee): Klimaänderungssignal, betreffend der Mittelwerte der Perioden 1991 bis 2019 und 1962 bis 1990. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und dem Mittelwert der Periode 1962 bis 1990. Rot: Perioden sind signifikant verschieden. Saison: DJFM.

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [Tage]	Δ [%]	Sig
					1962-1990 [Tage]	1991-2019 [Tage]			
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	117,4	114,0	-3,4	-3	
Piste FIS	2	1230	SO	20	116,4	112,1	-4,3	-4	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	116,9	113,7	-3,2	-3	

Anzahl der möglichen Beschneigungsstunden 15. Nov bis 15. Dez

Tabelle 10: Beschneigungsstunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$) im Zeitraum 15. November bis 15. Dezember: Klimaänderungssignal, betreffend der Mittelwerte der Perioden 1991 bis 2019 und 1962 bis 1990. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und dem Mittelwert der Periode 1962 bis 1990. Rot: Perioden sind signifikant verschieden.

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [Stunden]	Δ [%]	Sig
					1962-1990 [Stunden]	1991-2019 [Stunden]			
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	300,2	236,9	-63,3	-21	
Piste FIS	2	1230	SO	20	278,7	218,6	-60,1	-22	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	254,0	193,6	-60,4	-24	

Anzahl der möglichen Beschneigungsstunden 15. Nov bis 06. Jän

Tabelle 11: Beschneigungsstunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$) im Zeitraum 15. November bis 6. Jänner: Klimaänderungssignal, betreffend der Mittelwerte der Perioden 1991 bis 2019 und 1962 bis 1990. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und dem Mittelwert der Periode 1962 bis 1990. Rot: Perioden sind signifikant verschieden.

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [Stunden]	Δ [%]	Sig
					1962-1990 [Stunden]	1991-2019 [Stunden]			
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	575,2	487,6	-87,6	-15	
Piste FIS	2	1230	SO	20	550,3	458,2	-92,1	-17	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	518,4	423,1	-95,3	-18	

Anzahl der möglichen Beschneigungsstunden 15. Nov bis 31. Jän

Tabelle 12: Beschneigungsstunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$) im Zeitraum 15. November bis 31. Jänner: Klimaänderungssignal, betreffend der Mittelwerte der Perioden 1991 bis 2019 und 1962 bis 1990. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und dem Mittelwert der Periode 1962 bis 1990. Rot: Perioden sind signifikant verschieden.

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [Stunden]	Δ [%]	Sig
					1962-1990 [Stunden]	1991-2019 [Stunden]			
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	921,7	792,4	-129,3	-14	
Piste FIS	2	1230	SO	20	886,9	749,0	-137,9	-16	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	842,7	699,3	-143,4	-17	

Tabelle 13: Beginn und Ende der Skisaison (Naturschnee): Klimaänderungssignal, betreffend der Mittelwerte der Perioden 1991 bis 2019 und 1962 bis 1990. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und dem Mittelwert der Periode 1962 bis 1990. Rot: Perioden sind signifikant verschieden. Saison: DJFM.

Beginn der Skisaison, durchgehende Schneehöhe $HS \geq 30$ cm, Naturschnee

Perioden Name	ID	Höhe [m]	Exp. [°]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ		Sig
					1962-1990 [-]	1991-2019 [-]	[Tage]		
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	03. Jan	24. Dez	-10	-11	
Piste FIS	2	1230	SO	20	04. Jan	27. Dez	-8	-8	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	09. Jan	05. Jan	-4	-4	

Ende der Skisaison, durchgehende Schneehöhe $HS \geq 30$ cm, Naturschnee

Perioden Name	ID	Höhe [m]	Exp. [°]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ		Sig
					1962-1990 [-]	1991-2019 [-]	[Tage]		
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	21. Apr	14. Apr	-7	-4	
Piste FIS	2	1230	SO	20	09. Apr	05. Apr	-4	-2	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	28. Mär	20. Mär	-8	-5	

Tabelle 14: Beginn und Ende der Skisaison (Naturschnee+techn. Schnee): Klimaänderungssignal, betreffend der Mittelwerte der Perioden 1991 bis 2019 und 1962 bis 1990. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und dem Mittelwert der Periode 1962 bis 1990. Rot: Perioden sind signifikant verschieden.

Beginn der Skisaison, durchgehende Schneehöhe $HS \geq 30$ cm, Naturschnee+techn. Schnee

Perioden Name	ID	Höhe [m]	Exp. [°]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ		Sig
					1962-1990 [-]	1991-2019 [-]	[Tage]		
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	30. Nov	03. Dez	3	6	
Piste FIS	2	1230	SO	20	01. Dez	04. Dez	3	6	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	01. Dez	05. Dez	4	6	

Ende der Skisaison, durchgehende Schneehöhe $HS \geq 30$ cm, Naturschnee+techn. Schnee

Perioden Name	ID	Höhe [m]	Exp. [°]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ		Sig
					1962-1990 [-]	1991-2019 [-]	[Tage]		
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	21. Mai	11. Mai	-10	-4	
Piste FIS	2	1230	SO	20	12. Mai	01. Mai	-11	-5	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	11. Mai	30. Apr	-11	-5	

9.1.9 Periode 1991 bis 2019: Naturschnee versus technische Schneeproduktion

In den Tabellen 15 bis 18 sind die Differenzen verschiedener Schneeindikatoren der Periode 1991 bis 2019 mit und ohne Berücksichtigung von technischem Schnee aufgelistet. Dies gibt Auskunft über den Einfluss der technischen Schneeproduktion auf das langjährige Mittel.

Es zeigt sich, dass mit Hilfe der technischen Schneeproduktion die mittlere Gesamtschneehöhe zwischen 1. Dezember und 31. März um 106 bis 238% erhöht wird, wobei an allen Punkten im Skigebiet die Änderungen signifikant sind (Tabelle 15). Die Zunahmen betragen bis zu 107 cm.

Auch ist die Änderung bei der Schneedeckendauer für alle Punkte signifikant positiv (Tabelle 16). Die größten Änderungen ergeben sich hierbei in den tiefen Lagen. So nimmt die Schneedeckendauer um 49 Tage zu (Sessellift Talstation). Auch wird der Beginn der Skisaison im Skigebiet im Mittel um bis zu 30 Tage nach vor verlegt, das Ende tritt um ca. 26 bis 41 Tage später ein. Es zeigt sich, dass alle Höhenlagen im Skigebiet von der Schneeproduktion profitieren.

Gesamtschneehöhe HS: Naturschnee vs. Naturschnee + technischer Schnee

Tabelle 15: Mittlere Gesamtschneehöhe: Differenz, betreffend der Mittelwerte der Perioden 1991 bis 2019 mit und ohne technische Schneeproduktion. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und dem Mittelwert der Periode 1991 bis 2019 ohne technischen Schnee. Rot: Perioden sind signifikant verschieden. Saison: DJFM.

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [°]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [cm]	Δ [%]	Sig
					Naturschnee	techn. Schnee			
					1991-2019 [cm]	1991-2019 [cm]			
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	73,5	151,4	77,9	106	
Piste FIS	2	1230	SO	20	64,8	136,6	71,8	111	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	45,0	152,2	107,2	238	

Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm: Naturschnee vs. Naturschnee + technischer Schnee

Tabelle 16: Mittlere Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm: Differenz, betreffend der Mittelwerte der Perioden 1991 bis 2019 mit und ohne technische Schneeproduktion. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und dem Mittelwert der Periode 1991 bis 2019 ohne technischen Schnee. Rot: Perioden sind signifikant verschieden. Saison: DJFM.

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [Tage]	Δ [%]	Sig
					Naturschnee	techn. Schnee			
					1991-2019 [Tage]	1991-2019 [Tage]			
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	87,8	114,0	26,2	30	
Piste FIS	2	1230	SO	20	82,2	112,1	29,9	36	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	64,2	113,7	49,5	77	

Beginn der Skisaison ($HS \geq 30$ cm): Naturschnee vs. Naturschnee + technischer Schnee

Tabelle 17: Beginn der Skisaison ($HS \geq 30$ cm): Differenz, betreffend der Mittelwerte der Perioden 1991 bis 2019 mit und ohne technische Schneeproduktion. Rot: Perioden sind signifikant verschieden.

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [°]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [Tage]	Sig
					Naturschnee 1991-2019 [-]	techn. Schnee 1991-2019 [-]		
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	24. Dez	03. Dez	-21	
Piste FIS	2	1230	SO	20	27. Dez	04. Dez	-23	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	05. Jan	05. Dez	-31	

Ende der Skisaison ($HS \geq 30$ cm): Naturschnee vs. Naturschnee + technischer Schnee

Tabelle 18: Ende der Skisaison ($HS \geq 30$ cm): Differenz, betreffend der Mittelwerte der Perioden 1991 bis 2019 mit und ohne technische Schneeproduktion. Rot: Perioden sind signifikant verschieden.

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [Tage]	Sig
					Naturschnee 1991-2019 [-]	techn. Schnee 1991-2019 [-]		
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	14. Apr	11. Mai	27	
Piste FIS	2	1230	SO	20	05. Apr	01. Mai	26	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	20. Mär	30. Apr	41	

9.2 Zukunft: 1972 bis 2099

9.2.1 Zeitlicher Verlauf der Emissionsszenarien bis in die ferne Zukunft

Die tägliche Niederschlagssumme und Temperatur der drei Emissionsszenarien RCP8.5, RCP4.5 und RCP2.6 dienen als Eingangsdaten für die SNOWGRID-CL Schneedeckenmodellierung bis in die ferne Zukunft 2099. Die Emissionsszenarien RCP8.5 und RCP4.5 umfassen jeweils sechzehn Modellsimulationen (regionale Klimamodellläufe), RCP2.6 acht Modellsimulationen. Für jede einzelne Modellsimulation dieser Ensembles wird die Gesamtschneehöhe modelliert und in weiterer Folge die Schneeindikatoren abgeleitet.

Die Abbildungen 22 bis 27 zeigen die winterlichen (DJFM) Verläufe (Projektionen) der Niederschlagssumme, Temperatur, Gesamtschneehöhe und Schneedeckendauer (Naturschnee, Naturschnee plus technischer Schnee, siehe auch Kapitel 6.2) der Klima-Szenarien an den drei ausgewählten Punkten im Skigebiet. Die historischen Läufe der Emissionsszenarien enden 2005, die Zukunftsläufe starten 2006. Die Beobachtung, basierend auf den gegitterten Beobachtungsdatensatz SPARTACUS (Temperatur, Schneeindikatoren) bzw. GPARD1 (Niederschlagssumme), ist zusätzlich eingezeichnet (schwarze Linien). Bei den modellierten Schneeindikatoren für die Vergangenheit (schwarze Linien) wurde SNOWGRID-CL mit dem SPARTACUS Temperaturdatensatz und dem GPARD1-Niederschlagsdatensatz angetrieben (Beobachtung: SP_TGP_{RR}). Hierbei soll erwähnt werden, dass einzelne Jahre der Beobachtung nicht mit den Lösungen der historischen Läufe der Emissionsszenarien verglichen werden dürfen (siehe Kapitel 5). Es macht nur Sinn, Verläufe über mindestens 30-Jährige Perioden gegenüberzustellen. Innerhalb kürzerer Perioden kann die natürliche Variabilität den langfristigen Trend maskieren. Letztendlich soll der Vergleich Aufschluss darüber erbringen, ob Tendenzen in den Beobachtungen auch in den historischen Läufen der Szenarien zu finden sind. Die Übereinstimmung dieser Tendenzen bzw. der Richtung der Änderungen liefert einen Hinweis auf die Güte der Emissionsszenarien. Zu diesem Zweck sind die 30-Jährigen mittleren Zustände, bezüglich der Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099, ebenfalls dargestellt. Die Schwankungsbreite der Beobachtung wird über die Standardabweichung (σ , Streuung um den Mittelwert) angegeben. In den Abbildungen spannt die Schwankungsbreite einen Bereich "Mittelwert plus/minus einer Standardabweichung" auf. Dies bedeutet, dass annähernd 68% der Beobachtungsdaten innerhalb dieses Bereiches liegen.

Die Linienverläufe der Temperatur, Niederschlagssumme sowie der Schneeindikatoren der drei Emissionsszenarien und der Beobachtung zeigen zwischen 1972 und 2005 eine im Mittel vergleichbare Tendenz für alle Punkte im Skigebiet. Die Beobachtung befindet sich meist innerhalb der Bandbreite der Szenarien (ausgedrückt über die 10 und 90% Ensemble-Perzentile, schattierte Flächen). In diesem Zeitraum ändert sich z.B. die Niederschlagssumme nur wenig, die winterliche Mitteltemperatur nimmt zu. Ab 2006 (Zukunftsläufe) ist eine Zunahme der Niederschlagssumme erkennbar, wobei die Änderungen im Skigebiet bis in die ferne Zukunft 2099 wellenförmig verlaufen. Hierbei sind die zukünftigen Verläufe der drei Emissionsszenarien ähnlich. Die Niederschlagszeitreihen sind im Allgemeinen von einer hohen Jahr-zu-Jahr und dekadischen Variabilität gekennzeichnet.

Die saisonalen Temperaturverläufe der Emissionsszenarien sind bis in die nahe Zukunft 2050 vergleichbar. Ab 2050 projiziert RCP8.5 (worst-case Szenario) eine deutliche Temperaturzunahme, unabhängig von der Seehöhe. Im Gegensatz dazu ist für RCP4.5 (begrenzttes Klimaschutz-Szenario) eine gedämpfte Zunahme der Temperatur erkennbar. Im klimafreundlichen Szenario RCP2.6 wird eine Stabilisierung der Temperaturänderung bis in die ferne Zukunft 2099 erreicht.

Wird die saisonale Gesamtschneehöhe und Schneedeckendauer (beides Naturschnee) für RCP8.5 betrachtet, so zeigt sich für alle Seehöhen im Skigebiet eine tendenzielle Abnahme, wobei die Stärke der Änderungen von der Seehöhe abhängt. Im Vergleich dazu fallen die Änderungen in RCP4.5 und RCP2.6 ab 2050 deutlich geringer aus. Auch hier sind die zeitlichen Verläufe von einer starken Jahr-zu-Jahr Variabilität geprägt. In allen Höhenlagen ist bei der saisonalen Schneedeckendauer (Naturschnee) die Bandbreite (schattierte Flächen) der zu erwartenden zukünftigen Verläufe sehr groß. Ein Grund dafür ist, dass die Variabilität der Niederschlagssumme sowie der Temperatur in den Wintermonaten hoch ist. Diese Variabilität spiegelt sich vor allem in der Schneedeckendauer wider.

Unter Berücksichtigung von technischer Schneeproduktion wird die saisonale Gesamtschneehöhe hin zu höheren Werten

verschoben. Die Tendenzen bleiben grundsätzlich erhalten. Dies gilt vor allem für die Emissionsszenarien RCP8.5 und RCP4.5. Die technische Beschneigung führt weiters zu einer markanten Stabilisierung der Schneedeckendauer und zu einer gedämpften Jahr-zu-Jahr Variabilität. In RCP8.5 ist dennoch eine im Mittel deutliche Abnahme ab 2050 ersichtlich, welche von einer hohen Bandbreite an möglichen Zuständen begleitet wird. Dies wiederum bedeutet, dass die Ergebnisse der Modellierung mit einer größeren Unsicherheit behaftet sind. Die Änderungen für RCP4.5 und RCP2.6 fallen bei der Schneedeckendauer deutlich geringer aus, im Vergleich zur vergangenen Periode 1972 bis 2001. Es zeigt sich weiters, dass alle Höhenlagen im Skigebiet von der technischen Beschneigung profitieren. Darüber hinaus verdeutlichen die Ergebnisse die Wichtigkeit, dass sowohl klimapolitische als auch gesellschaftspolitische Maßnahmen auf regionaler, nationaler und globaler Ebene umgesetzt werden, um die Eintrittswahrscheinlichkeit der möglichen Zukunftsprojektion RCP8.5 zu verringern.

1 Sessellift Talstation (1080 m)

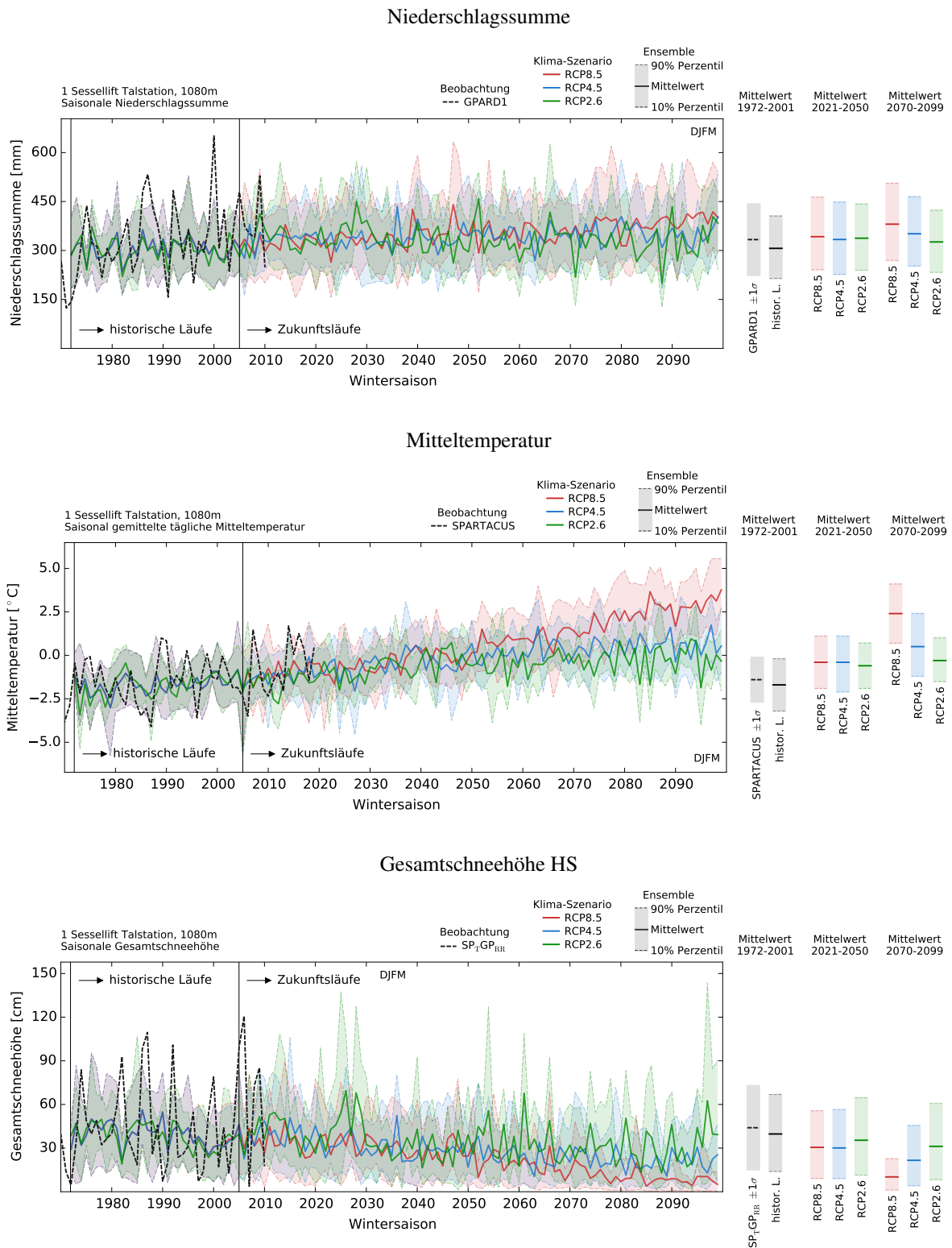
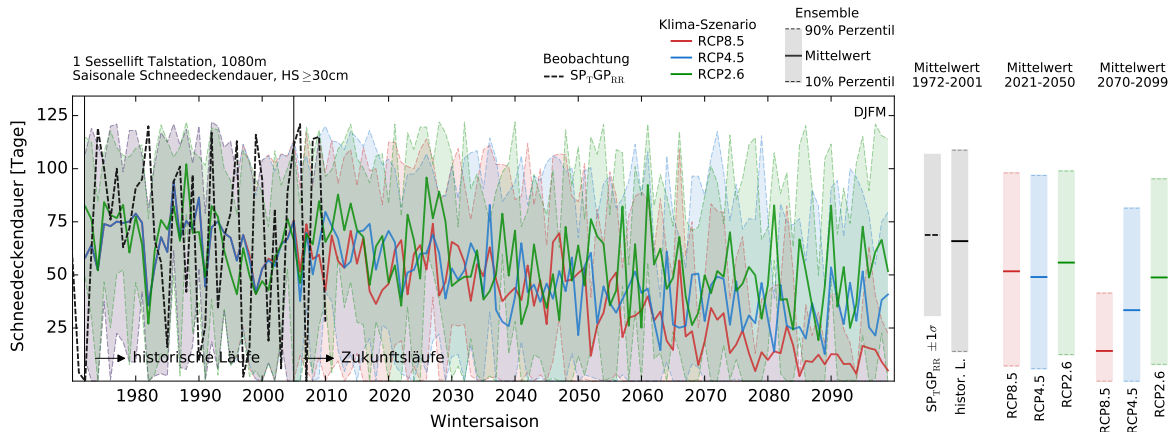


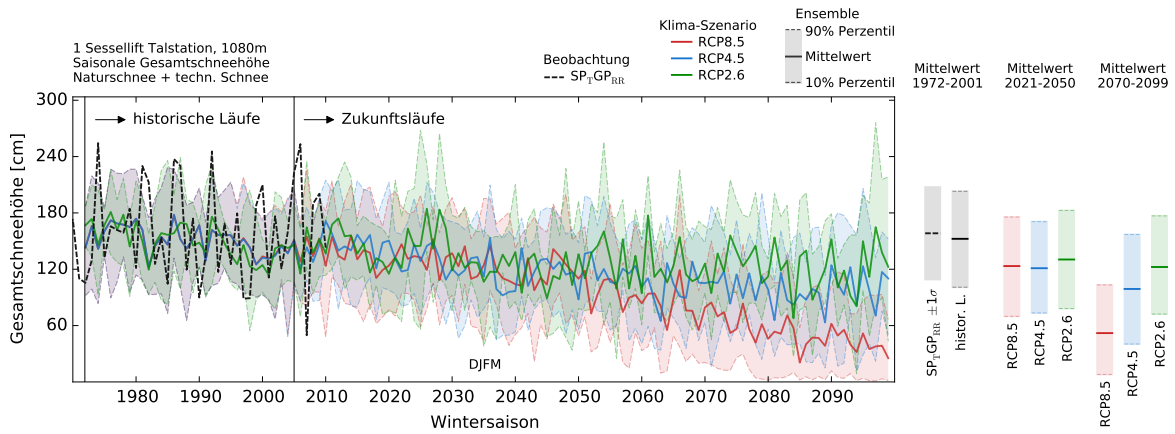
Abbildung 22: Linienverläufe der saisonalen (DJFM) Niederschlagssumme (oben), Mitteltemperatur (Mitte) und Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) am Punkt 1 Sessellift Talstation (1080 m) bis in die ferne Zukunft 2099. Die dicken Linien stellen den Ensemble-Mittelwert dar. Schattierte Flächen umfassen das 10- und 90% Perzentil des Modell-Ensembles (Bandbreite, Unsicherheit). Historische Läufe bis 2005, ab 2006 beginnen die Zukunftsläufe. Die Zeitreihe, basierend auf den Beobachtungsdatensätzen, ist in schwarz dargestellt. 30-Jährige Mittelwerte, bezüglich der Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099, sind rechts abgebildet.

