



Studie zur vergangenen und zukünftigen Schneedeckenentwicklung im Skigebiet Obergurgl

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 Obergurgl	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 Hohe Mut Bahn II (2500 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 Obergurgl-Vent	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	26
9.1.4	Anzahl der möglichen Beschneistunden	28
9.1.5	Temperatur und Niederschlag: MASH-Analyse	30
9.1.6	Monatliche Änderungen in der Vergangenheit: Vergleich der Zeitperioden 1962 bis 1990 und 1991 bis 2019	33
9.1.7	Schneedeckenzuwachs in den höheren Lagen	36
9.1.8	Änderungen in der Vergangenheit: Signifikanzprüfung	39
9.1.9	Periode 1991 bis 2019: Naturschnee versus technische Schneeproduktion	44
9.2	Zukunft: 1972 bis 2099	46
9.2.1	Zeitlicher Verlauf der Emissionsszenarien bis in die ferne Zukunft	46
9.2.2	Zeitlicher Verlauf der Anzahl der möglichen Beschneistunden bis in die ferne Zukunft	60
9.2.3	Emissionsszenario RCP8.5: Naturschnee und technische Schneeproduktion	63
9.2.4	Monatliche Änderungen in der Zukunft: Vergleich der Zeitperioden 1972 bis 2001 und 2021 bis 2050	67
9.2.5	Monatliche Änderungen in der Zukunft: Vergleich der Zeitperioden 1972 bis 2001 und 2070 bis 2099	75

9.2.6	Zeitlicher Verlauf der Schneeproduktionsstunden bis in die ferne Zukunft	83
9.2.7	Zukünftiges Klimaänderungssignal: Signifikanzprüfung	87
9.2.8	RCP8.5: Klimaänderungssignal für die nahe Zukunft 2021 bis 2050	88
9.2.9	RCP8.5: Klimaänderungssignal für die ferne Zukunft 2070 bis 2099	94
9.2.10	RCP2.6: Klimaänderungssignal für die ferne Zukunft 2070 bis 2099	100
10	Zusammenfassung	106
10.1	Vergangenheit	106
10.2	Zukunft	107
10.2.1	RCP8.5: nahe Zukunft 2021 bis 2050	107
10.2.2	RCP8.5 vs. RCP2.6: ferne Zukunft 2070 bis 2099	108
11	Literatur	110

1 Skigebiet Obergurgl

Im Zuge der Auftragsstudie werden für das Skigebiet Obergurgl (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 Obergurgl in den Ötztaler Alpen (Quelle: OpenStreetMaps).

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 Gitterpunktabstand) 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.