1 Sessellift Talstation (1080 m)

Schneedeckendauer, HS ≥ 30 cm



Gesamtschneehöhe HS: Naturschnee plus technischer Schnee



Schneedeckendauer, HS ≥ 30 cm: Naturschnee plus technischer Schnee

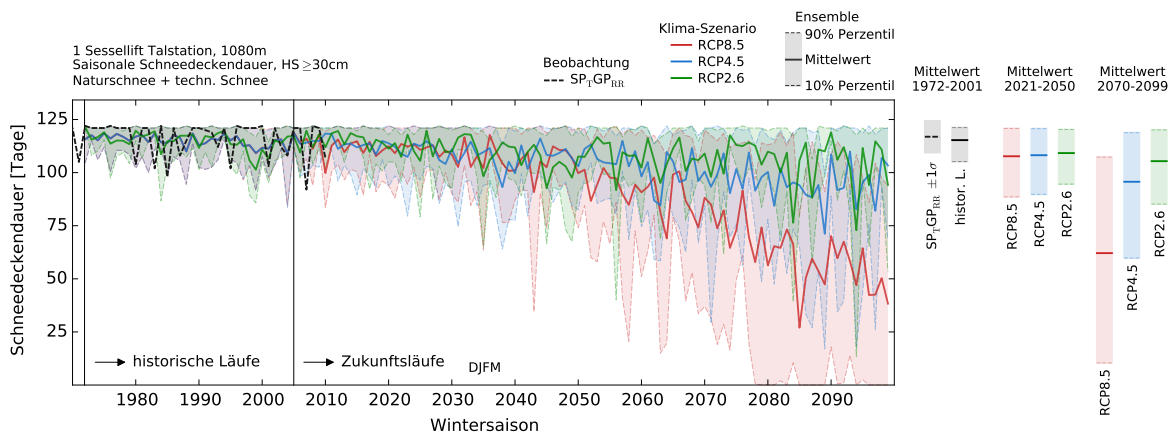
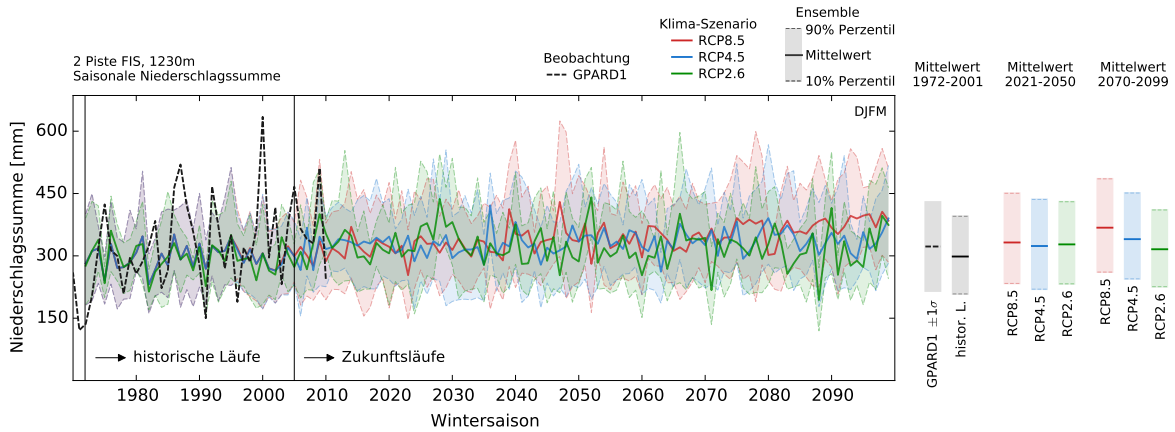


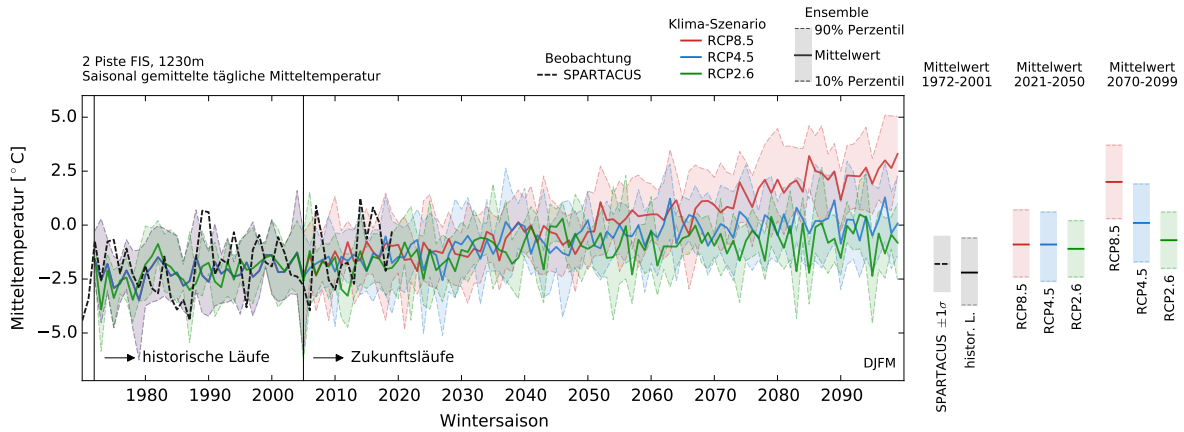
Abbildung 23: Linienverläufe der saisonalen (DJFM) Schneedeckendauer, HS ≥ 30 cm, (Naturschnee, oben), Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee+techn. Schnee, Mitte) und der Schneedeckendauer, HS ≥ 30 cm, (Naturschnee+techn. Schnee, unten) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) am Punkt 1 Sessellift Talstation (1080 m) bis in die ferne Zukunft 2099. Die dicken Linien stellen den Ensemble-Mittelwert dar. Schattierte Flächen umfassen das 10- und 90% Perzentil des Modell-Ensembles (Bandbreite, Unsicherheit). Historische Läufe bis 2005, ab 2006 beginnen die Zukunftsläufe. Die Zeitreihe, basierend auf den Beobachtungsdatensätzen, ist in schwarz dargestellt. 30-Jährige Mittelwerte, bezüglich der Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099, sind rechts abgebildet.

2 Piste FIS (1230 m)

Niederschlagssumme



Mitteltemperatur



Gesamtschneehöhe HS

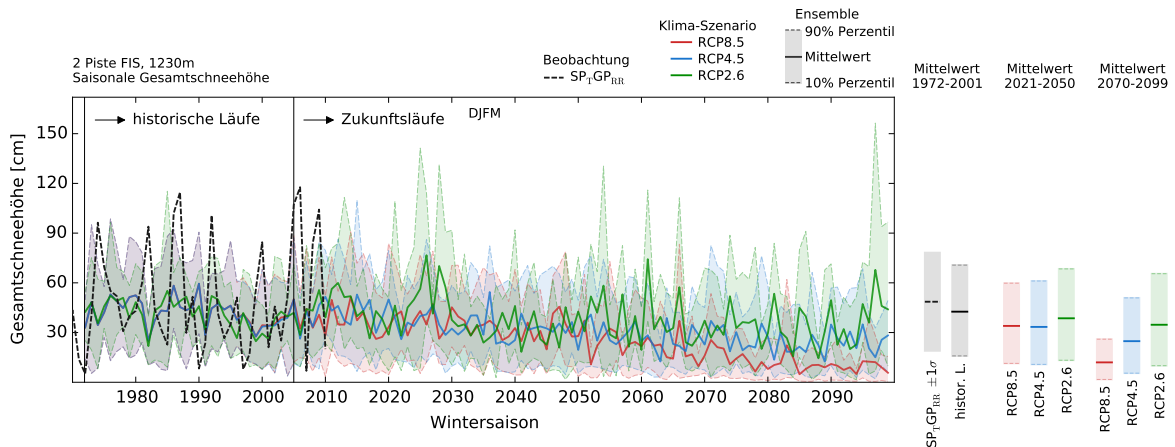


Abbildung 24: Linienverläufe der saisonalen (DJFM) Niederschlagssumme (oben), Mitteltemperatur (Mitte) und Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) am Punkt 2 Piste FIS (1230 m) bis in die ferne Zukunft 2099. Die dicken Linien stellen den Ensemble-Mittelwert dar. Schattierte Flächen umfassen das 10- und 90% Perzentil des Modell-Ensembles (Bandbreite, Unsicherheit). Historische Läufe bis 2005, ab 2006 beginnen die Zukunftsläufe. Die Zeitreihe, basierend auf den Beobachtungsdatensätzen, ist in schwarz dargestellt. 30-Jährige Mittelwerte, bezüglich der Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099, sind rechts abgebildet.

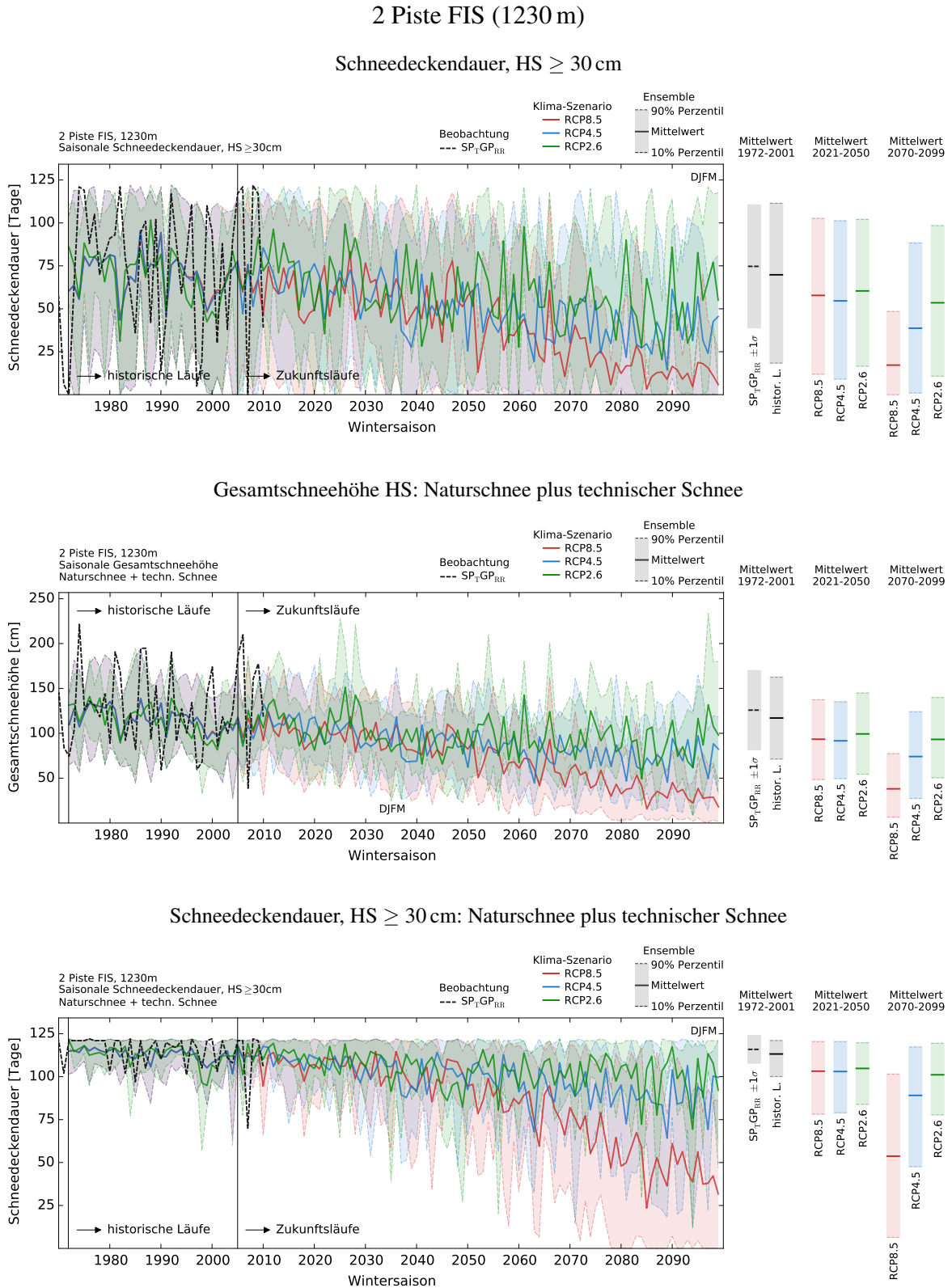


Abbildung 25: Linienverläufe der saisonalen (DJFM) Schneedeckendauer, HS \geq 30 cm, (Naturschnee, oben), Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee+techn. Schnee, Mitte) und der Schneedeckendauer, HS \geq 30 cm, (Naturschnee+techn. Schnee, unten) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) am Punkt 2 Piste FIS (1230 m) bis in die ferne Zukunft 2099. Die dicken Linien stellen den Ensemble-Mittelwert dar. Schattierte Flächen umfassen das 10- und 90% Perzentil des Modell-Ensembles (Bandbreite, Unsicherheit). Historische Läufe bis 2005, ab 2006 beginnen die Zukunftsläufe. Die Zeitreihe, basierend auf den Beobachtungsdatensätzen, ist in schwarz dargestellt. 30-Jährige Mittelwerte, bezüglich der Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099, sind rechts abgebildet.

3 Sessellift Bergstation (1380 m)

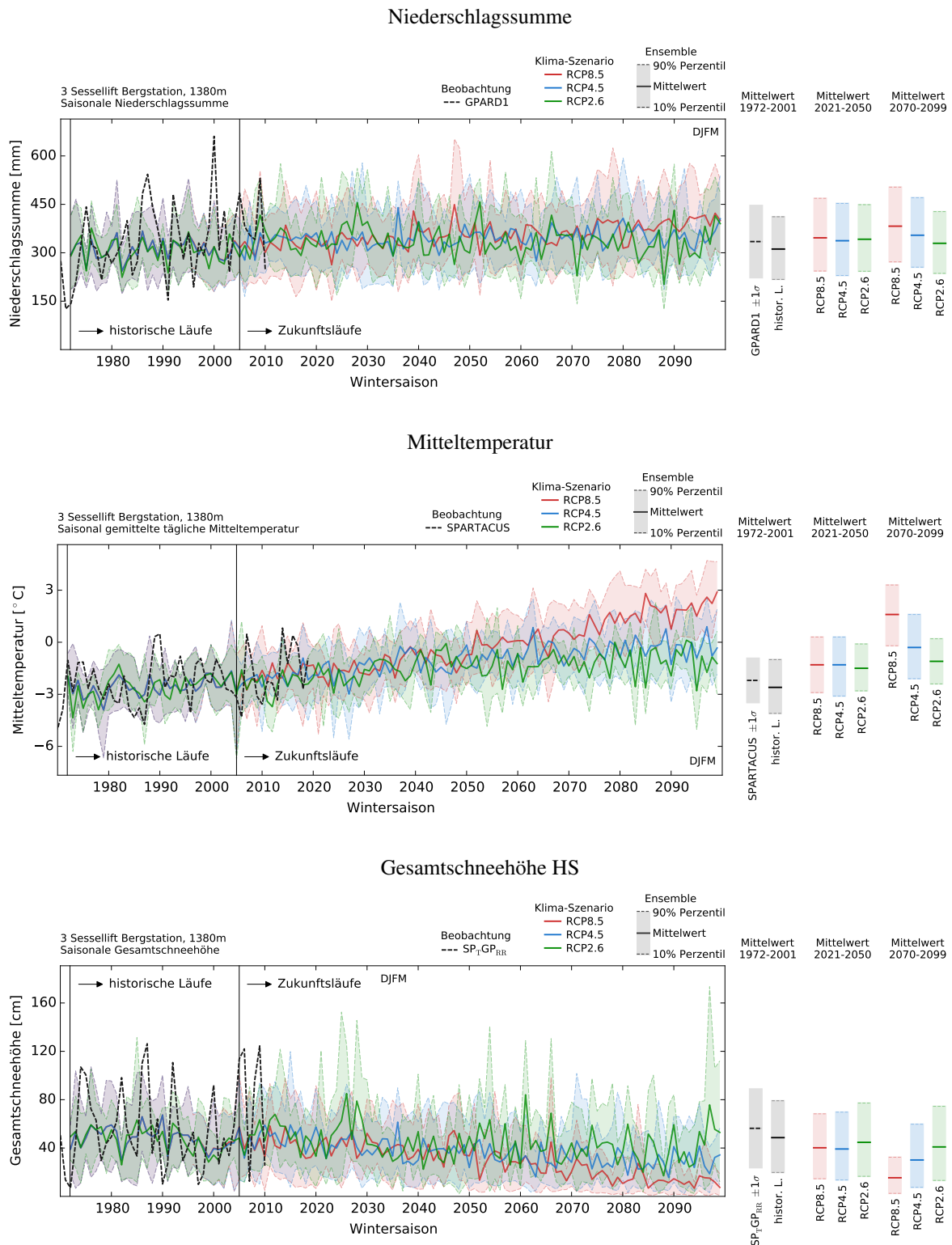
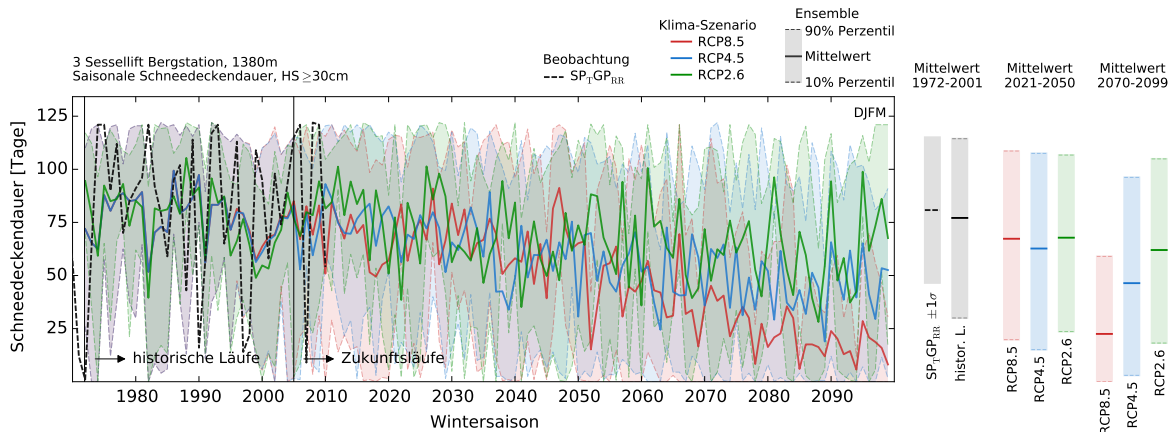


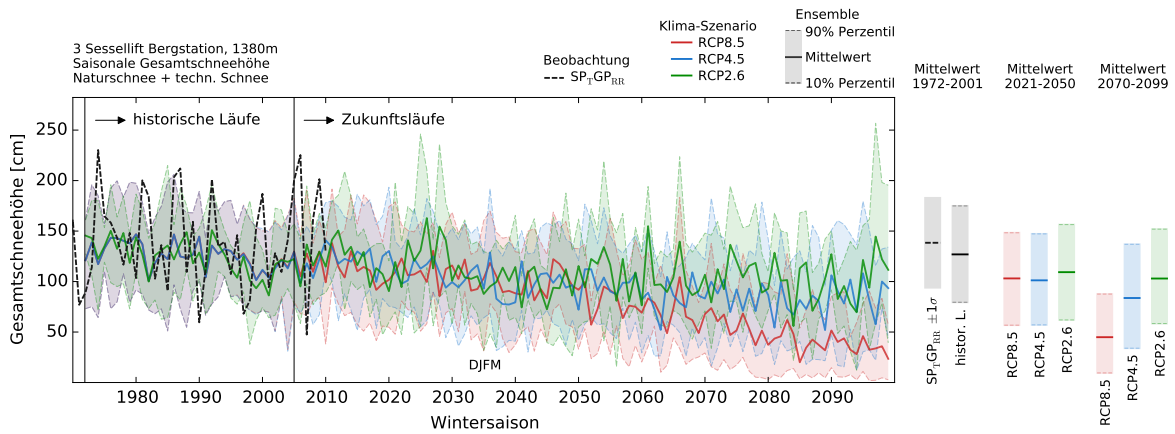
Abbildung 26: Linienvläufe der saisonalen (DJFM) Niederschlagssumme (oben), Mitteltemperatur (Mitte) und Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) am Punkt 3 Sessellift Bergstation (1380 m) bis in die ferne Zukunft 2099. Die dicken Linien stellen den Ensemble-Mittelwert dar. Schattierte Flächen umfassen das 10- und 90% Perzentil des Modell-Ensembles (Bandbreite, Unsicherheit). Historische Läufe bis 2005, ab 2006 beginnen die Zukunftsläufe. Die Zeitreihe, basierend auf den Beobachtungsdatensätzen, ist in schwarz dargestellt. 30-Jährige Mittelwerte, bezüglich der Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099, sind rechts abgebildet.

3 Sessellift Bergstation (1380 m)

Schneedeckendauer, HS \geq 30 cm



Gesamtschneehöhe HS: Naturschnee plus technischer Schnee



Schneedeckendauer, HS \geq 30 cm: Naturschnee plus technischer Schnee

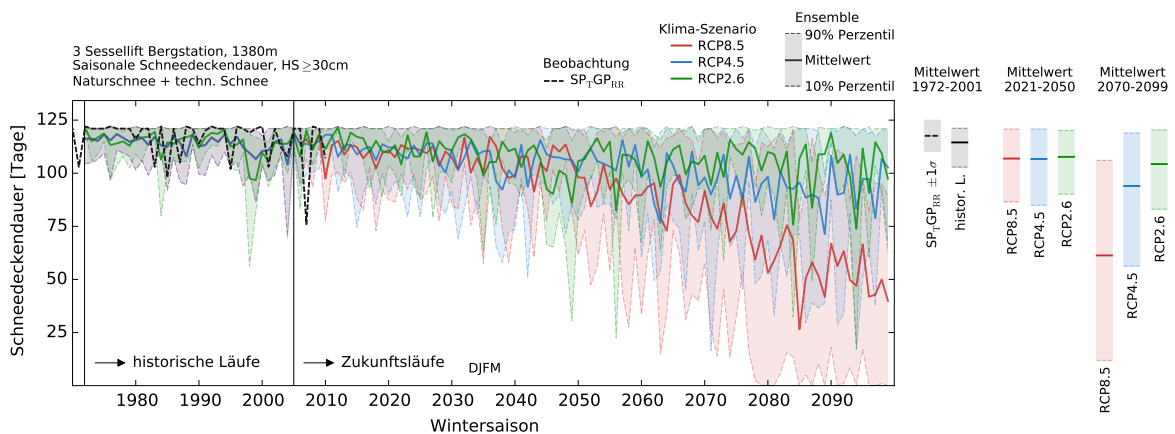


Abbildung 27: Linienverläufe der saisonalen (DJFM) Schneedeckendauer, HS \geq 30 cm, (Naturschnee, oben), Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee+techn. Schnee, Mitte) und der Schneedeckendauer, HS \geq 30 cm, (Naturschnee+techn. Schnee, unten) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) am Punkt 3 Sessellift Bergstation (1380 m) bis in die ferne Zukunft 2099. Die dicken Linien stellen den Ensemble-Mittelwert dar. Schattierte Flächen umfassen das 10- und 90% Perzentil des Modell-Ensembles (Bandbreite, Unsicherheit). Historische Läufe bis 2005, ab 2006 beginnen die Zukunftsläufe. Die Zeitreihe, basierend auf den Beobachtungsdatensätzen, ist in schwarz dargestellt. 30-Jährige Mittelwerte, bezüglich der Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099, sind rechts abgebildet.

9.2.2 Zeitlicher Verlauf der Anzahl der möglichen Beschneistunden bis in die ferne Zukunft

Die zeitlichen Verläufe der Anzahl der möglichen Beschneistunden an den drei Punkten im Skigebiet Brunnalm - Hohe Veitsch bis in die ferne Zukunft 2099 ist in der Abbildung 28 dargestellt. Der Zeitraum, in welchem die Beschneistunden gezählt werden ist 15. November bis 31. Jänner. Hierbei werden die Stunden summiert, an denen die modellierte Feuchtkugeltemperatur T_f kleiner gleich -4°C ist. Gleich wie im vorherigen Kapitel sind die 30-jährigen mittleren Zustände, bezüglich der Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099, dargestellt.

Deutlich wird, dass in allen Seehöhen eine Abnahme projiziert wird, unabhängig davon welches Emissionsszenario betrachtet wird. Dies deutet darauf hin, dass die zu erwartende Temperaturzunahme in allen Höhenlagen spürbar sein wird. Die stärksten Abnahmen zeigen sich erwartungsgemäß in RCP8.5. Hierbei kommt es für die Periode 2070 bis 2099 im Mittel zu einer deutlichen Reduktion der Beschneistunden, im Vergleich zum Zeitraum 1972 bis 2001. In RCP4.5 ist ab 2050 eine gedämpfte Abnahme erkennbar, in RCP2.6 stabilisiert sich die Anzahl der Beschneistunden ab Mitte des Jahrhunderts. Die zeitlichen Verläufe weisen im Allgemeinen eine hohe Jahr-zu-Jahr Variabilität auf. Darüber hinaus ist das Spektrum möglicher zukünftiger Zustände breit (Bandbreite).

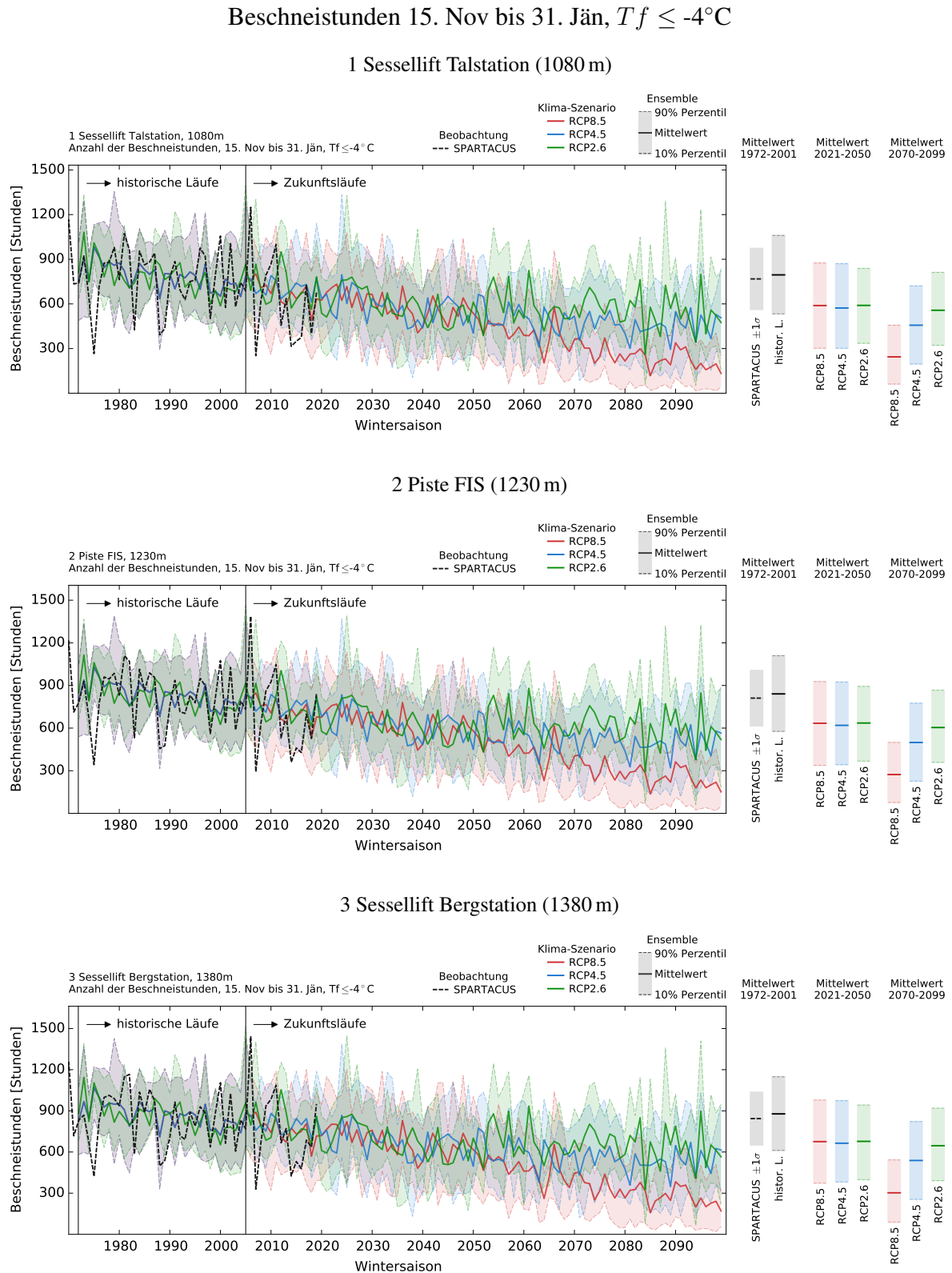


Abbildung 28: Linienverläufe der Anzahl der möglichen Beschneistunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$) im Zeitraum 15. November bis 31. Jänner der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) an den Punkten 1, 2 und 3 bis in die ferne Zukunft 2099. Die dicken Linien stellen den Ensemble-Mittelwert dar. Schattierte Flächen umfassen das 10- und 90% Perzentil des Modell-Ensembles (Bandbreite, Unsicherheit). Historische Läufe bis 2005, ab 2006 beginnen die Zukunftsläufe. Die Zeitreihe, basierend auf den Beobachtungsdatensatz SPARTACUS, ist in schwarz dargestellt. 30-Jährige Mittelwerte, bezüglich der Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099, sind rechts abgebildet.

9.2.3 Emissionsszenario RCP8.5: Naturschnee und technische Schneeproduktion

Die Konfiguration der technischen Schneeproduktion (Kapitel 6.2) wird für die Zukunftssimulationen beibehalten. Die SNOWGRID-CL Schneedeckenmodellierung erfolgt einerseits nur mit Naturschnee und andererseits mit aktivierter Schneeproduktion. Der Einfluss der technischen Schneeproduktion soll am Beispiel der Klima-Szenarien RCP8.5 (worst-case Szenario) und RCP2.6 (klimafreundliches Szenario) dargestellt werden.

Die Abbildungen 29 und 30 zeigen die zukünftigen Verläufe der Dauer sowie Beginn und Ende der Skisaisonen für den höchst gelegenen Punkt 3, stellvertretend für das Skigebiet. Hierbei gibt die Dauer der Skisaison die Länge der Periode an, in der es eine durchgehend geschlossene Schneedecke mit einer Schneehöhe von mindestens 30 cm gibt, innerhalb des Bezugszeitraumes 1. Oktober bis 31. August (ONDJFMAMJJA). Es zeigt sich am Beispiel von RCP8.5, dass die technische Schneeproduktion erwartungsgemäß zu einer Verlängerung der Skisaison führt (siehe Abbildung 29). Die Dauer der Skisaison (Naturschnee) nimmt bis 2099 dramatisch ab. Die technische Beschneigung führt zwar im Mittel zu einer markanten Verlängerung der Skisaison, jedoch weist der zeitliche Verlauf ein breites Spektrum von möglichen zukünftigen Zuständen auf (grün schattierte Flächen). Das heißt, die Entwicklung bis in die ferne Zukunft ist unklarer. Die abnehmende Tendenz ab 2050 ist in allen Seehöhen erkennbar.

In RCP8.5 führt die technische Beschneigung im Mittel zu einem früheren Beginn der Skisaison. Auch kann das Ende nach hinten verschoben werden (siehe Abbildung 30). Die Tendenz hin zu einem späteren Saisonstart und früheren Saisonende bleibt jedoch erhalten. Auch zeigt sich, dass der Zeitpunkt des Endes der Skisaison eine stärkere Änderung aufweist, als der Zeitpunkt des Beginns. Der Vergleich mit RCP2.6 verdeutlicht, dass bei konsequenter Umsetzung klimapolitischer Maßnahmen und einer damit verbundenen langfristigen Reduktion von Treibhausgasemissionen, sich Beginn und Ende der Skisaison bis in die ferne Zukunft kaum verändern werden.

3 Sessellift Bergstation (1380 m)

RCP8.5: Dauer der Skisaison, $HS \geq 30$ cm: Naturschnee plus technischer Schnee

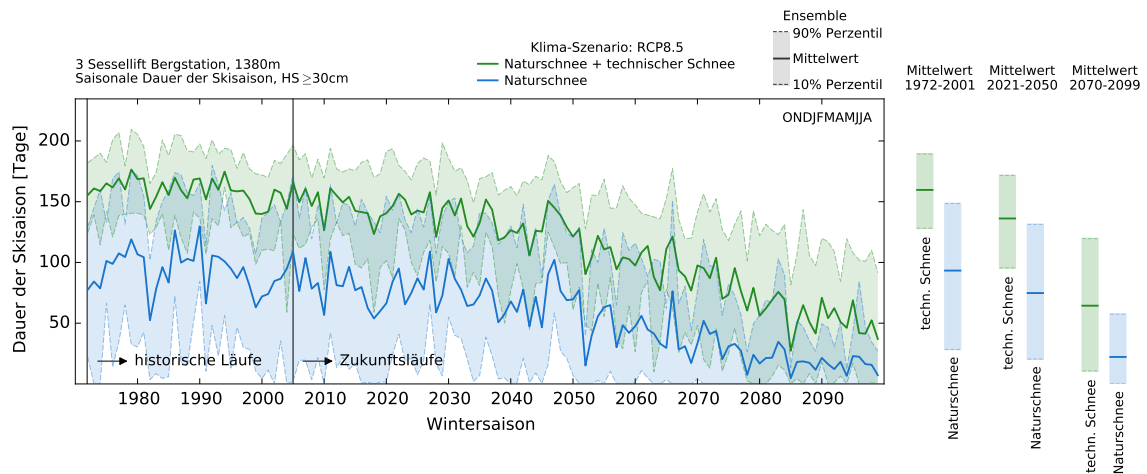


Abbildung 29: Klima-Szenario RCP8.5, Punkt 3 Sessellift Bergstation (1380 m): Dauer der Skisaison (durchgehend geschlossene Schneedecke mit einer Schneehöhe von mindestens 30 cm zwischen 1. Oktober und 31. August), basierend auf Naturschnee (blau) und Naturschnee plus technischem Schnee (grün). Die dicken Linien stellen den RCP8.5 Ensemble-Mittelwert dar. Schattierte Flächen umfassen das 10- und 90% Perzentil des Modell-Ensembles (Bandbreite, Unsicherheit). Historische Läufe bis 2005, ab 2006 beginnen die Zukunftsläufe. 30-Jährige Mittelwerte, bezüglich der Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099, sind rechts abgebildet.

Beginn und Ende der Skisaison

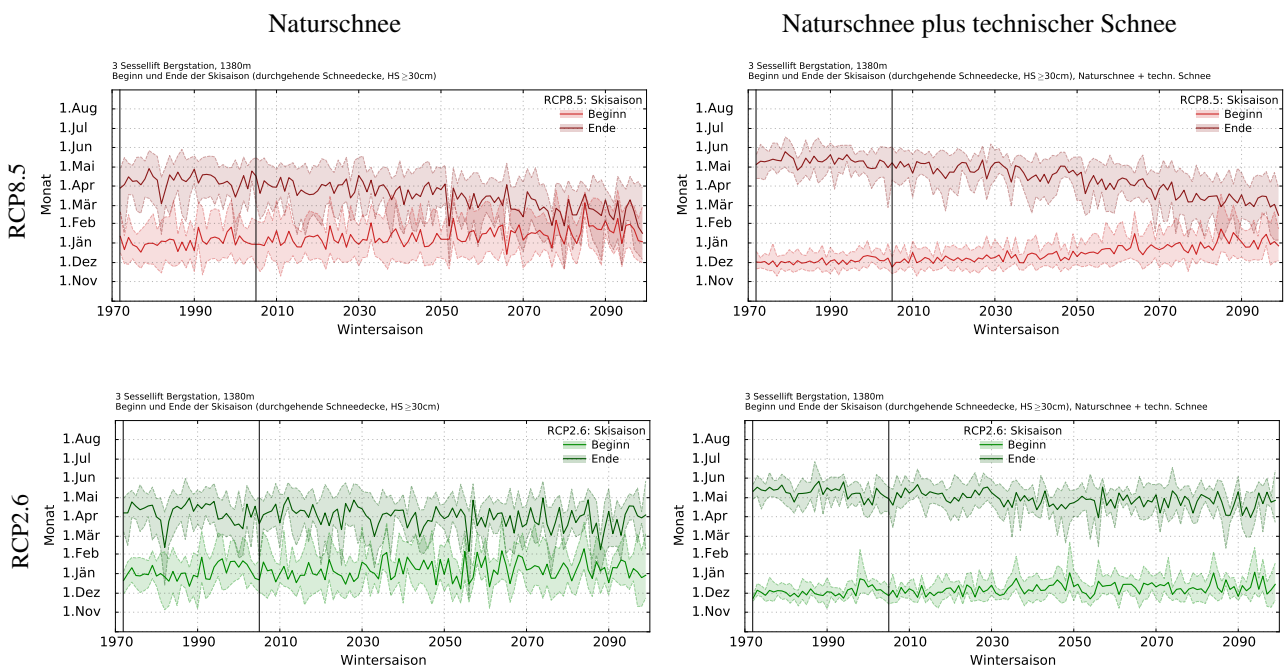


Abbildung 30: Klima-Szenarien RCP8.5 und RCP2.6, Punkt 3 Sessellift Bergstation (1380 m): Beginn und Ende der Skisaison ($HS \geq 30$ cm), basierend auf Naturschnee (links) und Naturschnee plus technischem Schnee (rechts) in RCP8.5 (oben) und RCP2.6 (unten). Die dicken Linien stellen den Ensemble-Mittelwert dar. Schattierte Flächen umfassen das 10- und 90% Perzentil des Modell-Ensembles (Bandbreite, Unsicherheit). Historische Läufe bis 2005, ab 2006 beginnen die Zukunftsläufe. Beginn und Ende werden innerhalb der Periode 1. Oktober bis 31. August ausgewertet.

9.2.4 Monatliche Änderungen in der Zukunft: Vergleich der Zeitperioden 1972 bis 2001 und 2021 bis 2050

Um Aussagen über das zukünftige Klimaänderungssignal treffen zu können, werden die mittleren Werte der Zeiträume 1972 bis 2001 und 2021 bis 2050 der meteorologischen Parameter sowie der mittels SNOWGRID-CL modellierten Schneeindikatoren miteinander verglichen (siehe Kapitel 5.1.3).

In den Abbildungen 31 bis 33 sind die mittleren monatlichen Änderungen der Niederschlagssumme, Temperatur, Gesamtschneehöhe und der Schneedeckendauer (beides Naturschnee) an den drei Punkten im Skigebiet dargestellt. Darüber hinaus ist auch die Änderung der Anzahl der möglichen Beschneistunden als Funktion der Feuchtkugeltemperatur Tf abgebildet. Der Schwellwert für Tf beträgt -4°C . Die Änderung der Schneeindikatoren bezieht sich auf die Monate November bis April, die der Beschneistunden auf die Perioden 15. Nov bis 15. Dez, 15. Nov bis 24. Dez, 15. Nov bis 6. Jän und 15. Nov bis 31. Jän. Die Emissionsszenarien RCP8.5, RCP4.5 und RCP2.6 zeigen im Allgemeinen ähnliche Verläufe mit unterschiedlichen Durchschnittswerten der monatlichen Änderungen.

Bis in die nahe Zukunft wird die Niederschlagssumme tendenziell in den Wintermonaten zunehmen, unabhängig von Klima-Szenario. Die Bandbreite der Änderungen in den Wintermonaten ist meist im positiven Bereich, sodass die Mehrheit der Modelle innerhalb der Klima-Szenario Ensembles auf eine Zunahme der Niederschlagssumme hindeuten. In den anderen Monaten ist die Änderung deutlich unklarer. Die Bandbreite der Klima-Szenarien umfasst sowohl negative als auch positive Werte (schattierte Flächen). Dies bedeutet, dass gewisse Klimamodelle eine Abnahme projizieren und andere eine Zunahme. Innerhalb dieser Bandbreite können die zukünftigen Änderungen auftreten. Die Klima-Szenarien zeigen weiters eine Temperaturzunahme in allen Monaten, wobei die Änderungen in RCP8.5 erwartungsgemäß am stärksten sind. Darüber hinaus sind alle Höhenlagen von der Temperaturzunahme betroffen. RCP8.5 projiziert z.B. eine mittlere Zunahme von 1 bis $1,5^{\circ}\text{C}$ in den Monaten November bis April. Im Vergleich dazu fallen die Änderungen in RCP2.6 deutlich geringer aus (ca. 1°C).

Alle drei Klima-Szenarien weisen auf eine Abnahme der monatlichen Gesamtschneehöhe hin. In RCP4.5 und RCP8.5 fallen die Änderungen sehr ähnlich aus. In RCP2.6 sind die negativen mittleren Änderungen deutlich gedämpfter und näher bei Null. Die Bandbreite (schattierte Flächen) umfassen positive als auch negative Änderungen. Darüber hinaus sei darauf hingewiesen, dass die Spannbreite und somit auch die Unsicherheit in den Ergebnissen sehr groß ist.

In Hinblick auf die monatliche Schneedeckendauer zeigen alle drei Klima-Szenarien in Richtung einer Abnahme. Die monatlichen Abnahmen zwischen November und April betragen im Mittel zwischen 2 und 5 Tagen.

Die Anzahl der möglichen Beschneisstunden in den Teilperioden wird im Skigebiet in allen Höhenlagen abnehmen, unabhängig von Klima-Szenario (siehe Abbildungen 31 bis 33, unterste Reihe rechts). Dies lässt den Schluss zu, dass die Zeitfenster für die Beschneigung im Mittel kürzer werden. Folglich wird es zu einer gewissen Verschlechterung der Rahmenbedingungen für die Beschneigung kommen. RCP8.5 projiziert für das Zeitfenster 15. November bis 31. Jänner eine mittlere Abnahme von 200 Stunden.

Die Temperaturzunahme bis in die nahe Zukunft 2050 wird etwas ungünstige Auswirkungen auf die mittlere Gesamtschneehöhe, Schneedeckendauer und Beschneigung mit sich bringen. Es zeigt sich, dass die Bandbreite der modellierten Änderungen (schattierte Flächen in den Abbildungen) teilweise sehr hoch ist. Dies deutet darauf hin, dass die Richtung der Änderungen nicht immer klar ist.

Mittlere monatliche Änderungen: 2021 bis 2050 vs. 1972 bis 2001

1 Sessellift Talstation (1080 m)

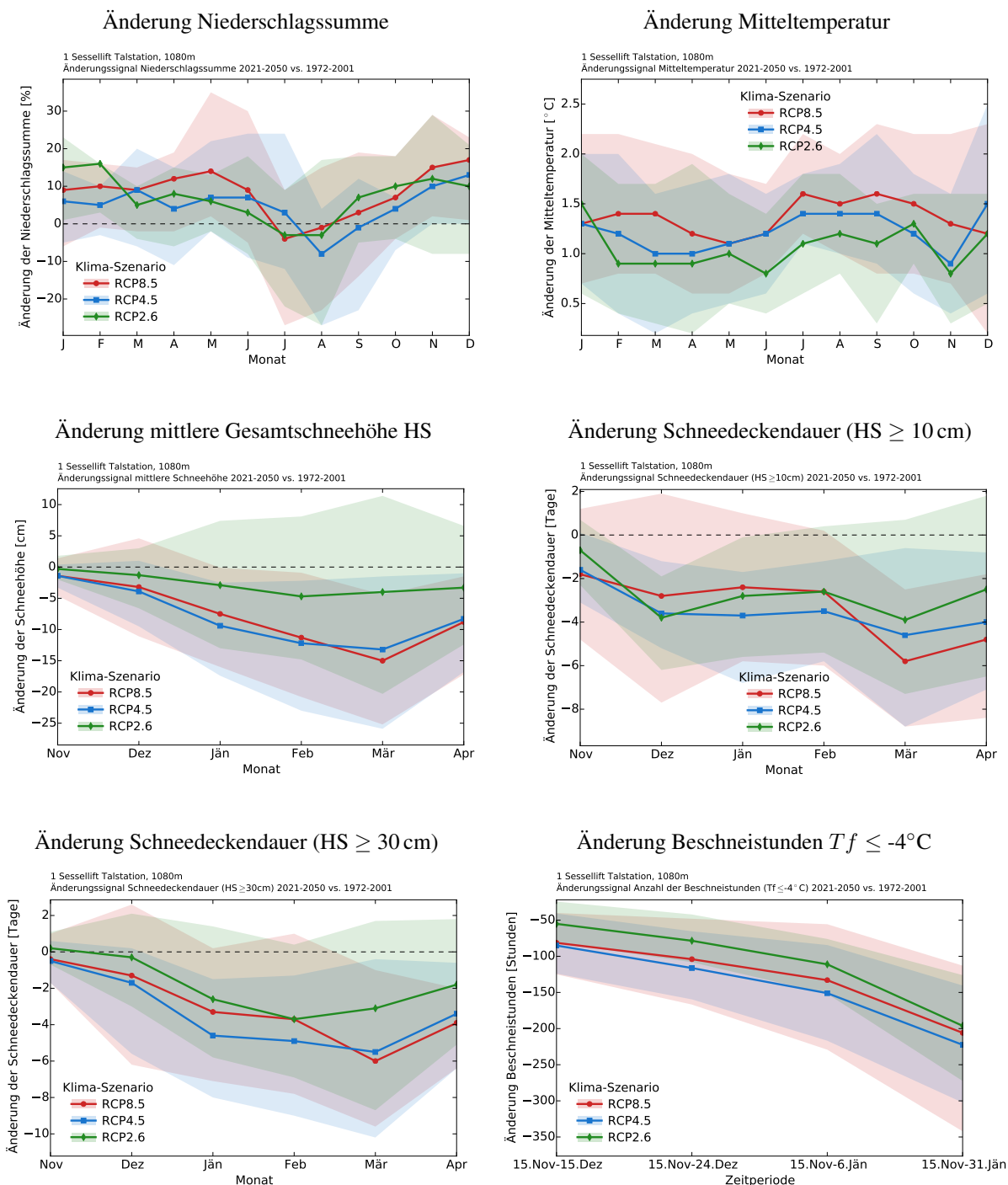


Abbildung 31: Mittlere monatliche Änderung der Niederschlagssumme, Temperatur sowie der Schneeindikatoren (Gesamtschneehöhe HS, Schneedeckendauer $HS \geq 10(30)$ cm, beides Naturschnee) und der Anzahl der Beschneistunden ($Tf \leq -4^\circ\text{C}$), betreffend der Perioden 2021 bis 2050 und 1972 bis 2001, am Punkt 1 Sessellift Talstation (1080 m). Die dicken Linien stellen den Ensemble-Mittelwert dar. Schattierte Flächen umfassen das 10- und 90% Perzentil des Modell-Ensembles. Rot: Klima-Szenario RCP8.5, Blau: RCP4.5, Grün: RCP2.6. Die Änderung der Schneeindikatoren ist für die Monate November bis April dargestellt. Die Änderung der Beschneistunden bezieht sich auf die Perioden 15. Nov bis 15. Dez, 15. Nov bis 24. Dez, 15. Nov bis 6. Jän und 15. Nov bis 31. Jän.