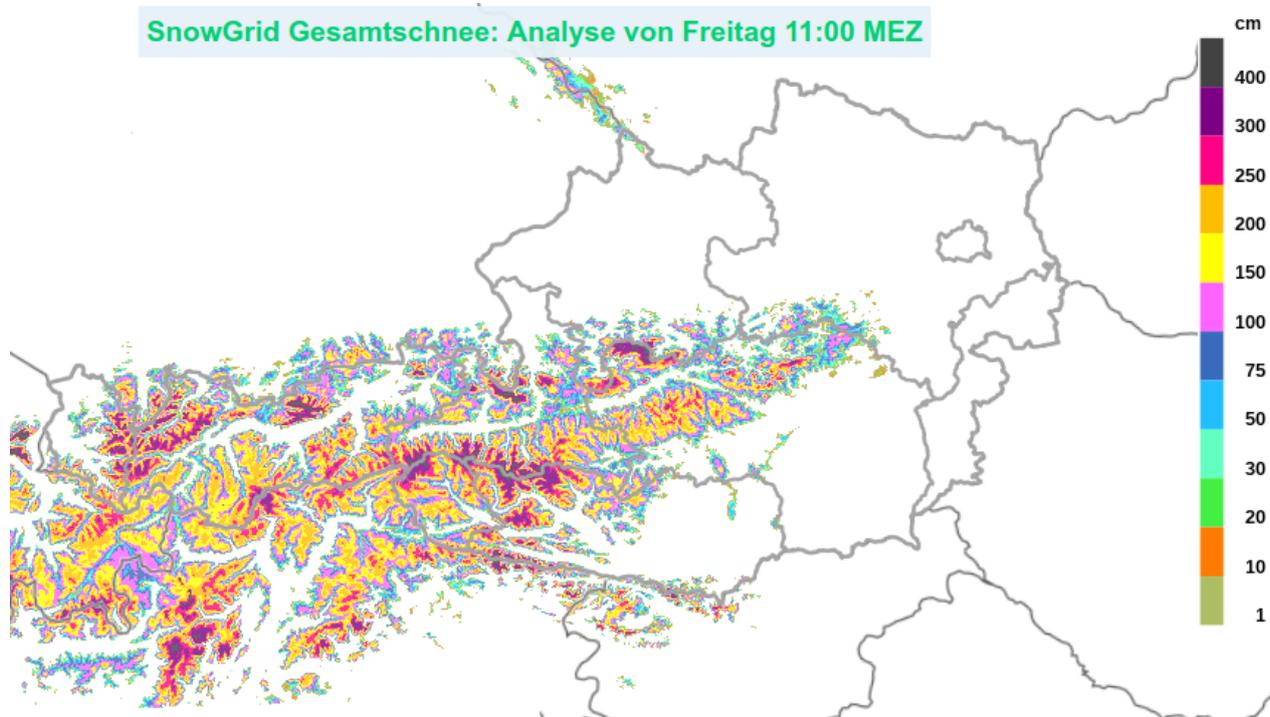


Abbildung 2: SNOWGRID Analyse der Gesamtschneehöhe gültig für den 20. März 2020, 1100 MEZ.

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.

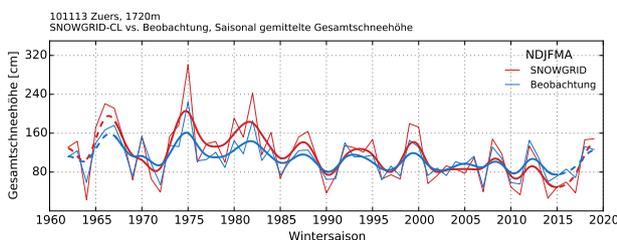
3.1 Validierung: Modellsimulationen vs. manuelle Schnee-Beobachtungen

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

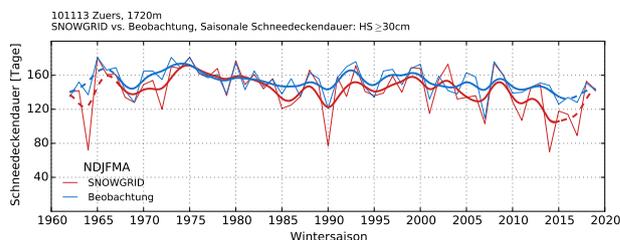
beim saisonalen Schneedeckenzuwachs eine wichtige Rolle spielen kann. Dieser Windeinfluss wird in der Modellierung parametrisiert. Auch kann bei Niederschlagsereignissen (Warmfront- Kaltfrontdurchgang, Fronten von Mittelmeertiefs) die Schneefallgrenze innerhalb kurzer Zeit deutlich schwanken. Diese kurzfristigen 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

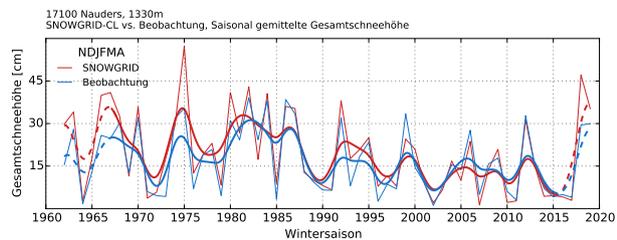


Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm

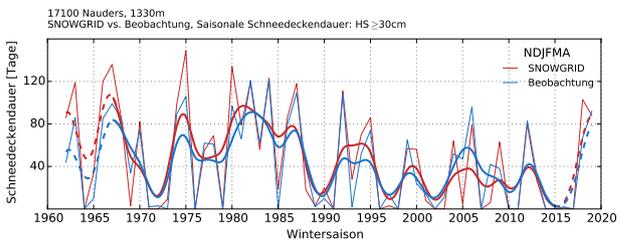


ZAMG Nauders (1330 m)

mittlere Gesamtschneehöhe HS

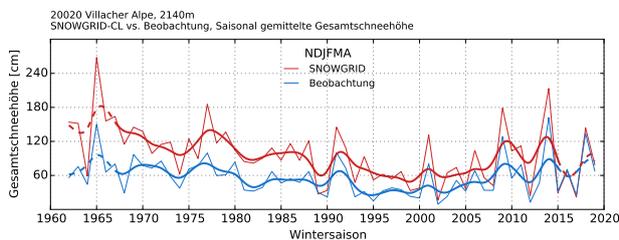


Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm



ZAMG Villacher Alpe (2140 m)

mittlere Gesamtschneehöhe HS



Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm

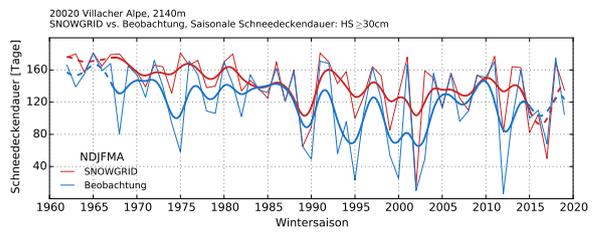


Abbildung 3: Vergleich saisonaler Schneeindikatoren (Naturschnee) basierend auf SNOWGRID-CL Simulationsergebnissen (rot) und Beobachtungen (blau) für die Klima-Stationen Zürs (oben, HD), Nauders (Mitte, ZAMG) und Villacher Alpe (unten, ZAMG). Die Zeitreihen sind mit einem Gauss-Tiefpassfilter mit einer Fensterbreite von 11 Jahren geglättet (dick ausgezogene Linien). Die Wintersaisons 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.

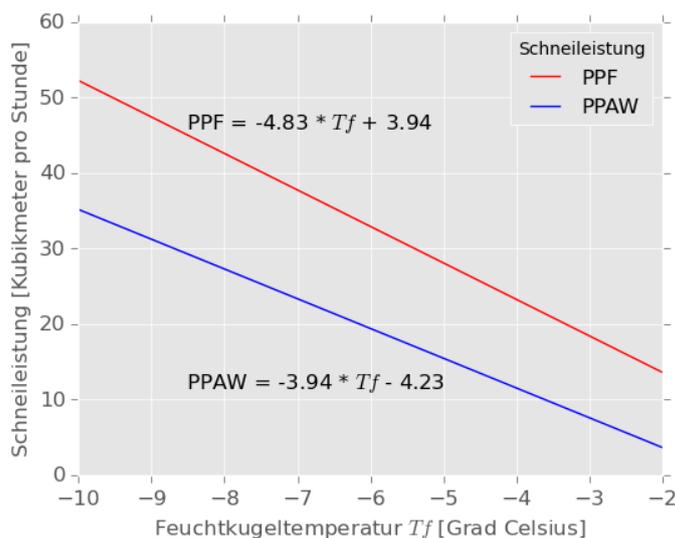


Abbildung 4: Schneileistung als Funktion der Feuchtkugeltemperatur T_f für Propellermaschinen (PPF) und Schneilanzen (PPAW).

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 GWARD1 (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 Hohe Mut Bahn II (2500 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 Hohe Mut Bahn II (2500 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 zeigen 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).