Mittlere monatliche Änderungen: 2021 bis 2050 vs. 1972 bis 2001

2 Piste FIS (1230 m)

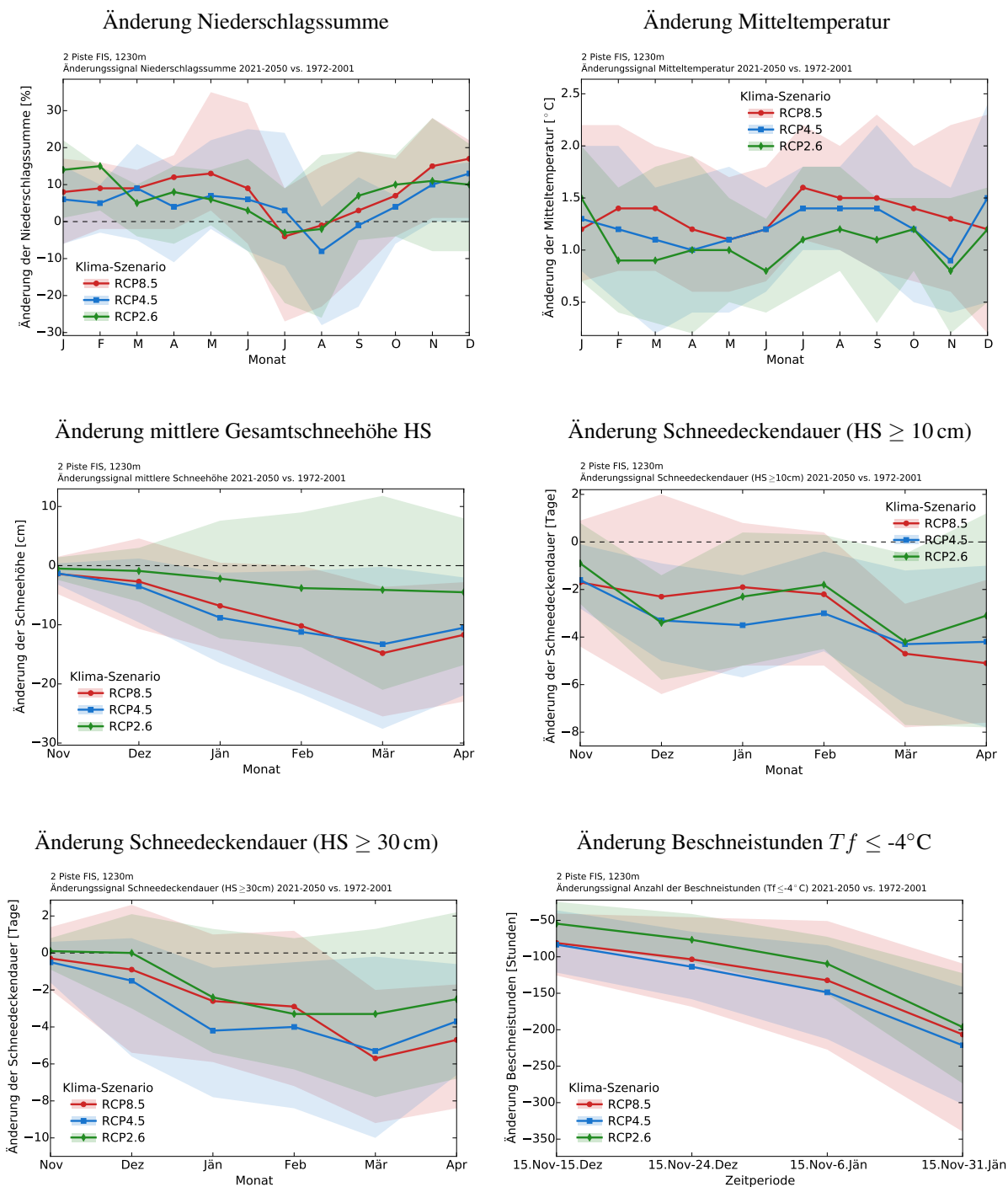


Abbildung 32: Mittlere monatliche Änderung der Niederschlagssumme, Temperatur sowie der Schneeindikatoren (Gesamtschneehöhe HS, Schneedeckendauer $HS \geq 10(30)$ cm, beides Naturschnee) und der Anzahl der Beschneistunden ($Tf \leq -4^\circ\text{C}$), betreffend der Perioden 2021 bis 2050 und 1972 bis 2001, am Punkt 2 Piste FIS (1230 m). Die dicken Linien stellen den Ensemble-Mittelwert dar. Schattierte Flächen umfassen das 10- und 90% Perzentil des Modell-Ensembles. Rot: Klima-Szenario RCP8.5, Blau: RCP4.5, Grün: RCP2.6. Die Änderung der Schneeindikatoren ist für die Monate November bis April dargestellt. Die Änderung der Beschneistunden bezieht sich auf die Perioden 15. Nov bis 15. Dez, 15. Nov bis 24. Dez, 15. Nov bis 6. Jän und 15. Nov bis 31. Jän.

Mittlere monatliche Änderungen: 2021 bis 2050 vs. 1972 bis 2001

3 Sessellift Bergstation (1380 m)

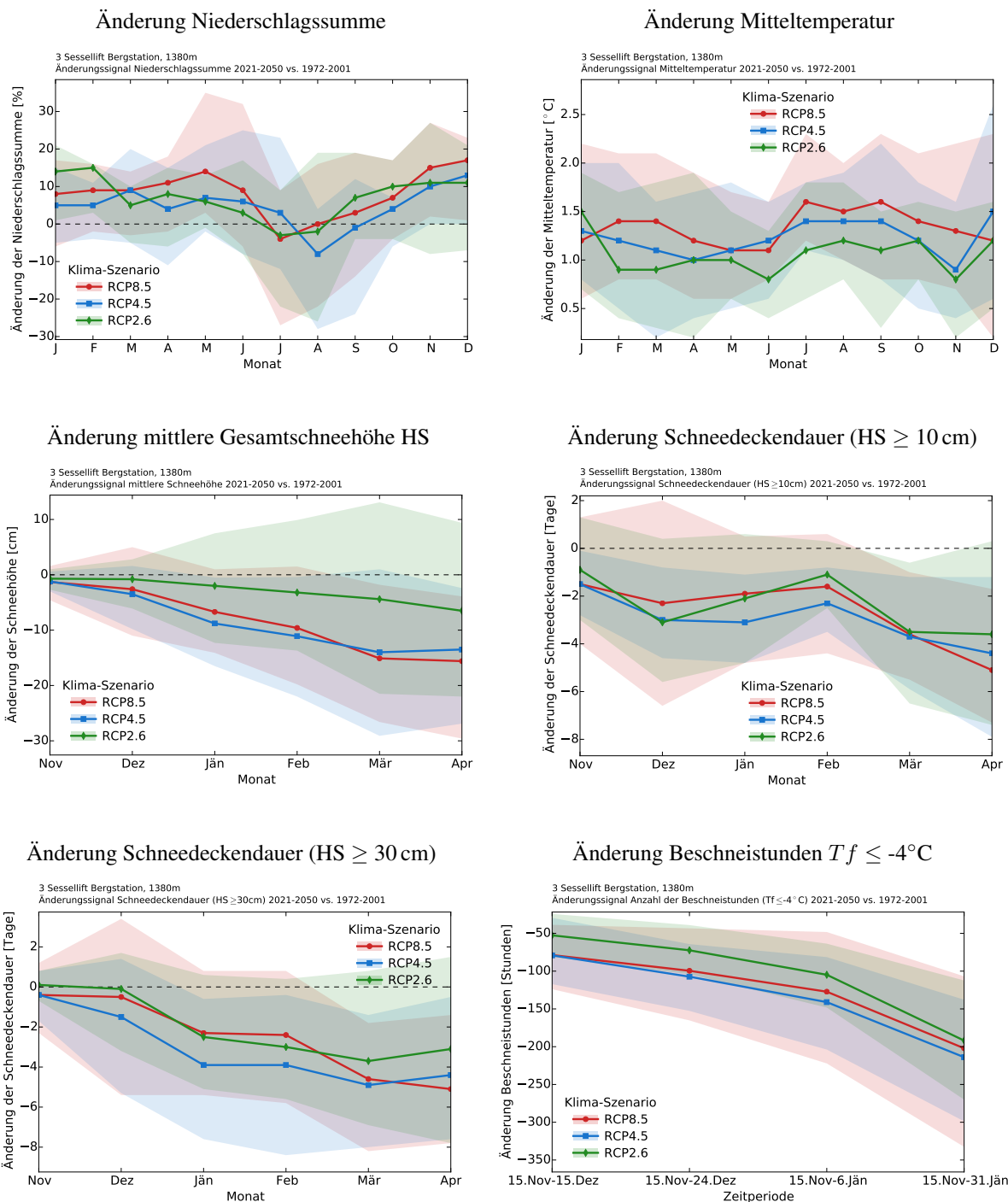


Abbildung 33: Mittlere monatliche Änderung der Niederschlagssumme, Temperatur sowie der Schneeindikatoren (Gesamtschneehöhe HS, Schneedeckendauer $HS \geq 10(30)$ cm, beides Naturschnee) und der Anzahl der Beschneistunden ($Tf \leq -4^\circ\text{C}$), betreffend der Perioden 2021 bis 2050 und 1972 bis 2001, am Punkt 3 Sessellift Bergstation (1380 m). Die dicken Linien stellen den Ensemble-Mittelwert dar. Schattierte Flächen umfassen das 10- und 90% Perzentil des Modell-Ensembles. Rot: Klima-Szenario RCP8.5, Blau: RCP4.5, Grün: RCP2.6. Die Änderung der Schneeindikatoren ist für die Monate November bis April dargestellt. Die Änderung der Beschneistunden bezieht sich auf die Perioden 15. Nov bis 15. Dez, 15. Nov bis 24. Dez, 15. Nov bis 6. Jän und 15. Nov bis 31. Jän.

9.2.5 Monatliche Änderungen in der Zukunft: Vergleich der Zeitperioden 1972 bis 2001 und 2070 bis 2099

Um Aussagen über das zukünftige Klimaänderungssignal treffen zu können, werden die mittleren Werte der Zeiträume 1972 bis 2001 und 2070 bis 2099 der meteorologischen Parameter sowie der mittels SNOWGRID-CL modellierten Schneeindikatoren miteinander verglichen (siehe Kapitel 5.1.3).

In den Abbildungen 34 bis 36 sind die mittleren monatlichen Änderungen der Niederschlagssumme, Temperatur, Gesamtschneehöhe und der Schneedeckendauer (beides Naturschnee) an den drei Punkten im Skigebiet dargestellt. Darüber hinaus ist auch die Änderung der Anzahl der möglichen Beschneistunden als Funktion der Feuchtkugeltemperatur Tf abgebildet. Der Schwellwert für Tf beträgt -4°C . Die Änderung der Schneeindikatoren bezieht sich auf die Monate November bis April, die der Beschneistunden auf die Perioden 15. Nov bis 15. Dez, 15. Nov bis 24. Dez, 15. Nov bis 6. Jän und 15. Nov bis 31. Jän. Die Emissionsszenarien RCP8.5, RCP4.5 und RCP2.6 zeigen im Allgemeinen ähnliche Verläufe mit unterschiedlichen Durchschnittswerten der monatlichen Änderungen.

Bis in die ferne Zukunft wird die Niederschlagssumme tendenziell in den Wintermonaten zunehmen, unabhängig von Klima-Szenario. RCP8.5 projiziert die stärksten Zunahmen (z.B. mittlere Zunahme von über 20% im Dezember und Jänner). Die Bandbreite der Änderungen in den Wintermonaten ist meist im positiven Bereich, sodass die Mehrheit der Modelle innerhalb der Klima-Szenario Ensembles auf eine Zunahme der Niederschlagssumme hindeuten. In den anderen Monaten ist die Änderung deutlich unklarer. Die Bandbreite der Klima-Szenarien umfasst sowohl negative als auch positive Werte (schattierte Flächen). Dies bedeutet, dass gewisse Klimamodelle eine Abnahme projizieren und andere eine Zunahme. Innerhalb dieser Bandbreite können die zukünftigen Änderungen auftreten. Die Klima-Szenarien zeigen weiters eine Temperaturzunahme in allen Monaten, wobei die Änderungen in RCP8.5 erwartungsgemäß am stärksten sind. Darüber hinaus sind alle Höhenlagen von der Temperaturzunahme betroffen. RCP8.5 projiziert z.B. eine mittlere Zunahme von 4°C in den Monaten Dezember bis März. Im Vergleich dazu fallen die Änderungen in RCP2.6 deutlich geringer aus (ca. 1°C).

Alle drei Klima-Szenarien weisen auf eine Abnahme der monatlichen Gesamtschneehöhe hin. In RCP4.5 und RCP2.6 fallen diese negativen Änderungen deutlich gedämpfter aus als in RCP8.5. In den höheren Lagen zeigen die monatlichen Änderungen zwischen November und April einen durchwegs anderen Verlauf. In RCP8.5 nimmt die Stärke der mittleren Änderungen von November bis März zu, im April wieder ab. Dies ist damit zu erklären, dass im April grundsätzlich die Schneehöhe geringer ist. Es sei darauf hingewiesen, dass die Spannweite und somit auch die Unsicherheit in den Ergebnissen sehr groß ist (schattierte Flächen).

In Hinblick auf die monatliche Schneedeckendauer zeigen alle drei Klima-Szenarien in Richtung einer Abnahme, wobei die Änderungen im November und Dezember am geringsten sind. Dies ist damit zu erklären, dass in diesen Seehöhen und Monaten die Schneedeckendauer grundsätzlich geringer ist. In RCP8.5 betragen die monatlichen Abnahmen im Jänner, Februar und März im Mittel zwischen 15 und 20 Tage. Der Grund dafür ist die mit RCP8.5 einhergehende markante Temperaturerhöhung. Grundsätzlich ist der Schneedeckenzuwachs im November und Dezember temperaturbedingt geringer, sodass in der Vorwintersaison Änderungen weniger stark ausgeprägt sind.

Die Anzahl der möglichen Beschneistunden in den Teilperioden wird im Skigebiet in allen Höhenlagen abnehmen, unabhängig von Klima-Szenario (siehe Abbildungen 34 bis 36, unterste Reihe rechts). Dies lässt den Schluss zu, dass die Zeitfenster für die Beschneigung im Mittel kürzer werden. Folglich wird es zu einer drastischen Verschlechterung der Rahmenbedingungen für die Beschneigung kommen. RCP8.5 projiziert für das Zeitfenster 15. November bis 31. Jänner eine mittlere Abnahme von 600 Stunden.

Die Temperaturzunahme wird ungünstige Auswirkungen auf die mittlere Gesamtschneehöhe, Schneedeckendauer und Beschneigung mit sich bringen. Es zeigt sich, dass die Bandbreite der modellierten Änderungen (schattierte Flächen

in den Abbildungen) teilweise sehr hoch ist. Dies deutet darauf hin, dass die Richtung der Änderungen nicht immer klar ist. Die Ergebnisse unterstreichen weiters die Wichtigkeit, klimapolitische Maßnahmen umzusetzen.

Mittlere monatliche Änderungen: 2070 bis 2099 vs. 1972 bis 2001

1 Sessellift Talstation (1080 m)

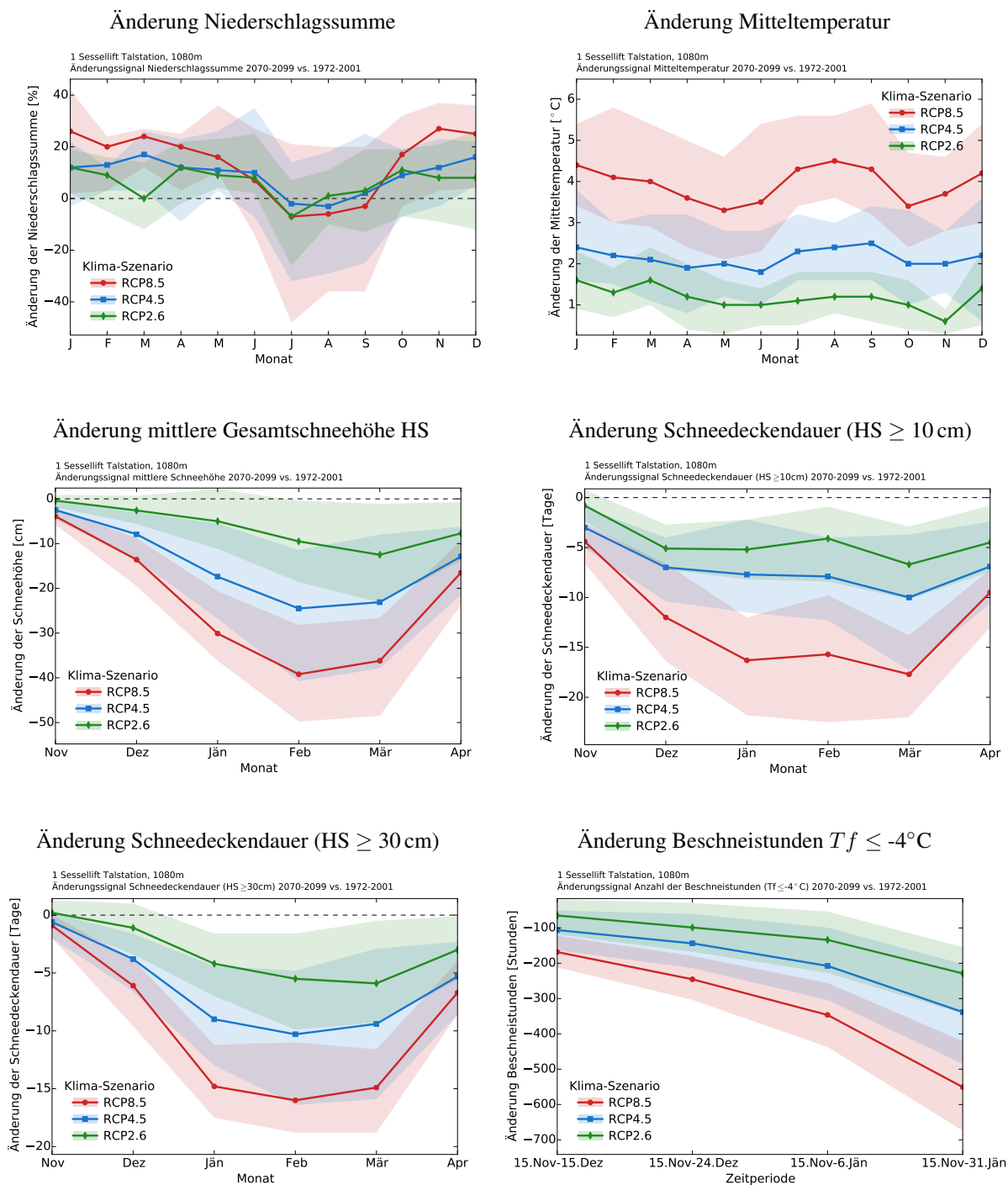


Abbildung 34: Mittlere monatliche Änderung der Niederschlagssumme, Temperatur sowie der Schneeindikatoren (Gesamtschneehöhe HS, Schneedeckendauer $HS \geq 10(30)$ cm, beides Naturschnee) und der Anzahl der Beschneistunden ($Tf \leq -4^\circ\text{C}$), betreffend der Perioden 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001, am Punkt 1 Sessellift Talstation (1080 m). Die dicken Linien stellen den Ensemble-Mittelwert dar. Schattierte Flächen umfassen das 10- und 90% Perzentil des Modell-Ensembles. Rot: Klima-Szenario RCP8.5, Blau: RCP4.5, Grün: RCP2.6. Die Änderung der Schneeindikatoren ist für die Monate November bis April dargestellt. Die Änderung der Beschneistunden bezieht sich auf die Perioden 15. Nov bis 15. Dez, 15. Nov bis 24. Dez, 15. Nov bis 6. Jän und 15. Nov bis 31. Jän.