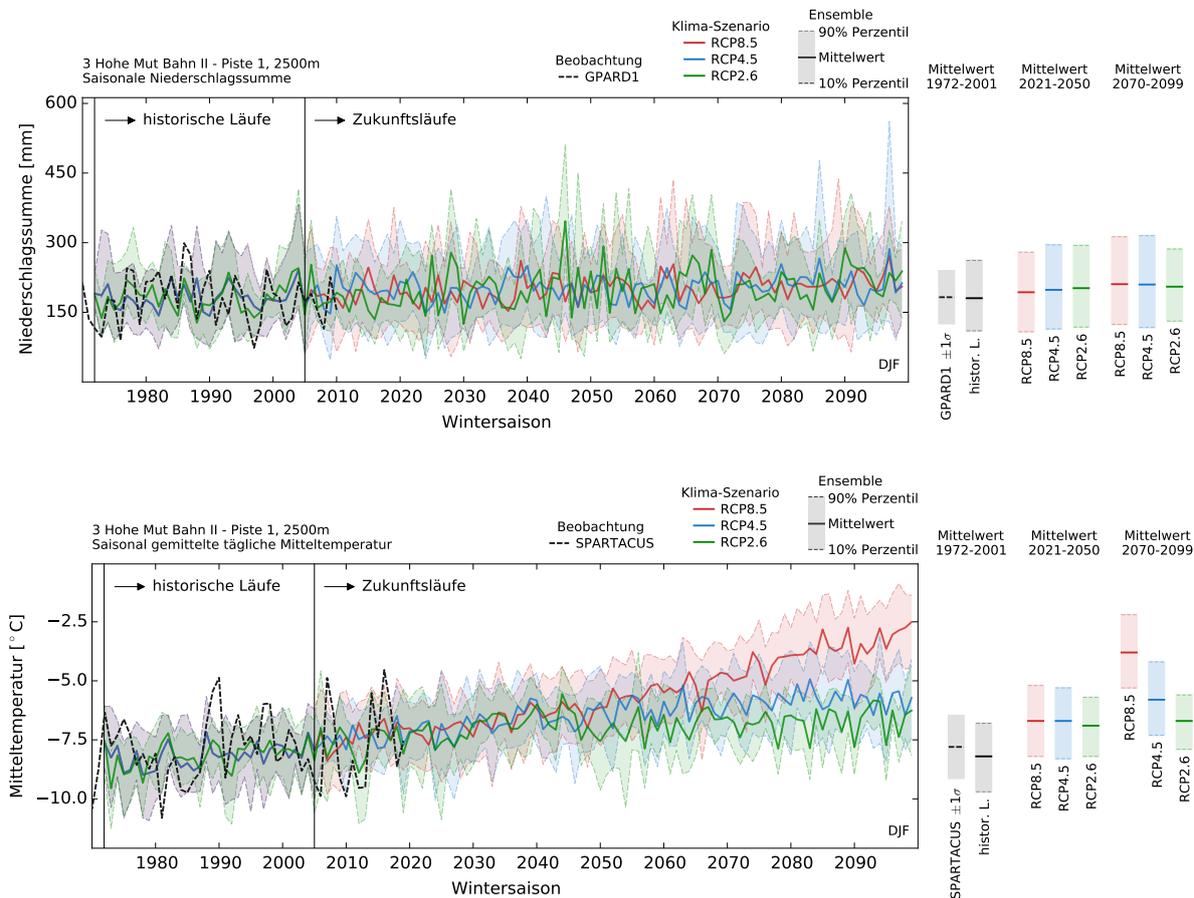


Abbildung 5: Linienverläufe der saisonalen (Dezember, Jänner und Februar, DJF) Niederschlagssumme (oben) und der Mitteltemperatur (unten) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 , RCP4.5 und RCP8.5 an dem Punkt Hohe Mut Bahn II (2500 m) bis ins Jahr 2099. Die dicken Linien stellen den Mittelwert der Simulationen dar (Ensemble-Mittelwert). Schattierte Flächen umfassen das 10 und 90% Perzentil des Modell-Ensembles (Bandbreite, Spannweite, 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 schließlich 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 Hohe Mut Bahn II (2500 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 Klimänderungssignal beträgt 1,6°C (mittlere Zunahme von 1,6°C im Vergleich zur Periode 1972 bis 2001).

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

6 Beschreibung der Simulationen

In der SNOWGRID-CL Schneedeckenmodellierung wird die tägliche Gesamtschneehöhe über die tägliche Niederschlagssumme 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 Schneeerzeuger aufgrund von Wind und Verdunstung während der Produktion beträgt 20%. Dies bedeutet, dass die berechnete Schneileistung pro Schneeerzeuger mit 0,80 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 Kunstschnees 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.