Mittlere monatliche Änderungen: 2070 bis 2099 vs. 1972 bis 2001

2 Piste FIS (1230 m)

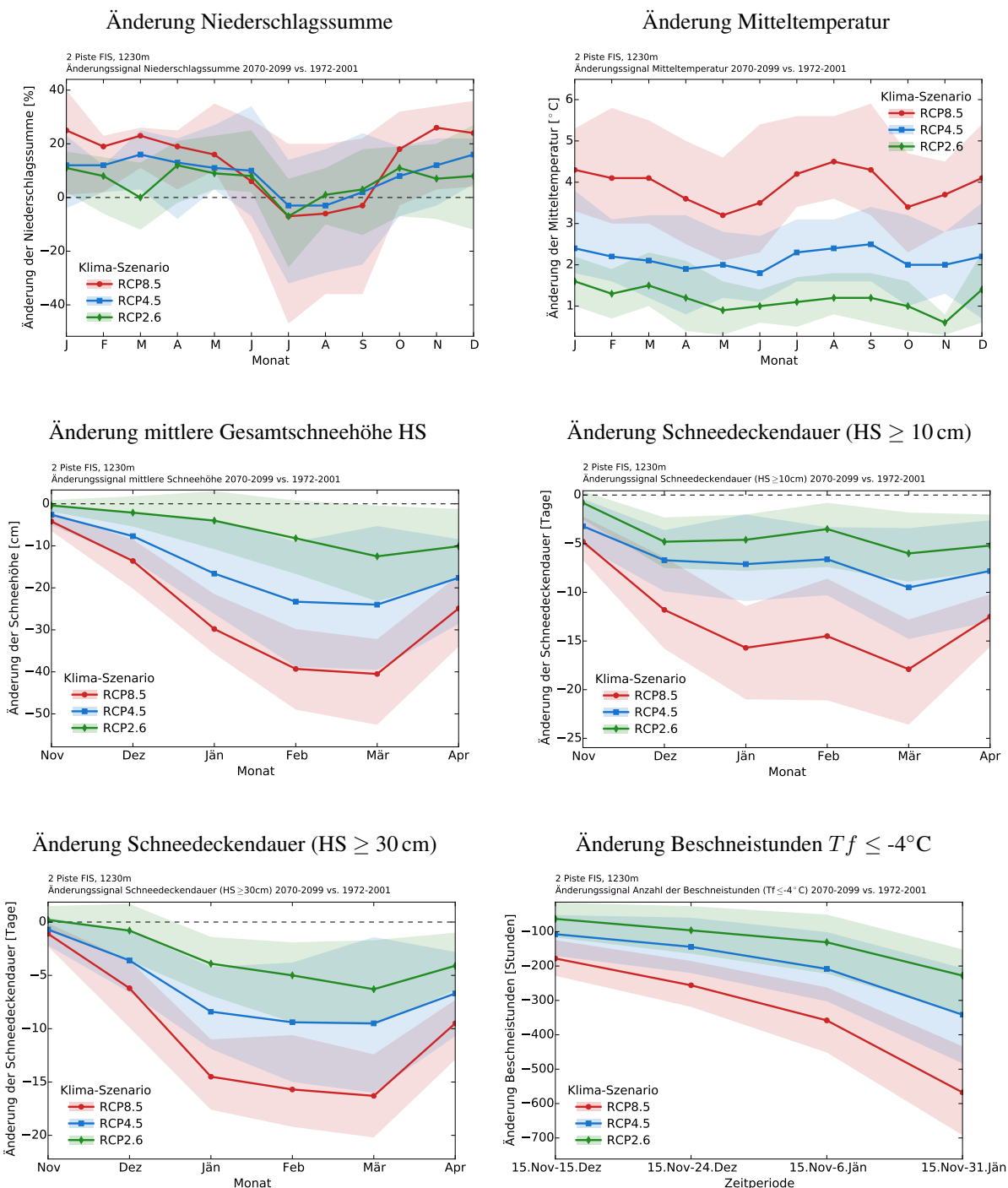


Abbildung 35: Mittlere monatliche Änderung der Niederschlagssumme, Temperatur sowie der Schneeindikatoren (Gesamtschneehöhe HS, Schneedeckendauer $HS \geq 10(30)$ cm, beides Naturschnee) und der Anzahl der Beschneistunden ($Tf \leq -4^{\circ}C$), betreffend der Perioden 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001, am Punkt 2 Piste FIS (1230 m). Die dicken Linien stellen den Ensemble-Mittelwert dar. Schattierte Flächen umfassen das 10- und 90% Perzentil des Modell-Ensembles. Rot: Klima-Szenario RCP8.5, Blau: RCP4.5, Grün: RCP2.6. Die Änderung der Schneeindikatoren ist für die Monate November bis April dargestellt. Die Änderung der Beschneistunden bezieht sich auf die Perioden 15. Nov bis 15. Dez, 15. Nov bis 24. Dez, 15. Nov bis 6. Jän und 15. Nov bis 31. Jän.

Mittlere monatliche Änderungen: 2070 bis 2099 vs. 1972 bis 2001

3 Sessellift Bergstation (1380 m)

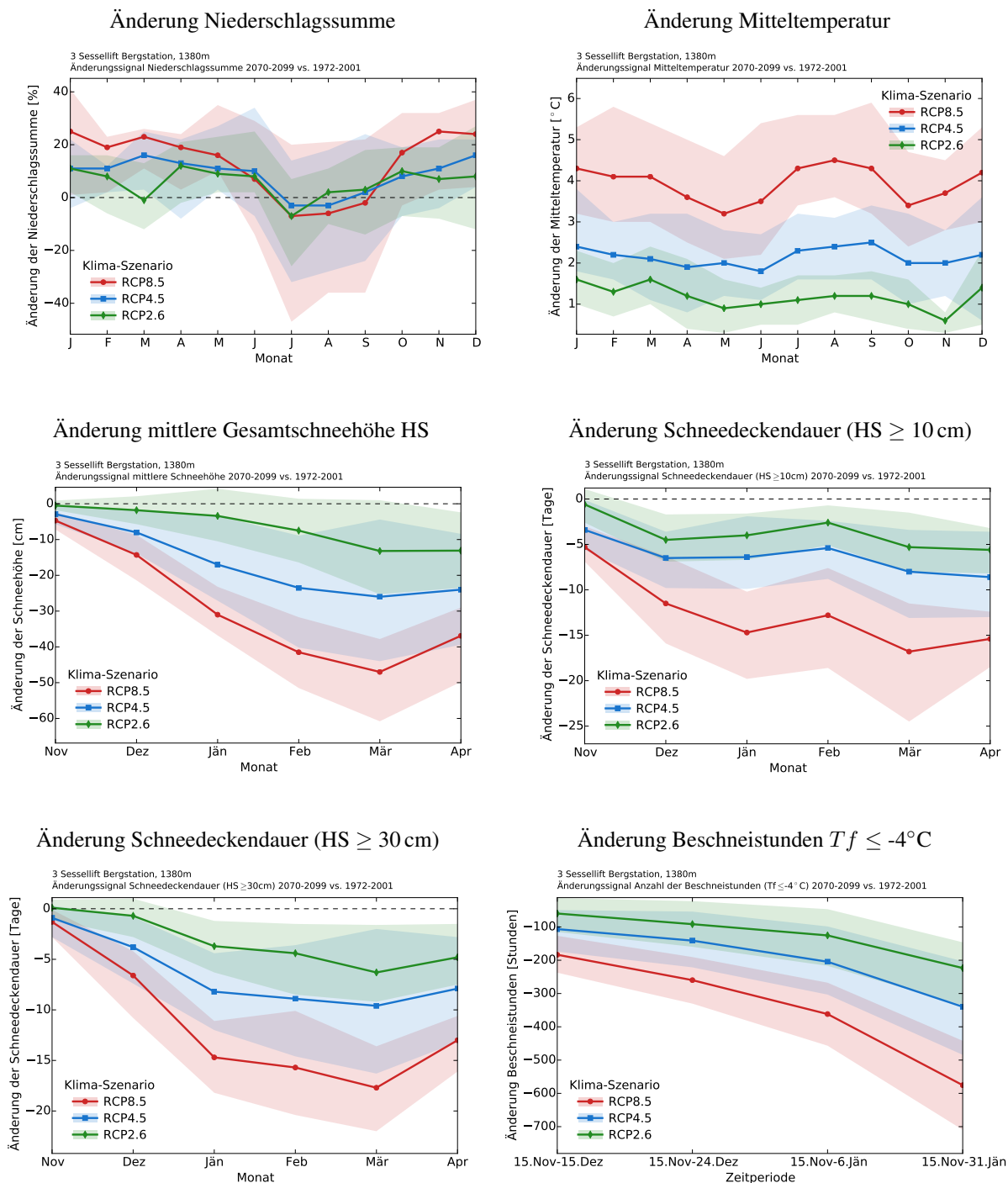


Abbildung 36: Mittlere monatliche Änderung der Niederschlagssumme, Temperatur sowie der Schneeindikatoren (Gesamtschneehöhe HS, Schneedeckendauer $HS \geq 10(30)$ cm, beides Naturschnee) und der Anzahl der Beschneistunden ($Tf \leq -4^\circ\text{C}$), betreffend der Perioden 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001, am Punkt 3 Sessellift Bergstation (1380 m). Die dicken Linien stellen den Ensemble-Mittelwert dar. Schattierte Flächen umfassen das 10- und 90% Perzentil des Modell-Ensembles. Rot: Klima-Szenario RCP8.5, Blau: RCP4.5, Grün: RCP2.6. Die Änderung der Schneeindikatoren ist für die Monate November bis April dargestellt. Die Änderung der Beschneistunden bezieht sich auf die Perioden 15. Nov bis 15. Dez, 15. Nov bis 24. Dez, 15. Nov bis 6. Jän und 15. Nov bis 31. Jän.

9.2.6 Zeitlicher Verlauf der Schneeproduktionsstunden bis in die ferne Zukunft

Die Schneeproduktionsstunden sind jene Stunden, an denen die Schneeerzeuger in der SNOWGRID-CL Schneedeckenmodellierung technischen Schnee produzieren. Aufgrund der Annahmen in der Modellierung der technischen Schneeproduktion können diese Werte natürlich stark von der Realität abweichen (siehe Kapitel 6). Die Ergebnisse besitzen einen hypothetischen Charakter. Dennoch geben die folgenden Auswertungen Einblick, inwieweit sich die Schneeproduktionsstunden unter geänderten klimatologischen Rahmenbedingungen ändern können (z.B. Verschiebung der Zeitpunkte für die Beschneigung).

Abbildung 37 zeigt die Anzahl der Tage mit Schneeproduktion sowie die Anzahl der Schneeproduktionsstunden für die Punkte Sessellift Talstation (1080 m) und Bergstation (1380 m). Die Zeitfenster sind 15. November bis 30. November, Dezember und Jänner. Die Ergebnisse basieren auf dem worst-case Klima-Szenario RCP8.5. Auf der linken Ordinatenachse sind die Produktionsstunden angegeben (grün), auf der rechten die Tage, an denen die Schneeerzeuger technischen Schnee produzieren (grau).

Am tiefstgelegenen Punkt im Skigebiet nehmen im November die täglichen Produktionsstunden sowie die Produktionstage tendenziell ab (Abbildung 37, oben). Ab 2050 geht die Schneeproduktion gegen Null. Im Dezember ist ab 2050 eine deutliche Verschiebung hin zu einer geringeren Produktion ersichtlich. Im Vergleich dazu nehmen die Produktionsstunden und Tage mit Schneeproduktion im Jänner zu. Die Abnahme der Produktionsstunden im November und Dezember ist damit zu erklären, dass die Zeitfenster für die Beschneigung kürzer werden. Infolge der zu erwartenden Temperaturerhöhung wird der Schwellwert der Feuchtkugeltemperatur weniger oft erreicht. Im Jänner nimmt die Beschneigung zu, um die erforderliche Mindestschneehöhe halten zu können. Darüber hinaus ist im Jänner ein leichtes Auseinanderdriften der Schneeproduktionsstunden und Tage mit Schneeproduktion erkennbar. Eine Erklärung könnte sein, dass die täglichen Zeitfenster für die Beschneigung kürzer werden und folglich die Schneeproduktion zusätzliche Tage in Anspruch annehmen wird. Dies ist jedoch unklar (große Spannbreite der Ergebnisse).

Die Schneeproduktion nimmt am höher gelegenen Punkt Bergstation (1380 m) einen vergleichbaren Verlauf an (Abbildung 37, unten).

Die mittleren monatlichen Schneeproduktionsstunden in den drei klimatologischen Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099 sind in Abbildung 38 für RCP8.5 und RCP2.6 gegenübergestellt. In der vergangenen Periode 1972 bis 2001 nehmen die Produktionsstunden im November mit zunehmender Seehöhe zu, im Dezember ab. Wird die zukünftige Periode 2070 bis 2099 betrachtet, so gehen die Produktionsstunden in RCP8.5 am tiefstgelegenen Punkt fast gegen Null (vgl. Abbildung 37). Die Temperaturzunahme verhindert die Beschneigung. Im Dezember ist eine im Mittel deutliche Abnahme erkennbar, im Vergleich zu den Perioden in der Vergangenheit und in der nahen Zukunft 2021 bis 2050. Dies deutet darauf hin, dass die Bedingungen zur Beschneigung auch im Dezember ungünstiger werden. Der Schwellwert der Feuchtkugeltemperatur wird weniger oft erreicht. Im Jänner nehmen die Produktionsstunden im Mittel zu. In diesen Monaten können zusätzliche Zeitfenster für die Beschneigung genützt werden. Die Zeitpunkte der Schneeproduktion werden nach hinten verschoben.

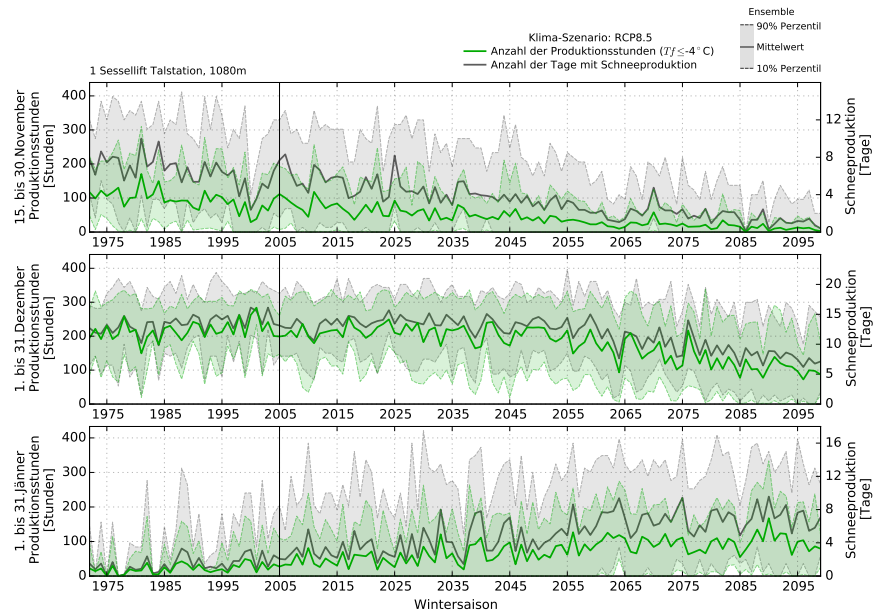
RCP2.6 projiziert für die klimatologischen Perioden 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099 nur geringe Änderungen.

Die Ergebnisse basierend auf RCP8.5 deuten darauf hin, dass in ferner Zukunft die Anzahl der Schneeproduktionsstunden im November und Dezember stark abnehmen wird. Die Zeitfenster zur Beschneigung werden kürzer. Im Jänner müssen die Schneeerzeuger öfters aktiviert werden. Der Beginn der ersten Beschneigung wird sich im Mittel nach hinten verschieben. Möglicherweise müssen in der Beschneigung die Schwellwerte der Feuchtkugeltemperatur T_f angepasst werden, um die Pistenpräparation zu gewährleisten. Inwieweit dies durchführbar ist, ohne die Schneequalität negativ zu beeinflussen, ist an dieser Stelle nicht beurteilbar.

Die sich ändernden klimatologischen Rahmenbedingungen führen somit im Allgemeinen zu einer Verschiebung der Beschneigungszeiten, welche wiederum von der Stärke der Temperaturerhöhung abhängig ist. Deutlich wird auch, dass die Bandbreite der möglichen Zustände in der Periode 2070 bis 2099 sehr hoch ist.

Anzahl der Schneeproduktionsstunden und Tage mit Schneeproduktion RCP8.5

1 Sessellift Talstation (1080 m)



3 Sessellift Bergstation (1380 m)

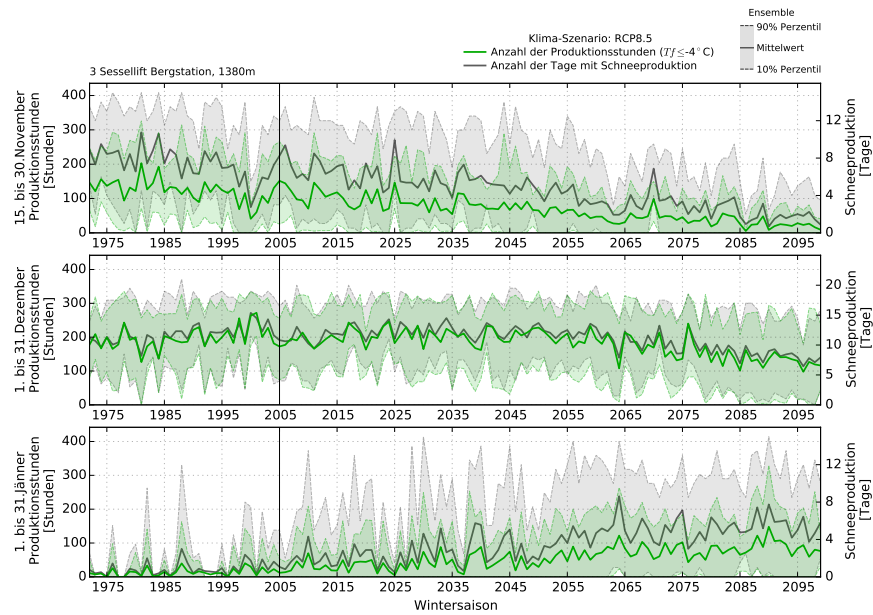
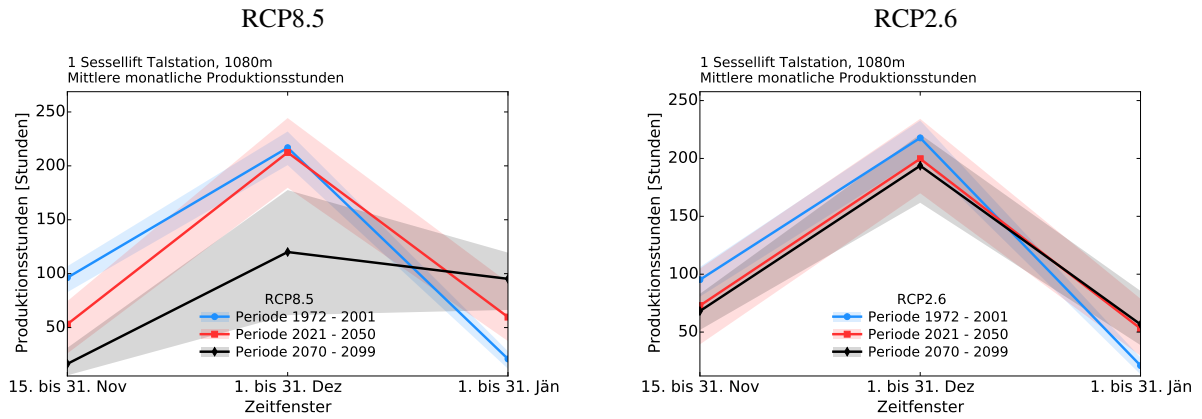


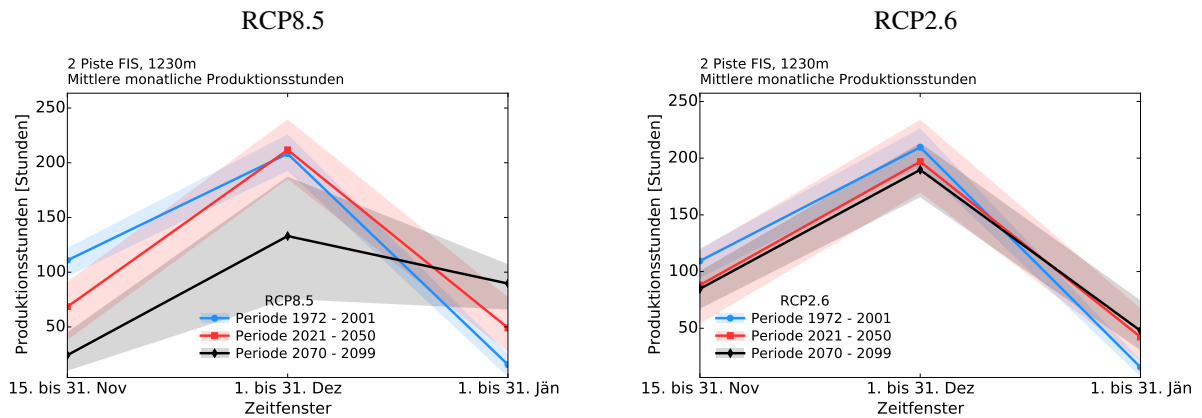
Abbildung 37: Klima-Szenario RCP8.5: Anzahl der Schneeproduktionsstunden (grün) und Tage mit Schneeproduktion (grau) an den Punkten Sessellift Talstation (1080 m) und Bergstation (1380 m) bis in die ferne Zukunft 2099 für unterschiedliche Teilperioden in der Wintersaison. Die dicken Linien stellen den Ensemble-Mittelwert dar. Schattierte Flächen umfassen das 10- und 90% Perzentil des Modell-Ensembles.

Mittlere monatliche Schneeproduktionsstunden RCP8.5 vs. RCP2.6 Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099

1 Sessellift Talstation (1080 m)



2 Piste FIS (1230 m)



3 Sessellift Bergstation (1380 m)

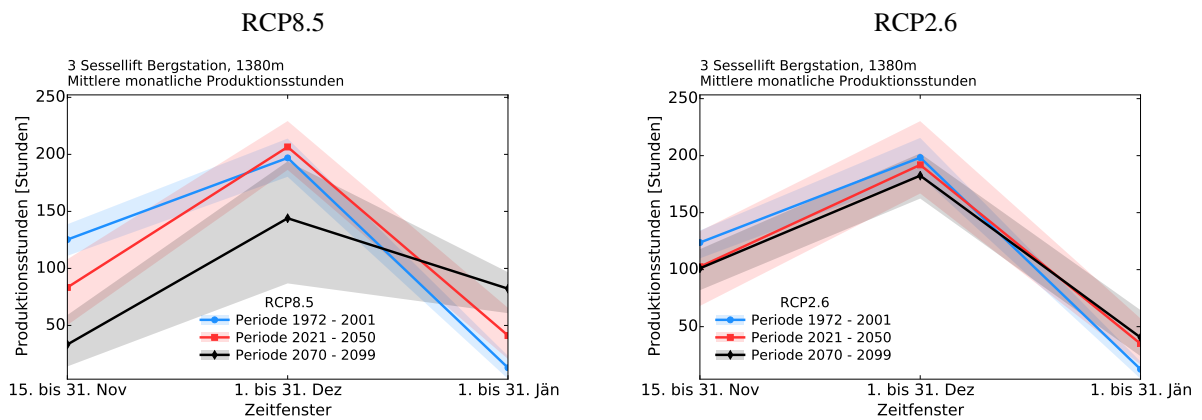


Abbildung 38: RCP8.5 vs. RCP2.6: Mittlere monatliche Schneeproduktionsstunden in den drei Perioden 1972 bis 2001 (blau), 2021 bis 2050 (rot) und 2070 bis 2099 (schwarz) für die Punkte im Skigebiet. Schattierte Flächen umfassen das 10- und 90% Perzentil des Modell-Ensembles.

9.2.7 Zukünftiges Klimaänderungssignal: Signifikanzprüfung

Das Klimaänderungssignal (siehe Kapitel 5.1.3) soll auf Signifikanz getestet werden. Ziel hierbei ist, die Aussagekraft der Ergebnisse zu beurteilen. Stimmen viele der Ensemble-Mitglieder (RCMs) in ihrer Aussagekraft überein, so wird dem Ensemble ein größeres Vertrauen zugeordnet. Sind die Änderungen der einzelnen Ensemble-Mitglieder zwar statistisch signifikant, jedoch mit unterschiedlichem Vorzeichen, so besitzt das Ensemble eine hohe Unsicherheit.

In einem ersten Schritt werden für die einzelnen Ensemble-Mitglieder die saisonalen Werte für die Referenzperioden 2021 bis 2050, 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001 verglichen und mittels des rangbasierten, parameterfreien Mann-Whitney-U Tests geprüft (siehe auch Kapitel 9.1.8), ob sich die zentralen Tendenzen des Ensembles in der Zukunft signifikant (betreffend eines 95% Konfidenzniveaus) von denen in der Vergangenheit unterscheiden. Weisen weniger als 50% der Ensemble-Mitglieder eine signifikante Änderung auf, so ist das zukünftige Klimaänderungssignal des Ensembles statistisch nicht signifikant. Im Gegensatz dazu, sind mehr als 50% der Änderungen signifikant, so werden anschließend die Richtung (Vorzeichen) und der absolute Modellfehler dieser verbliebenen Modelle überprüft. Der Modellfehler ist hierbei definiert als die Differenz der historischen Läufe der RCMs und der Beobachtungsläufe im Zeitraum 1972 bis 2001. Zeigen weniger als 80% in die gleiche Richtung oder ist der Fehler dieser Klimamodelle in der Vergangenheit größer als die zu erwartende Änderung in der Zukunft, dann ist das Änderungssignal nicht eindeutig. Das Änderungssignal ist zwar nicht durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar, jedoch herrscht eine mangelnde Modellübereinstimmung. Sind mehr als 50% der Änderungen signifikant und zeigen mehr als 80% in die gleiche Richtung und ist wiederum das absolute Änderungssignal (Differenz der zwei Referenzperioden) größer als der absolute Modellfehler, so ist das zukünftige Klimaänderungssignals des Ensembles robust. In diesem Falle ist das zukünftige Klimaänderungssignal nicht durch die natürliche Klimavariabilität erklärbar. Die Ensemble-Mitglieder (RCM-Modelle) zeigen eine signifikante, in der Richtung übereinstimmende Klimaänderung aufgrund der Kombination aus natürlichen und anthropogenen Treibern. Zusammenfassend beinhaltet der Test folgende Schritte:

1. Sind die Ensemble-Mediane der Referenzperioden 2021 bis 2050 (2070 bis 2099) und 1972 bis 2001 signifikant unterschiedlich (Mann-Whitney-U Test)?
2. Überprüfung der Richtung (Vorzeichen) der Änderungen der Ensemble-Mitglieder.
3. Überprüfung, ob Änderungen der Ensemble-Mitglieder größer als der Modellfehler sind.

Tabelle 19 zeigt den für den Signifikanz-Test verwendeten Farbcode.

Tabelle 19: Farbkodierung und Beschreibung des Prüfverfahrens auf Robustheit des Klimaänderungssignals.

Prüfbedingung	Signifikanz-Test (Robustheit)
Weniger als 50% der Ensemble-Mitglieder weisen eine signifikante Änderung auf.	Keine statistische Signifikanz: Das Änderungssignal ist durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar.
Mehr als 50% der Ensemble-Mitglieder weisen eine signifikante Änderung auf. Weniger als 80% von diesen Ensemble-Mitgliedern zeigen in die gleiche Richtung oder das absolute Änderungssignal (Differenz der zwei Referenzperioden) ist kleiner als der absolute Modellfehler (Differenz RCMs und Beobachtung, 1972 bis 2001).	Das Änderungssignal ist nicht eindeutig: Die Modelle zeigen insgesamt eine deutliche Änderung, jedoch ist die Richtung der Klimaänderung einzelner Modelle widersprüchlich, oder der Fehler der Klimamodelle in der Vergangenheit ist größer als die zu erwartende Änderung in der Zukunft.
Mehr als 50% der Ensemble-Mitglieder weisen eine signifikante Änderung auf und mehr als 80% von diesen Ensemble-Mitgliedern zeigen in die gleiche Richtung. Das absolute Änderungssignal (Differenz der zwei Referenzperioden) ist größer als der absolute Modellfehler (Differenz RCMs und Beobachtung, 1972 bis 2001).	Robustes Klimaänderungssignal: Das Änderungssignal ist nicht durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar (signifikantes Änderungssignal). Die einzelnen Modelle zeigen eine starke, in der Richtung übereinstimmende Klimaänderung.

9.2.8 RCP8.5: Klimaänderungssignal für die nahe Zukunft 2021 bis 2050

Die Tabellen 20 bis 24 fassen die Eigenschaften der Klimaänderungssignale bis in die nahe Zukunft für unterschiedliche Parameter und Indikatoren zusammen. Es werden nur die Ergebnisse des wahrscheinlichen worst-case Klima-Szenarios RCP8.5 aufgelistet.

Die Auswertung basiert auf dem Vergleich der 30-jährigen Zeitperioden 1972 bis 2001 und 2021 bis 2050. Angegeben ist der Mittelwert des Ensembles der regionalen Klimamodelle der 2 Perioden, das zukünftige Klimaänderungssignal Δ und die Bandbreite der Änderungssignale. Letzteres wird über das Ensemble-Minimum und Maximum angegeben. Zusätzlich ist der Mittelwert der Periode 1972 bis 2001, basierend auf dem Beobachtungsdatensatz, angegeben.

Die Niederschlagssumme innerhalb der Wintersaison DJFM wird im Skigebiet bis in die nahe Zukunft um bis zu 12% zunehmen, wobei keine statistische Signifikanz vorherrscht. Das Änderungssignal ist durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar. Die Spannbreite umfasst negative und positive Änderungen. Im Gegensatz dazu ist die Änderung der Temperatur statistisch signifikant. Bis in die nahe Zukunft wird die winterliche Mitteltemperatur im Skigebiet um ca. 1,3°C zunehmen, unabhängig von der Seehöhe (Tabelle 20).

Das zukünftige Klimaänderungssignal der mittleren Gesamtschneehöhe (Naturschnee, Tabelle 21) zeigt für alle Seehöhen und Expositionen eine Abnahme innerhalb der Wintersaison DJFM. Die Änderungen bewegen sich hierbei zwischen -17% und -23%, wobei die prozentualen Änderungen in tiefen und mittleren Lagen am größten sind. Im Allgemeinen ist das Änderungssignal statistisch nicht signifikant.

Auch für die Schneedeckendauer (Naturschnee) zeigt das Klimaänderungssignal in Richtung einer Abnahme, unabhängig von der Seehöhe. Das Klimaänderungssignal ist statistisch nicht signifikant. An den Punkten beträgt die Abnahme bis zu 22%. Das entspricht im Mittel zwischen 10 und 14 Tage weniger für die Monate Dezember bis einschließlich März. Unter Berücksichtigung von technischer Schneeproduktion zeigt sich, dass die Schneedeckendauer im Mittel meist ähnliche Werte für die Periode 2021 bis 2050 und 1972 bis 2001 aufweist. Die Änderungen betragen bis zu -9%. Dies entspricht einer Abnahme zwischen 8 bis 10 Tage. Darüber hinaus ist ersichtlich, dass die Spannbreite (Unsicherheit) der Änderungen geringer ist, im Vergleich zum Änderungssignal der Schneedeckendauer ohne Berücksichtigung der technischen Schneeproduktion.

Der Beginn der Skisaison (Naturschnee) wird im Skigebiet um bis zu 4 Tage nach hinten verschoben, wobei das Änderungssignal nicht signifikant ist. Das Änderungssignal bezüglich Ende der Skisaison ist ebenfalls nicht signifikant. Hierbei wird das Ende im Mittel 13 Tage früher eintreten (Tabelle 22). Mit Hilfe der technischen Beschneigung kann der Saisonstart Anfang Dezember erfolgen. Das Ende der Skisaison wird im Mittel nicht vor Ende März eintreten (Tabelle 23).

Das Klimaänderungssignal der Anzahl der möglichen Beschneistunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ$) ist für die Perioden 15. November bis 15. Dezember, 15. November bis 6. Jänner als auch für 15. November bis 31. Jänner statistisch signifikant (Tabelle 24), unabhängig von der Seehöhe. In diesen Zeitfenstern beträgt die Abnahme meist zwischen 23 und 36%, wobei mit abnehmender Seehöhe die negativen Änderungen stärker werden.

Tabelle 20: Klima-Szenario RCP8.5: Zukünftiges Klimaänderungssignal der Niederschlagssumme und der Temperatur, betreffend der Perioden 2021 bis 2050 und 1972 bis 2001. ENS-Mittel ist der Ensemble-Mittelwert. OBS-Mittel ist der Mittelwert, basierend auf den Beobachtungsdatensätzen GPARD1 (Niederschlagssumme) bzw. SPARTACUS (Temperatur). Δ ist das zukünftige Klimaänderungssignal. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und ENS-Mittel der Periode 1972 bis 2001. Min: Ensemble-Minimum; Max: Ensemble-Maximum; Saison: DJFM. Rot: Klimawandelfolge - Das Änderungssignal ist robust und nicht mit zufälligen Schwankungen des Klimas erklärbar. Gelb: Das Änderungssignal ist nicht eindeutig. Grün: Das Änderungssignal ist durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar.

Niederschlagssumme

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel			RCP8.5 ENS-Mittel			Δ Spannweite		Sig
					1972-2001 [mm]	1972-2001 [mm]	2021-2050 [mm]	Δ [mm]	Δ [%]	Min [mm]	Max [mm]		
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	334,7	311,5	346,3	34,9	11	-3,3	65,6		
Piste FIS	2	1230	SO	20	322,5	298,4	332,2	33,8	11	-2,8	63,9		
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	333,4	306,5	342,3	35,8	12	-1,5	64,7		

Temperatur

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel			RCP8.5 ENS-Mittel			Δ Spannweite		Sig
					1972-2001 [°C]	1972-2001 [°C]	2021-2050 [°C]	Δ [°C]	Min [°C]	Max [°C]			
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	-2,2	-2,6	-1,3	1,3	0,6	2,5			
Piste FIS	2	1230	SO	20	-1,8	-2,2	-0,9	1,3	0,6	2,3			
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	-1,4	-1,7	-0,4	1,3	0,7	2,4			

Tabelle 21: Klima-Szenario RCP8.5: Zukünftiges Klimaänderungssignal der mittleren Gesamtschneehöhe und Schneedeckendauer (Naturschnee, Naturschnee plus technischer Schnee), betreffend der Perioden 2021 bis 2050 und 1972 bis 2001. ENS-Mittel ist der Ensemble-Mittelwert. OBS-Mittel ist der Mittelwert, basierend auf den Beobachtungsdatensätzen. Δ ist das zukünftige Klimaänderungssignal. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und ENS-Mittel der Periode 1972 bis 2001. Min: Ensemble-Minimum; Max: Ensemble-Maximum; Saison: DJFM. Rot: Klimawandelfolge - Das Änderungssignal ist robust und nicht mit zufälligen Schwankungen des Klimas erklärbar. Gelb: Das Änderungssignal ist nicht eindeutig. Grün: Das Änderungssignal ist durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar.

Gesamtschneehöhe HS, Naturschnee

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannweite		Sig	
					1972-2001 [cm]	1972-2001 [cm]	2021-2050 [cm]	Δ [cm]	Δ [%]	Min [cm]		Max [cm]
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	56,3	48,6	40,2	-8,5	-17	-21,2	2,2	Grün
Piste FIS	2	1230	SO	20	48,6	42,6	34,0	-8,6	-20	-20,3	2,1	Grün
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	44,0	39,7	30,5	-9,2	-23	-20,3	0,5	Grün

Schneedeckendauer (HS \geq 30 cm), Naturschnee

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannweite		Sig	
					1972-2001 [Tage]	1972-2001 [Tage]	2021-2050 [Tage]	Δ [Tage]	Δ [%]	Min [Tage]		Max [Tage]
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	80,8	77,1	67,3	-9,8	-13	-26,5	3,6	Grün
Piste FIS	2	1230	SO	20	74,7	69,8	57,8	-12,0	-17	-31,1	2,7	Grün
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	68,8	65,9	51,7	-14,3	-22	-32,9	0,6	Grün

Schneedeckendauer (HS \geq 30 cm), Naturschnee plus technische Schneeproduktion

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannweite		Sig	
					1972-2001 [Tage]	1972-2001 [Tage]	2021-2050 [Tage]	Δ [Tage]	Δ [%]	Min [Tage]		Max [Tage]
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	117,6	114,5	106,9	-7,6	-7	-27,5	-1,6	Grün
Piste FIS	2	1230	SO	20	115,9	113,2	103,2	-10,0	-9	-30,6	-2,2	Rot
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	116,9	115,3	107,7	-7,6	-7	-26,2	-2,1	Grün

Tabelle 22: Klima-Szenario RCP8.5: Zukünftiges Klimaänderungssignal des Indikators Beginn und Ende der Skisaison (Naturschnee), betreffend der Perioden 2021 bis 2050 und 1972 bis 2001. Beginn und Ende geben den Anfangs- und Endzeitpunkt innerhalb der Periode 1. Oktober bis 31. August an, in der die mittlere Gesamtschneehöhe durchgehend mindestens 30 cm beträgt. ENS-Mittel ist der Ensemble-Mittelwert. OBS-Mittel ist der Mittelwert, basierend auf den Beobachtungsdatensätzen. Δ ist das zukünftige Klimaänderungssignal. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und ENS-Mittel der Periode 1972 bis 2001. Min: Ensemble-Minimum; Max: Ensemble-Maximum. Rot: Klimawandelfolge - Das Änderungssignal ist robust und nicht mit zufälligen Schwankungen des Klimas erklärbar. Gelb: Das Änderungssignal ist nicht eindeutig. Grün: Das Änderungssignal ist durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar.

Beginn der Skisaison, durchgehende Schneehöhe $HS \geq 30$ cm

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel			Δ [Tage]	Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	RCP8.5 1972-2001	ENS-Mittel 2021-2050		Min [Tage]	Max [Tage]	
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	04. Jan	03. Jan	07. Jan	4	-15,1	19,0	
Piste FIS	2	1230	SO	20	09. Jan	06. Jan	09. Jan	3	-12,7	22,8	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	12. Jan	05. Jan	09. Jan	4	-18,4	23,3	

Ende der Skisaison, durchgehende Schneehöhe $HS \geq 30$ cm

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel			Δ [Tage]	Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	RCP8.5 1972-2001	ENS-Mittel 2021-2050		Min [Tage]	Max [Tage]	
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	11. Apr	09. Apr	27. Mär	-13	-23,9	6,4	
Piste FIS	2	1230	SO	20	03. Apr	30. Mär	17. Mär	-13	-2,0	5,6	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	30. Mär	22. Mär	09. Mär	-13	-2,9	4,1	

Tabelle 23: Klima-Szenario RCP8.5: Zukünftiges Klimaänderungssignal des Indikators Beginn und Ende der Skisaison (Naturschnee plus technischer Schnee), betreffend der Perioden 2021 bis 2050 und 1972 bis 2001. Beginn und Ende geben den Anfangs- und Endzeitpunkt innerhalb der Periode 1. Oktober bis 31. August an, in der die mittlere Gesamtschneehöhe durchgehend mindestens 30 cm beträgt. ENS-Mittel ist der Ensemble-Mittelwert. OBS-Mittel ist der Mittelwert, basierend auf den Beobachtungsdatensätzen. Δ ist das zukünftige Klimaänderungssignal. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und ENS-Mittel der Periode 1972 bis 2001. Min: Ensemble-Minimum; Max: Ensemble-Maximum. Rot: Klimawandelfolge - Das Änderungssignal ist robust und nicht mit zufälligen Schwankungen des Klimas erklärbar. Gelb: Das Änderungssignal ist nicht eindeutig. Grün: Das Änderungssignal ist durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar.

Beginn der Skisaison (techn. Schnee), durchgehende Schneehöhe $HS \geq 30$ cm

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel			Δ [Tage]	Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	RCP8.5 1972-2001	ENS-Mittel 2021-2050		Min [Tage]	Max [Tage]	
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	28. Nov	03. Dez	10. Dez	7	-1,0	15,6	
Piste FIS	2	1230	SO	20	01. Dez	04. Dez	12. Dez	8	0,0	16,4	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	01. Dez	03. Dez	10. Dez	7	0,9	17,2	

Ende der Skisaison (techn. Schnee), durchgehende Schneehöhe $HS \geq 30$ cm

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel			Δ [Tage]	Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	RCP8.5 1972-2001	ENS-Mittel 2021-2050		Min [Tage]	Max [Tage]	
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	14. Mai	11. Mai	25. Apr	-16	-24,3	-4,7	
Piste FIS	2	1230	SO	20	02. Mai	01. Mai	15. Apr	-16	-25,1	-4,7	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	09. Mai	06. Mai	22. Apr	-14	-23,5	-5,0	

Tabelle 24: Klima-Szenario RCP8.5: Zukünftiges Klimaänderungssignal der Anzahl der möglichen Beschneistunden (Feuchtkugelttemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$), betreffend der Perioden 2021 bis 2050 und 1972 bis 2001. ENS-Mittel ist der Ensemble-Mittelwert. OBS-Mittel ist der Mittelwert, basierend auf dem Beobachtungsdatensatz SPARTACUS. Δ ist das zukünftige Klimaänderungssignal. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und ENS-Mittel der Periode 1972 bis 2001. Min: Ensemble-Minimum; Max: Ensemble-Maximum. Rot: Klimawandelfolge - Das Änderungssignal ist robust und nicht mit zufälligen Schwankungen des Klimas erklärbar. Gelb: Das Änderungssignal ist nicht eindeutig. Grün: Das Änderungssignal ist durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar.

Anzahl der möglichen Beschneistunden 15. Nov bis 15. Dez

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannweite		Sig	
					1972-2001 [Std.]	1972-2001 [Std.]	2021-2050 [Std.]	Δ [Std.]	Δ [%]	Min [Std.]		Max [Std.]
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	281,2	264,8	186,1	-78,7	-30	-163,9	-21,3	
Piste FIS	2	1230	SO	20	262,6	246,8	165,7	-81,1	-33	-171,4	-27,7	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	237,5	224,9	143,5	-81,4	-36	-162,3	-32,3	

Anzahl der möglichen Beschneistunden 15. Nov bis 06. Jän

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannweite		Sig	
					1972-2001 [Std.]	1972-2001 [Std.]	2021-2050 [Std.]	Δ [Std.]	Δ [%]	Min [Std.]		Max [Std.]
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	522,6	544,8	417,6	-127,2	-23	-254,2	-31,0	
Piste FIS	2	1230	SO	20	499,0	518,9	386,6	-132,3	-25	-268,1	-30,7	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	467,8	485,2	352,2	-133,0	-27	-260,8	-28,1	

Anzahl der möglichen Beschneistunden 15. Nov bis 31. Jän

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannweite		Sig	
					1972-2001 [Std.]	1972-2001 [Std.]	2021-2050 [Std.]	Δ [Std.]	Δ [%]	Min [Std.]		Max [Std.]
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	843,6	877,9	675,8	-202,1	-23	-387,1	-96,6	
Piste FIS	2	1230	SO	20	810,9	840,7	634,2	-206,5	-25	-398,2	-94,5	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	767,8	794,9	589,0	-205,9	-26	-386,5	-88,0	

9.2.9 RCP8.5: Klimaänderungssignal für die ferne Zukunft 2070 bis 2099

Die Tabellen 25 bis 29 fassen die Eigenschaften der Klimaänderungssignale bis in die ferne Zukunft für unterschiedliche Parameter und Indikatoren zusammen. Es werden nur die Ergebnisse des wahrscheinlichen worst-case Klima-Szenarios RCP8.5 aufgelistet.

Die Auswertung basiert auf dem Vergleich der 30-jährigen Zeitperioden 1972 bis 2001 und 2070 bis 2099. Angegeben ist der Mittelwert des Ensembles der regionalen Klimamodelle der 2 Perioden, das zukünftige Klimaänderungssignal Δ und die Bandbreite der Änderungssignale. Letzteres wird über das Ensemble-Minimum und Maximum angegeben. Zusätzlich ist der Mittelwert der Periode 1972 bis 2001, basierend auf dem SPARTACUS-Beobachtungsdatensatz, angegeben.

Die Niederschlagssumme innerhalb der Wintersaison DJFM wird im Skigebiet bis in die ferne Zukunft um bis zu 24% zunehmen, wobei statistische Signifikanz vorherrscht. Die Änderung der Temperatur ist ebenfalls statistisch signifikant. Bis in die ferne Zukunft wird die winterliche Mitteltemperatur im Skigebiet um ca. 4°C zunehmen, unabhängig von der Seehöhe (Tabelle 25). Die maximale projizierte Spannweite umfasst den Bereich von 2,7 bis 5,7°C.

RCP8.5 projiziert für die ferne Zukunft in allen Seehöhen und Expositionen eine deutliche Abnahme der Gesamtschneehöhe (Naturschnee) innerhalb der Wintersaison DJFM (Tabelle 26). Die negativen Änderungen bewegen sich hierbei zwischen -69% und -75%, wobei die prozentualen Änderungen in tiefen und mittleren Lagen am größten sind. Dies entspricht einer Schneehöhenreduktion von 30 cm. Im Allgemeinen ist das Änderungssignal statistisch signifikant. Auch für die Schneedeckendauer (Naturschnee) zeigt das Klimaänderungssignal in Richtung einer Abnahme, unabhängig von der Seehöhe. Das Änderungssignal ist signifikant und somit direkte Folge des Klimawandels (Kombination aus natürlichen und anthropogenen Treibern). Die Anzahl der Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 cm nimmt über alle Höhenlagen zwischen 52 und 55 Tagen ab. Auch ist die Spannweite der möglichen Änderungen sehr hoch. Mit Hilfe der technischen Schneeproduktion fallen die negativen Änderungen deutlich geringer aus, sind aber dennoch statistisch signifikant. In der fernen Zukunft 2070 bis 2099 projiziert RCP8.5 eine mittlere Schneedeckendauer (Naturschnee+techn Schnee) von 53 bis 60 Tagen innerhalb der Periode Dezember bis einschließlich März.

Der Beginn der Skisaison (Naturschnee) wird im Skigebiet um bis zu 13 Tage nach hinten verschoben, wobei das Änderungssignal nur am höchsten Punkt Sessellift Bergstation signifikant ist. Die Änderungen an den tiefer gelegenen Punkten ist unklar. Die Spannweite der Änderung beträgt zwischen -18 und 28 Tagen. Das Änderungssignal bezüglich Ende der Skisaison ist für die zwei oberen Höhenlagen signifikant. Das Ende wird im Mittel zwischen 44 und 50 Tage früher eintreten. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Spannweite der möglichen Änderungen recht hoch ist (Tabelle 27). Die technische Beschneigung führt zu einer markanten Verlängerung der Skisaison. Der Beginn wird dennoch in allen Höhenlagen im Mittel erst gegen Ende Dezember stattfinden, das Ende Anfang März eintreten (Tabelle 28).

Das Klimaänderungssignal der Anzahl der möglichen Beschneistunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$) ist für die Perioden 15. November bis 15. Dezember, 15. November bis 6. Jänner als auch für 15. November bis 31. Jänner statistisch signifikant (Tabelle 29), unabhängig von der Seehöhe. Hierbei zeigt das Änderungssignal im Mittel eine Reduktion der möglichen Beschneistunden um bis zu 70%.

Tabelle 25: Klima-Szenario RCP8.5: Zukünftiges Klimaänderungssignal der Niederschlagssumme und der Temperatur, betreffend der Perioden 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001. ENS-Mittel ist der Ensemble-Mittelwert. OBS-Mittel ist der Mittelwert, basierend auf den Beobachtungsdatensätzen GPARD1 (Niederschlagssumme) bzw. SPARTACUS (Temperatur). Δ ist das zukünftige Klimaänderungssignal. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und ENS-Mittel der Periode 1972 bis 2001. Min: Ensemble-Minimum; Max: Ensemble-Maximum; Saison: DJFM. Rot: Klimawandelfolge - Das Änderungssignal ist robust und nicht mit zufälligen Schwankungen des Klimas erklärbar. Gelb: Das Änderungssignal ist nicht eindeutig. Grün: Das Änderungssignal ist durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar.

Niederschlagssumme

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel			RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001 [mm]	1972-2001 [mm]	2070-2099 [mm]	Δ [mm]	Δ [%]	Min [mm]	Max [mm]	
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	334,7	311,5	382,4	71,0	23	17,8	118,5	
Piste FIS	2	1230	SO	20	322,5	298,4	367,8	69,3	23	17,5	113,8	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	333,4	306,5	380,6	74,1	24	18,8	126,7	

Temperatur

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel			RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001 [°C]	1972-2001 [°C]	2070-2099 [°C]	Δ [°C]	Min [°C]	Max [°C]		
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	-2,2	-2,6	1,5	4,1	2,7	5,7		
Piste FIS	2	1230	SO	20	-1,8	-2,2	2,0	4,1	2,7	5,6		
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	-1,4	-1,7	2,4	4,2	2,7	5,7		

Tabelle 26: Klima-Szenario RCP8.5: Zukünftiges Klimaänderungssignal der mittleren Gesamtschneehöhe und Schneedeckendauer (Naturschnee, Naturschnee plus technischer Schnee), betreffend der Perioden 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001. ENS-Mittel ist der Ensemble-Mittelwert. OBS-Mittel ist der Mittelwert, basierend auf den Beobachtungsdatensätzen. Δ ist das zukünftige Klimaänderungssignal. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und ENS-Mittel der Periode 1972 bis 2001. Min: Ensemble-Minimum; Max: Ensemble-Maximum; Saison: DJFM. Rot: Klimawandelfolge - Das Änderungssignal ist robust und nicht mit zufälligen Schwankungen des Klimas erklärbar. Gelb: Das Änderungssignal ist nicht eindeutig. Grün: Das Änderungssignal ist durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar.

Gesamtschneehöhe HS, Naturschnee

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannweite		Sig	
					1972-2001 [cm]	1972-2001 [cm]	2070-2099 [cm]	Δ [cm]	Δ [%]	Min [cm]		Max [cm]
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	56,3	48,6	15,4	-33,3	-69	-49,6	-19,4	
Piste FIS	2	1230	SO	20	48,6	42,6	12,0	-30,6	-72	-45,1	-18,0	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	44,0	39,7	10,2	-29,6	-75	-42,0	-17,9	

Schneedeckendauer (HS \geq 30 cm), Naturschnee

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannweite		Sig	
					1972-2001 [Tage]	1972-2001 [Tage]	2070-2099 [Tage]	Δ [Tage]	Δ [%]	Min [Tage]		Max [Tage]
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	80,8	77,1	22,5	-54,6	-71	-77,8	-38,8	
Piste FIS	2	1230	SO	20	74,7	69,8	17,1	-52,7	-76	-75,9	-36,1	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	68,8	65,9	14,2	-51,7	-78	-72,5	-35,8	

Schneedeckendauer (HS \geq 30 cm), Naturschnee plus technischer Schnee

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannweite		Sig	
					1972-2001 [Tage]	1972-2001 [Tage]	2070-2099 [Tage]	Δ [Tage]	Δ [%]	Min [Tage]		Max [Tage]
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	117,6	114,5	61,2	-53,2	-46	-83,9	-25,4	
Piste FIS	2	1230	SO	20	115,9	113,2	53,7	-59,5	-53	-91,1	-29,6	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	116,9	115,3	62,1	-53,1	-46	-93,3	-22,9	

Tabelle 27: Klima-Szenario RCP8.5: Zukünftiges Klimaänderungssignal des Indikators Beginn und Ende der Skisaison (Naturschnee), betreffend der Perioden 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001. ENS-Mittel ist der Ensemble-Mittelwert. Beginn und Ende geben den Anfangs- und Endzeitpunkt innerhalb der Periode 1. Oktober bis 31. August an, in der die mittlere Gesamtschneehöhe durchgehend mindestens 30 cm beträgt. ersten und letzten Mal OBS-Mittel ist der Mittelwert, basierend auf den Beobachtungsdatensätzen. Δ ist das zukünftige Klimaänderungssignal. Min: Ensemble-Minimum; Max: Ensemble-Maximum. Rot: Klimawandelfolge - Das Änderungssignal ist robust und nicht mit zufälligen Schwankungen des Klimas erklärbar. Gelb: Das Änderungssignal ist nicht eindeutig. Grün: Das Änderungssignal ist durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar.

Beginn der Skisaison, durchgehende Schneehöhe $HS \geq 30$ cm

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel			Δ [Tage]	Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	RCP8.5 ENS-Mittel 1972-2001	2070-2099		Min [Tage]	Max [Tage]	
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	04. Jan	03. Jan	16. Jan	13	-14,2	27,2	Red
Piste FIS	2	1230	SO	20	09. Jan	06. Jan	14. Jan	8	-19,5	28,1	Yellow
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	12. Jan	05. Jan	12. Jan	7	-18,8	23,4	Green

Ende der Skisaison, durchgehende Schneehöhe $HS \geq 30$ cm

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel			Δ [Tage]	Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	RCP8.5 ENS-Mittel 1972-2001	2070-2099		Min [Tage]	Max [Tage]	
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	11. Apr	09. Apr	18. Feb	-50	-88,1	-23,6	Red
Piste FIS	2	1230	SO	20	03. Apr	30. Mär	11. Feb	-47	-79,2	-22,1	Red
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	30. Mär	22. Mär	06. Feb	-44	-75,7	-16,5	Green

Tabelle 28: Klima-Szenario RCP8.5: Zukünftiges Klimaänderungssignal des Indikators Beginn und Ende der Skisaison (Naturschnee plus technischer Schnee), betreffend der Perioden 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001. ENS-Mittel ist der Ensemble-Mittelwert. Beginn und Ende geben den Anfangs- und Endzeitpunkt innerhalb der Periode 1. Oktober bis 31. August an, in der die mittlere Gesamtschneehöhe durchgehend mindestens 30 cm beträgt. ersten und letzten Mal OBS-Mittel ist der Mittelwert, basierend auf den Beobachtungsdatensätzen. Δ ist das zukünftige Klimaänderungssignal. Min: Ensemble-Minimum; Max: Ensemble-Maximum. Rot: Klimawandelfolge - Das Änderungssignal ist robust und nicht mit zufälligen Schwankungen des Klimas erklärbar. Gelb: Das Änderungssignal ist nicht eindeutig. Grün: Das Änderungssignal ist durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar.

Beginn der Skisaison (techn. Schnee), durchgehende Schneehöhe $HS \geq 30$ cm

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel			Δ [Tage]	Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	RCP8.5 1972-2001	ENS-Mittel 2070-2099		Min [Tage]	Max [Tage]	
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	28. Nov	03. Dez	31. Dez	28	14,4	46,4	
Piste FIS	2	1230	SO	20	01. Dez	04. Dez	02. Jan	29	17,1	45,3	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	01. Dez	03. Dez	31. Dez	28	17,8	45,5	

Ende der Skisaison (techn. Schnee), durchgehende Schneehöhe $HS \geq 30$ cm

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel			Δ [Tage]	Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	RCP8.5 1972-2001	ENS-Mittel 2070-2099		Min [Tage]	Max [Tage]	
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	14. Mai	11. Mai	12. Mär	-60	-93,8	-44,7	
Piste FIS	2	1230	SO	20	02. Mai	01. Mai	05. Mär	-57	-86,8	-38,8	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	09. Mai	06. Mai	13. Mär	-54	-90,4	-34,0	

Tabelle 29: Klima-Szenario RCP8.5: Zukünftiges Klimaänderungssignal der Anzahl der möglichen Beschneistunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$), betreffend der Perioden 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001. ENS-Mittel ist der Ensemble-Mittelwert. OBS-Mittel ist der Mittelwert, basierend auf dem Beobachtungsdatensatz SPARTACUS. Δ ist das zukünftige Klimaänderungssignal. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und ENS-Mittel der Periode 1972 bis 2001. Min: Ensemble-Minimum; Max: Ensemble-Maximum. Rot: Klimawandelfolge - Das Änderungssignal ist robust und nicht mit zufälligen Schwankungen des Klimas erklärbar. Gelb: Das Änderungssignal ist nicht eindeutig. Grün: Das Änderungssignal ist durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar.

Anzahl der möglichen Beschneistunden 15. Nov bis 15. Dez

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannbreite			Sig
					1972-2001	1972-2001	2070-2099	Δ	Δ	Min	Max	
					[Std.]	[Std.]	[Std.]	[Std.]	[%]	[Std.]	[Std.]	
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	281,2	264,8	81,4	-183,4	-69	-249,4	-118,8	
Piste FIS	2	1230	SO	20	262,6	246,8	68,7	-178,1	-72	-235,9	-119,4	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	237,5	224,9	56,6	-168,3	-75	-224,3	-114,9	

Anzahl der möglichen Beschneistunden 15. Nov bis 06. Jän

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannbreite			Sig
					1972-2001	1972-2001	2070-2099	Δ	Δ	Min	Max	
					[Std.]	[Std.]	[Std.]	[Std.]	[%]	[Std.]	[Std.]	
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	522,6	544,8	183,0	-361,7	-66	-487,1	-243,6	
Piste FIS	2	1230	SO	20	499,0	518,9	160,8	-358,1	-69	-464,3	-249,6	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	467,8	485,2	138,7	-346,4	-71	-440,1	-242,5	

Anzahl der möglichen Beschneistunden 15. Nov bis 31. Jän

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannbreite			Sig
					1972-2001	1972-2001	2070-2099	Δ	Δ	Min	Max	
					[Std.]	[Std.]	[Std.]	[Std.]	[%]	[Std.]	[Std.]	
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	843,6	877,9	302,5	-575,4	-66	-771,9	-379,8	
Piste FIS	2	1230	SO	20	810,9	840,7	273,2	-567,5	-68	-739,1	-383,8	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	767,8	794,9	244,2	-550,7	-69	-702,7	-371,8	

9.2.10 RCP2.6: Klimaänderungssignal für die ferne Zukunft 2070 bis 2099

Die Tabellen 30 bis 34 fassen die Eigenschaften der Klimaänderungssignale bis in die ferne Zukunft für unterschiedliche Parameter und Indikatoren zusammen. Es werden nur die Ergebnisse des klimafreundlichen Klima-Szenarios RCP2.6 aufgelistet.

Die Auswertung basiert auf dem Vergleich der 30-jährigen Zeitperioden 1972 bis 2001 und 2070 bis 2099. Angegeben ist der Mittelwert des Ensembles der regionalen Klimamodelle der 2 Perioden, das zukünftige Klimaänderungssignal Δ und die Bandbreite der Änderungssignale. Letzteres wird über das Ensemble-Minimum und Maximum angegeben. Zusätzlich ist der Mittelwert der Periode 1972 bis 2001, basierend auf dem SPARTACUS-Beobachtungsdatensatz, angegeben.

Die Niederschlagssumme innerhalb der Wintersaison DJFM wird im Skigebiet bis in die ferne Zukunft um 8% zunehmen, wobei keine statistische Signifikanz vorherrscht. Das Änderungssignal ist durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar. Die Spannbreite umfasst negative und positive Änderungen. Im Gegensatz dazu ist die Änderung der Temperatur statistisch signifikant. Bis in die ferne Zukunft wird die winterliche Mitteltemperatur im Skigebiet um ca. 1,5°C zunehmen, unabhängig von der Seehöhe. Die maximale projizierte Spannbreite umfasst den Bereich von 1,7 bis 2,8°C. (Tabelle 30).

In RCP2.6 fallen die projizierten Änderungen, betreffend der Schneeeindikatoren, deutlich schwächer aus, im Vergleich zu RCP8.5. Das zukünftige Klimaänderungssignal der mittleren Gesamtschneehöhe (Naturschnee, Tabelle 31) zeigt für die Punkte eine gewisse Abnahme innerhalb der Wintersaison DJFM. Im Allgemeinen ist das Änderungssignal bis auf den tiefstgelegenen Punkt statistisch nicht signifikant. Die Änderungen bewegen sich im niedrigen zweistelligen Prozentbereich (Änderungen von -14 bis -19%, entspricht einer Abnahme von bis zu 7 cm).

Die Änderung der Schneedeckendauer (Naturschnee) beträgt im Mittel -16 Tage. Das Änderungssignal ist statistisch nicht signifikant. Unter Berücksichtigung von technischer Schneeproduktion fallen die negativen Änderungen geringer aus. Mit Hilfe der Beschneigung werden in der Periode 2070 bis 2099 im Mittel ähnliche Verhältnisse herrschen, wie in der Vergleichsperiode 1972 bis 2001. Innerhalb der Monate Dezember bis einschließlich März wird es an über 100 Tagen eine Schneebedeckung mit einer Schneehöhe von mindestens 30 cm geben.

Das zukünftige Änderungssignal von Beginn und Ende der Skisaison (Naturschnee) ist statistisch nicht signifikant (Tabelle 32). Der Beginn der Skisaison wird im Skigebiet im Mittel zwischen 1 und 3 Tage nach hinten verschoben, das Ende zwischen 11 und 13 Tage früher eintreten. Die technische Beschneigung führt erwartungsgemäß zu einem früheren Saisonstart. Der Beginn der Skisaison tritt im Mittel Anfang Dezember ein. Darüber hinaus tritt das Saisonende in allen Höhenlagen im Mittel nicht vor Ende März ein (Tabelle 33).

Das Klimaänderungssignal der Anzahl der möglichen Beschneistunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$) ist für die Perioden 15. November bis 15. Dezember, 15. November bis 6. Jänner als auch für 15. November bis 31. Jänner statistisch signifikant (Tabelle 34), unabhängig von der Seehöhe. In diesen Zeitfenstern beträgt die Abnahme meist zwischen 23 und 30%, wobei mit zunehmender Seehöhe die negativen Änderungen schwächer werden.

Tabelle 30: Klima-Szenario RCP2.6: Zukünftiges Klimaänderungssignal der Niederschlagssumme und der Temperatur, betreffend der Perioden 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001. ENS-Mittel ist der Ensemble-Mittelwert. OBS-Mittel ist der Mittelwert, basierend auf den Beobachtungsdatensätzen GPARD1 (Niederschlagssumme) bzw. SPARTACUS (Temperatur). Δ ist das zukünftige Klimaänderungssignal. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und ENS-Mittel der Periode 1972 bis 2001. Min: Ensemble-Minimum; Max: Ensemble-Maximum; Saison: DJFM. Rot: Klimawandelfolge - Das Änderungssignal ist robust und nicht mit zufälligen Schwankungen des Klimas erklärbar. Gelb: Das Änderungssignal ist nicht eindeutig. Grün: Das Änderungssignal ist durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar.

Niederschlagssumme

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel			RCP2.6 ENS-Mittel			Δ Spannweite		Sig
					1972-2001 [mm]	1972-2001 [mm]	2070-2099 [mm]	Δ [mm]	Δ [%]	Min [mm]	Max [mm]		
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	334,7	306,5	329,3	22,8	7	-22,1	56,7		
Piste FIS	2	1230	SO	20	322,5	293,4	315,9	22,6	8	-19,4	54,5		
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	333,4	302,0	326,2	24,2	8	-19,7	55,7		

Temperatur

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel			RCP2.6 ENS-Mittel			Δ Spannweite		Sig
					1972-2001 [°C]	1972-2001 [°C]	2070-2099 [°C]	Δ [°C]	Min [°C]	Max [°C]			
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	-2,2	-2,6	-1,1	1,5	1,1	2,8			
Piste FIS	2	1230	SO	20	-1,8	-2,2	-0,7	1,5	1,1	2,7			
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	-1,4	-1,7	-0,3	1,5	1,0	2,8			

Tabelle 31: Klima-Szenario RCP2.6: Zukünftiges Klimaänderungssignal der mittleren Gesamtschneehöhe und Schneedeckendauer (Naturschnee, Naturschnee plus technischer Schnee), betreffend der Perioden 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001. ENS-Mittel ist der Ensemble-Mittelwert. OBS-Mittel ist der Mittelwert, basierend auf den Beobachtungsdatensätzen. Δ ist das zukünftige Klimaänderungssignal. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und ENS-Mittel der Periode 1972 bis 2001. Min: Ensemble-Minimum; Max: Ensemble-Maximum; Saison: DJFM. Rot: Klimawandelfolge - Das Änderungssignal ist robust und nicht mit zufälligen Schwankungen des Klimas erklärbar. Gelb: Das Änderungssignal ist nicht eindeutig. Grün: Das Änderungssignal ist durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar.

Gesamtschneehöhe HS, Naturschnee

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP2.6 ENS-Mittel		Δ Spannweite		Sig	
					1972-2001 [cm]	1972-2001 [cm]	2070-2099 [cm]	Δ [cm]	Δ [%]	Min [cm]		Max [cm]
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	56,3	47,3	40,9	-6,5	-14	-17,1	7,2	Grün
Piste FIS	2	1230	SO	20	48,6	41,3	34,7	-6,6	-16	-16,2	7,1	Grün
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	44,0	38,6	31,2	-7,4	-19	-16,4	6,6	Rot

Schneedeckendauer (HS \geq 30 cm), Naturschnee

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP2.6 ENS-Mittel		Δ Spannweite		Sig	
					1972-2001 [Tage]	1972-2001 [Tage]	2070-2099 [Tage]	Δ [Tage]	Δ [%]	Min [Tage]		Max [Tage]
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	80,8	77,1	62,0	-15,0	-19	-29,6	-2,8	Grün
Piste FIS	2	1230	SO	20	74,7	69,5	53,5	-16,0	-23	-32,3	-1,3	Grün
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	68,8	65,5	48,8	-16,7	-25	-33,6	-0,5	Grün

Schneedeckendauer (HS \geq 30 cm), Naturschnee plus technischer Schnee

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP2.6 ENS-Mittel		Δ Spannweite		Sig	
					1972-2001 [Tage]	1972-2001 [Tage]	2070-2099 [Tage]	Δ [Tage]	Δ [%]	Min [Tage]		Max [Tage]
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	117,6	114,1	104,3	-9,8	-9	-31,8	0,3	Grün
Piste FIS	2	1230	SO	20	115,9	112,8	101,1	-11,7	-10	-35,1	-0,3	Rot
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	116,9	114,8	105,4	-9,4	-8	-30,9	-0,3	Rot

Tabelle 32: Klima-Szenario RCP2.6: Zukünftiges Klimaänderungssignal des Indikators Beginn und Ende der Skisaison (Naturschnee), betreffend der Perioden 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001. Beginn und Ende geben den Anfangs- und Endzeitpunkt innerhalb der Periode 1. Oktober bis 31. August an, in der die mittlere Gesamtschneehöhe durchgehend mindestens 30 cm beträgt. ENS-Mittel ist der Ensemble-Mittelwert. OBS-Mittel ist der Mittelwert, basierend auf den Beobachtungsdatensätzen. Δ ist das zukünftige Klimaänderungssignal. Min: Ensemble-Minimum; Max: Ensemble-Maximum. Rot: Klimawandelfolge - Das Änderungssignal ist robust und nicht mit zufälligen Schwankungen des Klimas erklärbar. Gelb: Das Änderungssignal ist nicht eindeutig. Grün: Das Änderungssignal ist durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar.

Beginn der Skisaison, durchgehende Schneehöhe $HS \geq 30$ cm

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel			RCP2.6 ENS-Mittel			Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	1972-2001	2070-2099	Δ [Tage]	Min [Tage]	Max [Tage]			
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	04. Jan	04. Jan	07. Jan	3	-8,8	11,4			
Piste FIS	2	1230	SO	20	09. Jan	06. Jan	08. Jan	2	-9,9	12,4			
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	12. Jan	06. Jan	07. Jan	1	-10,3	7,8			

Ende der Skisaison, durchgehende Schneehöhe $HS \geq 30$ cm

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel			RCP2.6 ENS-Mittel			Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	1972-2001	2070-2099	Δ [Tage]	Min [Tage]	Max [Tage]			
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	11. Apr	08. Apr	26. Mär	-13	-24,5	7,1			
Piste FIS	2	1230	SO	20	03. Apr	28. Mär	16. Mär	-12	-27,4	8,8			
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	30. Mär	21. Mär	10. Mär	-11	-31,8	9,9			

Tabelle 33: Klima-Szenario RCP2.6: Zukünftiges Klimaänderungssignal des Indikators Beginn und Ende der Skisaison (Naturschnee plus technischer Schnee), betreffend der Perioden 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001. Beginn und Ende geben den Anfangs- und Endzeitpunkt innerhalb der Periode 1. Oktober bis 31. August an, in der die mittlere Gesamtschneehöhe durchgehend mindestens 30 cm beträgt. ENS-Mittel ist der Ensemble-Mittelwert. OBS-Mittel ist der Mittelwert, basierend auf den Beobachtungsdatensätzen. Δ ist das zukünftige Klimaänderungssignal. Min: Ensemble-Minimum; Max: Ensemble-Maximum. Rot: Klimawandelfolge - Das Änderungssignal ist robust und nicht mit zufälligen Schwankungen des Klimas erklärbar. Gelb: Das Änderungssignal ist nicht eindeutig. Grün: Das Änderungssignal ist durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar.

Beginn der Skisaison (techn. Schnee), durchgehende Schneehöhe $HS \geq 30$ cm

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel			Δ [Tage]	Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	RCP2.6 1972-2001	ENS-Mittel 2070-2099		Min [Tage]	Max [Tage]	
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	28. Nov	03. Dez	11. Dez	8	0,2	23,7	
Piste FIS	2	1230	SO	20	01. Dez	05. Dez	12. Dez	7	0,0	20,9	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	01. Dez	03. Dez	10. Dez	7	0,1	19,9	

Ende der Skisaison (techn. Schnee), durchgehende Schneehöhe $HS \geq 30$ cm

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel			Δ [Tage]	Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	RCP2.6 1972-2001	ENS-Mittel 2070-2099		Min [Tage]	Max [Tage]	
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	14. Mai	10. Mai	24. Apr	-16	-29,5	-5,9	
Piste FIS	2	1230	SO	20	02. Mai	01. Mai	15. Apr	-16	-28,7	-5,1	
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	09. Mai	05. Mai	21. Apr	-14	-24,4	-4,9	

Tabelle 34: Klima-Szenario RCP2.6: Zukünftiges Klimaänderungssignal der Anzahl der möglichen Beschneistunden (Feuchtkugelttemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$), betreffend der Perioden 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001. ENS-Mittel ist der Ensemble-Mittelwert. OBS-Mittel ist der Mittelwert, basierend auf den Beobachtungsdatensätzen. Δ ist das zukünftige Klimaänderungssignal. Die prozentuale Änderung von Δ ist der Quotient aus Δ und ENS-Mittel der Periode 1972 bis 2001. Min: Ensemble-Minimum; Max: Ensemble-Maximum. Rot: Klimawandelfolge - Das Änderungssignal ist robust und nicht mit zufälligen Schwankungen des Klimas erklärbar. Gelb: Das Änderungssignal ist nicht eindeutig. Grün: Das Änderungssignal ist durch zufällige Schwankungen des Klimas erklärbar.

Anzahl der möglichen Beschneistunden 15. Nov bis 15. Dez

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP2.6 ENS-Mittel		Δ Spannweite		Sig	
					1972-2001 [Std.]	1972-2001 [Std.]	2070-2099 [Std.]	Δ [Std.]	Δ [%]	Min [Std.]		Max [Std.]
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	281,2	258,5	198,8	-59,6	-23	-144,1	15,2	Grün
Piste FIS	2	1230	SO	20	262,6	240,6	177,8	-62,9	-26	-146,3	10,4	Rot
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	237,5	218,8	154,0	-64,8	-30	-144,3	4,1	Rot

Anzahl der möglichen Beschneistunden 15. Nov bis 06. Jän

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP2.6 ENS-Mittel		Δ Spannweite		Sig	
					1972-2001 [Std.]	1972-2001 [Std.]	2070-2099 [Std.]	Δ [Std.]	Δ [%]	Min [Std.]		Max [Std.]
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	522,6	539,5	414,2	-125,4	-23	-264,3	-25,6	Rot
Piste FIS	2	1230	SO	20	499,0	513,6	382,7	-130,9	-25	-267,2	-30,4	Rot
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	467,8	479,8	345,9	-133,9	-28	-266,1	-38,7	Rot

Anzahl der möglichen Beschneistunden 15. Nov bis 31. Jän

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP2.6 ENS-Mittel		Δ Spannweite		Sig	
					1972-2001 [Std.]	1972-2001 [Std.]	2070-2099 [Std.]	Δ [Std.]	Δ [%]	Min [Std.]		Max [Std.]
Sessellift Bergstation	3	1380	SO	15	843,6	869,4	645,9	-223,5	-26	-447,5	-136,6	Rot
Piste FIS	2	1230	SO	20	810,9	832,0	604,1	-227,9	-27	-445,1	-140,9	Rot
Sessellift Talstation	1	1080	SO	15	767,8	786,0	557,2	-228,8	-29	-438,4	-142,0	Rot

10 Zusammenfassung

10.1 Vergangenheit

Die winterliche Schneedecke weist im Allgemeinen große natürliche Schwankungen auf und reagiert innerhalb unterschiedlicher Höhenlagen und Regionen sensibel auf Klimaänderungen. Die hohe zeitliche (Jahr-zu-Jahr) und räumliche Variabilität kann den langfristigen Trend überdecken und Aussagen betreffend Trends erschweren. Auch können innerhalb einer Wintersaison die vorherrschenden Wettersysteme und atmosphärischen Luftdruckverteilungen den Charakter einzelner Wintermonate wesentlich bestimmen. Aufgrund dessen ist die Variabilität (z.B.: kalt-warm, feucht-trocken) in den Wintermonaten naturgemäß höher als im Sommer. Für den Winter bedeutet dies, dass neben der Temperatur auch die Häufigkeit und Intensität niederschlagsbringender Wetterlagen eine große Rolle im zeitlichen Schneedeckenverlauf spielen.

Ein Blick in die Vergangenheit verdeutlicht die hohe Jahr-zu-Jahr Variabilität der saisonalen Gesamtschneehöhe und Schneedeckendauer im Skigebiet, unabhängig von der Seehöhe. Auch sind dekadische Schwankungen in den zeitlichen Verläufen erkennbar. In den 1970er und 1980er Jahren gab es schneereiche Winter. Ab Ende der 1980er Jahre hat die winterliche Schneehöhe abgenommen. Im Zeitraum Beginn der 2000er bis 2015 gab es wieder vermehrt Wintersaisonen mit einer größeren Schneehöhe. Im Skigebiet besteht zwischen der saisonalen Schneehöhe und der Niederschlagssumme eine erhöhte Korrelation. Dies deutet darauf hin, dass der winterliche Niederschlag für den saisonalen Schneedeckenverlauf eine wesentliche Rolle spielt.

Die Niederschlagssumme innerhalb der einzelnen Wintersaisonen ist von Jahr zu Jahr sehr variabel. Es wechseln sich trockene und feuchte Perioden ab. Auffallend ist, dass seit Mitte/Ende der 1990er Jahre die Monate Jänner, Februar und März durchwegs feuchter waren, als die Jahre davor. Diese niederschlagsreicheren Monate führten augenscheinlich zu den größeren saisonalen Gesamtschneehöhen in den letzten Dekaden. Eine stetige Erhöhung der Tagesmitteltemperatur seit den 1980er Jahren ist in den Monaten März, April und Mai erkennbar, in den letzten Jahren auch im November und Dezember. Die beobachtete Temperaturerhöhung in der Vor- und Nachsaison kann in den tieferen Lagen zu einer Verkürzung der Wintersaison (Naturschnee) führen (verzögertes Einschneien und früheres Ausapern).

Die Modellierung mit technischer Schneeproduktion hat jedoch verdeutlicht, dass negative Tendenzen in den Schneekindikatoren deutlich abgeschwächt werden können (positiver Effekt der technischen Schneeproduktion). Die technische Schneeproduktion führt meist zu einer Stabilisierung der Schneedeckendauer und zu einer gedämpften Jahr-zu-Jahr Variabilität, wobei die Stärke dieses Effektes naturgemäß von der Seehöhe und den meteorologischen Bedingungen abhängig ist.

Der Vergleich der Zeitperioden 1962 bis 1990 und 1991 bis 2019 hat gezeigt, dass in der Periode 1991 bis 2019 die Niederschlagssumme innerhalb der Wintersaison Dezember bis März deutlich zugenommen hat (bis zu 33%). Die winterliche Temperatur hat im Mittel um bis zu 1,2°C zugenommen. Die Änderungen der Niederschlagssumme und der Temperatur sind in allen Seehöhen feststellbar.

Die saisonale Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee) hat über alle Seehöhen um bis zu 10% zugenommen. In der saisonalen Schneedeckendauer ($HS \geq 30$ cm) treten höhenabhängige Unterschiede auf. In den mittleren und hohen Lagen hat die Schneedeckendauer geringfügig zugenommen (bis zu 4 Tage). Im Gegensatz dazu beträgt die Abnahme in den tiefer gelegenen Regionen im Skigebiet 4 Tage.

Die Anzahl der möglichen Beschneistunden (Feuchtkugelttemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$) hat in allen Höhenlagen abgenommen (zwischen 14 und 24%). Hierbei werden die negativen Änderungen mit abnehmender Seehöhe stärker. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass trotz der Abnahme genügend Stunden für die Beschneigung zur Verfügung stehen.

10.2 Zukunft

Die drei Klima-Emissionsszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 zeigen bis 2050 ähnliche Verläufe. Die hohe Verweildauer der klimawirksamen Treibhausgase (z.B. CO₂) und Aerosole in der Atmosphäre sowie die Trägheit des Klimasystems führen dazu, dass sich die klimapolitischen Maßnahmen in den Klima-Szenarien erst nach 2050 bemerkbar machen. Die möglichen zukünftigen Änderungen im Vergleich zur Referenzperiode 1972 bis 2001 werden anhand des worst-case Klima-Szenarios RCP8.5 und des klimafreundlichen Szenarios RCP2.6 aufgezeigt. Die projizierten Änderungen für RCP4.5 befinden sich meist zwischen denen für RCP2.6 und RCP8.5.

10.2.1 RCP8.5: nahe Zukunft 2021 bis 2050

Bis in die nahe Zukunft wird für RCP8.5 in allen Höhenlagen eine Temperaturzunahme in den Wintermonaten projiziert. Das Klimaänderungssignal zeigt für die langjährige Periode 2021 bis 2050 eine mittlere Zunahme der winterlichen Temperatur (DJFM) um 1,3°C im Vergleich zur Periode 1972 bis 2001. Die maximale Bandbreite der Zunahme reicht von 0,6 bis 2,5°C. Diese Änderung kann als Folge des Klimawandels (Kombination aus natürlichen und anthropogenen Treibern) verstanden werden. Darüber hinaus besteht eine Tendenz hin zu höheren Niederschlagssummen. Die Zunahme beträgt im Mittel 11%, ist jedoch statistisch nicht signifikant und unterliegt somit zufälligen Schwankungen.

Aufgrund der zu erwartenden Temperaturzunahme wird innerhalb der Wintersaison DJFM die Gesamtschneehöhe und Schneedeckendauer im Skigebiet abnehmen, wobei die Abnahmen je nach Pistenabschnitt und Seehöhe individuell sein können. Die Änderungen der mittleren Gesamtschneehöhe (Naturschnee) betragen über alle Höhenlagen im Mittel zwischen -17 und -23% (entspricht ca. -9 cm). Die Abnahme der Schneedeckendauer (HS ≥ 30 cm, Naturschnee) beträgt über alle Höhenlagen zwischen 10 und 14 Tagen. Die Änderungen sind statistisch nicht signifikant.

Das Klimaänderungssignal der Anzahl der möglichen Beschneistunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ$) ist statistisch signifikant. Die Abnahme beträgt zwischen 23 und 36%, wobei mit abnehmender Seehöhe die negativen Änderungen geringfügig stärker werden.

Mit Hilfe der technischen Beschneigung wird die saisonale Gesamtschneehöhe und Schneedeckendauer erwartungsgemäß erhöht und die hohe Jahr-zu-Jahr Variabilität gedämpft. Es zeigt sich in allen Seehöhen, dass die Dauer der Skisaison vergrößert wird. Dennoch wird die Schneehöhe tendenziell im Skigebiet abnehmen, wobei die Stärke dieser Änderungen von der Seehöhe abhängt. Im Skigebiet werden Regionen in tiefen und mittleren Lagen etwas stärker von der zu erwartenden Temperaturerhöhung betroffen sein. Dennoch wird der Skigebietsbetrieb bis in die nahe Zukunft 2050 zwischen Dezember und März weiterhin möglich sein.

10.2.2 RCP8.5 vs. RCP2.6: ferne Zukunft 2070 bis 2099

Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird für RCP8.5 eine Zunahme der saisonalen (DJFM) Niederschlagssumme von bis zu 24% projiziert, im Vergleich zur vergangenen Periode 1972 bis 2001. Es liegt eine statistische Signifikanz dieser Zunahme vor. Die Spannweite umfasst einzig positive Änderungen. Die Änderung der Temperatur ist ebenfalls statistisch signifikant. Bis in die ferne Zukunft wird die winterliche Mitteltemperatur im Skigebiet im Mittel um 4°C zunehmen, unabhängig von der Seehöhe. Die maximale Bandbreite an möglichen Änderungen spannt einen Bereich von 2,7 bis 5,7°C auf. Im Vergleich dazu wird im klimafreundlichen Szenario RCP2.6 eine gedämpfte Temperaturzunahme von bis zu 1,5°C projiziert (1,0 bis 2,8°C). In diesem Szenario ist die Entwicklung der winterlichen Niederschlagssumme unklar (mittlere Zunahme von 8%), da die Spannweite negative als auch positive Werte umfasst. Der Niederschlag wird somit auch zukünftig der Parameter mit der größten Variabilität sein.

RCP8.5 projiziert für die ferne Zukunft in allen Seehöhen eine deutliche Abnahme der Gesamtschneehöhe (Naturschnee) innerhalb der Wintersaison DJFM. Die mittleren Änderungen bewegen sich hierbei um bis zu -75%, wobei die prozentualen Änderungen in tiefen und mittleren Lagen am größten sind. Aufgrund der geringen vertikalen Erstreckung des Skigebietes sind die höhenabhängigen Änderungen jedoch gering. Im Allgemeinen ist das Änderungssignal statistisch

signifikant. Auch für die Schneedeckendauer ($HS \geq 30$ cm, Naturschnee) zeigt das worst-case Klimaänderungssignal in Richtung einer markanten Abnahme, unabhängig von der Seehöhe. Die Anzahl der Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 cm nimmt zwischen 1. Dezember und 31. März in allen Höhenlagen im Mittel um bis zu 55 Tagen ab. Die maximale Spannbreite aus den Änderungen reicht von -77 bis -39 Tagen.

Mit Hilfe der technischen Schneeproduktion fallen die negativen saisonalen Änderungen der Schneedeckendauer geringer aus, sind aber trotzdem statistisch signifikant. In der Periode der fernen Zukunft 2070 bis 2099 projiziert RCP8.5 für den Zeitraum 1. Dezember bis 31. März eine mittlere saisonale Schneedeckendauer (Naturschnee plus technischer Schnee) von 54 bis 62 Tagen. Die technische Beschneigung führt weiters im Mittel zu einer markanten Verlängerung der Skisaison. Die Tendenz hin zu einem späteren Saisonstart und früheren Saisonende bleibt jedoch erhalten. In allen Höhenlagen wird der Beginn um 29 Tagen später stattfinden, das Ende zwischen 54 und 60 Tage früher eintreten. Die in RCP8.5 projizierten Änderungen werden alle Höhenlagen im Skigebiet treffen. Die Skisaison wird im Mittel erst Ende Dezember starten. Das Ende wird im Laufe des März eintreten.

Des Weiteren wird für RCP8.5 eine dramatische Abnahme der Anzahl an möglichen Beschneistunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$) projiziert. Die mittlere prozentuale Änderung im Zeitraum von 15. November bis 31. Jänner beträgt bis zu -69%. Die Anzahl der Schneeproduktionsstunden wird folglich im November und Dezember stark abnehmen. Die Zeitfenster zur Beschneigung werden kürzer. Der Schwellwert der Feuchtkugeltemperatur wird weniger oft erreicht. Der Beginn der ersten Beschneigung wird im Mittel nach hinten verschoben. Im Jänner werden die Schneerzeuger zusätzliche Betriebsstunden leisten. Die Änderungen werden in den verschiedenen Seehöhen eine leicht unterschiedliche Bedeutung für die Schneeproduktion haben. Der Skibetrieb wird in ferner Zukunft aufgrund der zu erwartenden Temperaturerhöhung vermutlich nur in sehr eingeschränkter Form möglich sein.

In RCP2.6 fallen die projizierten Änderungen für die verschiedenen Schneeindikatoren sichtlich schwächer aus, im Vergleich zu RCP8.5. Darüber hinaus existiert für alle Höhenlagen meist keine statistische Signifikanz. Das zukünftige Klimaänderungssignal der saisonalen (DJFM) mittleren Gesamtschneehöhe (Naturschnee) zeigt für Höhenlagen eine Abnahme. Die mittleren Änderungen bewegen sich zwischen -14 und -19% (entspricht 7 cm). Die Änderungen spannen hierbei einen maximalen Bereich von -16 bis 7 cm auf, wobei die positiven Änderungen in engem Zusammenhang mit der projizierten Niederschlagszunahme in den Wintermonaten stehen. Die mittlere Änderung der saisonalen (DJFM) Schneedeckendauer ($HS \geq 30$ cm, Naturschnee) beträgt über alle Seehöhen 16 Tage. Die Spannbreite der Änderungen reicht hierbei von -1 bis zu -33 Tagen. Unter Berücksichtigung von technischer Schneeproduktion beträgt die mittlere Änderung der Schneedeckendauer über alle Höhenlagen -12 Tage. Die Bandbreite an möglichen Änderungen spannt einen Bereich von 0 bis -35 Tagen auf. RCP2.6 projiziert für das langjährige Mittel 2070 bis 2099 eine mittlere saisonale Schneedeckendauer (Naturschnee plus technischer Schnee) von 100 Tagen innerhalb des Zeitraumes 1. Dezember bis 31. März.

Das Klimaänderungssignal der Anzahl der möglichen Beschneistunden ist statistisch signifikant. Die mittlere Abnahme für den Zeitraum 15. November bis 31. Jänner beträgt 29%. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich die Rahmenbedingungen für die technische Schneeproduktion im Skigebiet nicht wesentlich ändern und genügend Stunden für die Schneeproduktion zur Verfügung stehen werden. Die simulierten Ergebnisse für das klimafreundliche Szenario RCP2.6 verdeutlichen, dass mittels technischer Beschneigung der Skigebietsbetrieb bis in die ferne Zukunft in allen Höhenlagen zwischen Anfang Dezember und Ende März erhalten werden kann. In den tiefen Lagen kann der technische Aufwand leicht zunehmen.

Die niederschlagsbegünstigte Lage des Skigebiets Brunnalm - Hohe Veitsch im Mürtal garantiert Schneesicherheit bis in die nahe Zukunft. Zum Ende des 21. Jahrhunderts projizieren RCP2.6 und RCP8.5 deutlich unterschiedliche mögliche Zustände für das Skigebiet. Hierbei weisen die simulierten Ergebnisse teilweise eine große Spannbreite auf (Unsicherheit, hohe zeitliche Variabilität). Die Ergebnisse unterstreichen die Wichtigkeit, dass sowohl klima- als auch gesellschaftspolitische Maßnahmen zur langfristigen Reduktion von treibhausgasrelevanten Emissionen umgesetzt werden.

11 Literatur

- Anghileri D., Pianosi F., Soncini-Sessa R. (2014): Trend detection in seasonal data: from hydrology to water resources. *J. Hydrol.* 511: 171–179, doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.01.022.
- Beniston, M., Uhlmann, B., Goyettea, S., Lopez-Moreno, J. Ignacio (2011): Will snow-abundant winters still exist in the Swiss Alps in an enhanced greenhouse climate? *Int J Climatol*, 31, pp. 1257–1263.
- Haiden, T., Kann, A., Wittmann, C., Pistotnik, G., Bica, B. and Gruber, C. (2011): The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System and Its Validation over the Eastern Alpine Region, *Weather Forecast.*, 26(2), 166–183, doi:10.1175/2010WAF2222451.1, 2011.
- Chimani, B., Heinrich, G., Hofstätter, M., Kerschbaumer, M., Kienberger, S., Leuprecht, A., Lexer, A., Peßenteiner, S., Poetsch, M.S., Salzmann, M., Spiekermann, R., Switanek, M. und H. Truhetz, 2016. ÖKS15 - Klimaszenarien für Österreich. Daten, Methoden und Klimaanalyse. Projektendbericht, Wien.
- Gasser, T., Müller, H-G., (1984): Estimating regression functions and their derivatives by the kernel method. *Scandinavian Journal of Statistics*, 11:171-185.
- Haslinger K. and Bartsch A. (2016): Creating long-term gridded fields of reference evapotranspiration in Alpine terrain based on a recalibrated Hargreaves Method. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 1-13, doi:10.5194/hess-20-1-2016
- Hiebl J. and Frei C. (2016): Daily temperature grids for Austria since 1961 – concept, creation and applicability. *Theoretical and Applied Climatology* 124, 161–178, doi:10.1007/s00704-015-1411-4
- Hiebl J. and Frei C. (2017): Daily precipitation grids for Austria since 1961 – development and evaluation of a spatial dataset for hydro-climatic monitoring and modelling. *Theoretical and Applied Climatology*, doi:10.1007/s00704-017-2093-x
- Hofstätter, M. (2008): Methoden zur Berechnung von Beschneigungszeiten. Institut für Meteorologie der Universität Wien, pp.104 , Diplomarbeit
- 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, Projektendbericht, Geographica Augustana, 19, Universität Augsburg, Kendall, M.G. (1975): Rank Correlation Methods. Charles Griffin, London.
- Leidinger, D. (2013): Analyse der zeitlichen und räumlichen Variabilität des Niederschlags im Gebiet des Hohen Sonnblicks. Institut für Meteorologie der Universität Wien, Diplomarbeit
- Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., Wallis, J.R. (1994): Hydro-Climatological Trends in the Continental United States, 1948-88. *Journal of Climate*, Vol. 7, S. 586–607.
- Mann, H.B. (1945): Non-parametric test against trend. *Econometrica*, Vol. 13, S. 245–259.
- Mann, H.B., Whitney, D.R. (1947): On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *Ann. Math. Statist.* 18 (1947), no. 1, 50-60. doi:10.1214/aoms/1177730491. <https://projecteuclid.org/euclid.aoms/1177730491>

Marty, C. (2008): Regime shift of snow days in Switzerland, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L12501, doi:10.1029/2008GL033998.

Marty, C., A. Tilg, Jonas, T. (2017): Recent Evidence of Large-Scale Receding Snow Water Equivalents in the European Alps. *J. Hydrometeor.*, 18, 1021–1031, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0188.1>

Moran-Tejeda, E., Herrera, J., Lopez-Moreno, J.I., Revuelto, J., Lehmann, A., Beniston, M. (2013): Evolution and frequency (1970-2007) of combined temperature-precipitation modes in the Spanish mountains and sensitivity of snow cover. *Reg. Environ. Change* 13, pp. 873-885.

Olefs, M., Fischer, A., Lang, J. (2010): Boundary Conditions for Artificial Snow Production in the Austrian Alps. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49. 1096-1113. 10.1175/2010JAMC2251.1

Olefs, M., Schöner, W., Suklitsch, M., Wittmann, C., Niedermoser, B., Neururer, A. and Wurzer, A. (2013): SNOWGRID – A New Operational Snow Cover Model in Austria, in *Proceedings of the international snow science workshop Grenoble Chamonix Mont Blanc, Grenoble., 2013.*

Pellicciotti, F., Brock, B., Strasser, U., Burlando, P., Funk, M. and Corripio, J. (2005): An enhanced temperature-index glacier melt model including the shortwave radiation balance: development and testing for Haut Glacier d’Arolla, Switzerland, *J. Glaciol.*, 51(175), 573–587, doi:10.3189/172756505781829124, 2005.

Reid, P. C., Hari, R. E., Beaugrand, G., Livingstone, D. M., Marty, C., Straile, D., Barichivich, J., Goberville, E., Adrian, R., Aono, Y., Brown, R., Foster, J., Groisman, P., Hélaouët, P., Hsu, H.-H., Kirby, R., Knight, J., Kraberg, A., Li, J., Lo, T.-T., Myneni, R. B., North, R. P., Pounds, J. A., Sparks, T., Stübi, R., Tian, Y., Wiltshire, K. H., Xiao, D. and Zhu, Z. (2016): Global impacts of the 1980s regime shift. *Glob Change Biol*, 22: 682–703. doi:10.1111/gcb.13106

Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Benard, P., Bouttier, F., Lac, C., Masson, V., (2010): The AROME-France Convective-Scale Operational Model. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 976-991.

Sen, P.K. (1968): Estimates of the regression coefficient based on Kendall’s tau. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 63 (324), S. 1379–1389.

Schöner, W., Koch, R., Matulla, C., Marty, C., Tilg, A-M., (2018): 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*, <https://doi.org/10.1002/joc.5902>

Switanek, M.B., Troch P.A., Castro, C.L., Leuprecht, A., Chang, H-I., Mukerjee, R., Demaria, E.M.C. (2017): Scaled distribution mapping: a bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 2649–2666, <https://doi.org/10.5194/hess-21-2649-2017>

Wang, Y., Haiden, T. and Kann, A. (2006): The Operational Limited Area Modelling System at ZAMG: ALADIN-AUSTRIA, *Österr. Beitr. Zu Meteorol. Geophys.*, 37 [online] Available from: <https://books.google.at/books?id=VKzXtwAACAAJ>, 2006.

Wilcoxon, F. (1945): Individual comparisons by ranking methods, *Biometrics Bulletin*, 1, 80–83.