6.2 Konfiguration und verwendete Punkte innerhalb des Skigebietes

Die Schneedeckenmodellierung erfolgt an sechs repräsentativen Punkten innerhalb des Skigebietes Obergurgl. Die Tabelle 2 und Abbildung 6 geben einen Überblick über die verwendeten geographischen Punkte in unterschiedlichen Höhenlagen und Expositionen. 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 10. Oktober bis 31. Jänner aktiviert. An den ausgewählten geographischen Punkten wird die Schneileistung modelliert. Hierbei wird die technische Schneeproduktion ab einer erreichten, vordefinierten täglichen Gesamtschneehöhe HS von $HS_{max} \geq 50 \text{ cm}$ deaktiviert. Der Schwellwert der Feuchtkugeltemperatur Tf für den Zeitraum 10. Oktober bis 15. Dezember beträgt -4°C , danach bis 31. Jänner -6°C . Im gesamten Beschneigungszeitraum wird, wenn es die meteorologischen Bedingungen zulassen, an 24 Stunden pro Tag technischer Schnee produziert. Dies gilt für alle Schneeerzeuger. Des Weiteren ist die Verlustleistung 20 % (Effizienzverlust).

An den Punkten eins bis sechs erfolgt die technische Schneeproduktion mittels Schneekanonen (pro Punkt eine Schneekanone). Der Wasserbedarf der Schneeerzeuger spielt in der Modellierung aufgrund der Komplexität keine Rolle.

Tabelle 2: Geographische Informationen der ausgewählten Punkte im Skigebiet Obergurgl.

Name	ID	Höhe [m]	Exposition [-]	Neigung [°]	geogr. Länge [Dezimalgrad]	geogr. Breite [Dezimalgrad]
Hohe Mut Bahn I - Piste 6	1	1920	NW	15	11,0265919	46,8679555
Steinmannbahn - Piste 5	2	2170	NW	20	11,0187253	46,8550742
Hohe Mut Bahn II - Piste 1	3	2500	NW	20	11,02420618	46,85167897
Rosskarbahn - Piste 11	4	2400	NW	25	11,03695228	46,8638422
Rosskarbahn - Piste 6	5	2620	NW	20	11,04309574	46,86023866
Plattachbahn - Piste 6a/7	6	2800	NW	20	11,04712734	46,85638004



Abbildung 6: Geographische Lage der sechs ausgewählten Punkte im Skigebiet Obergurgl (blaue Markierungen). Der rote Pfeil in der Abbildung rechts unten zeigt in Richtung Norden (Google Earth).

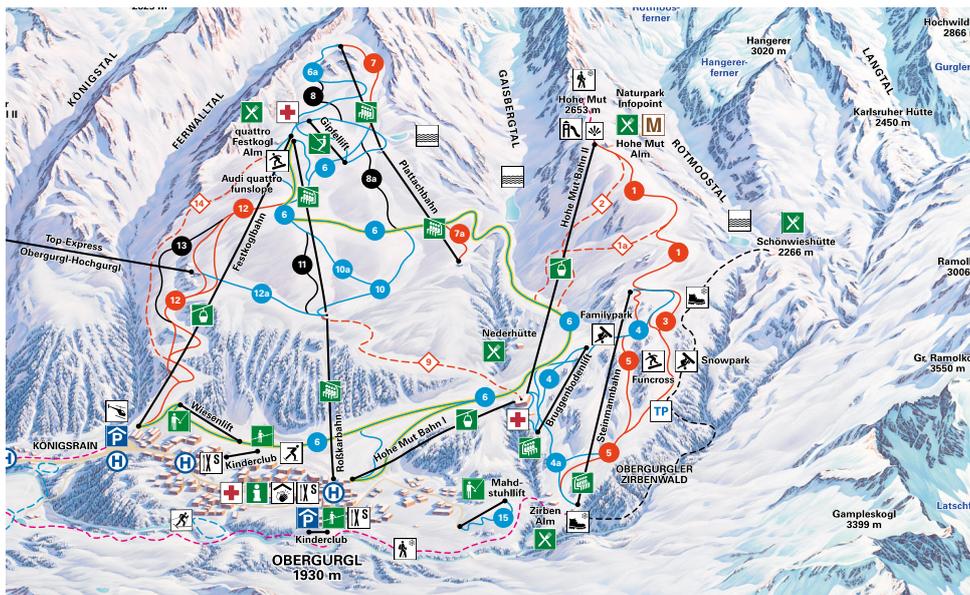


Abbildung 7: Lift- und Pistenplan (Quelle: <https://www.obergurgl.com/>).

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 NDJFMA eines bestimmten Jahres umfasst die Monate November und Dezember des Vorjahres sowie die Monate Jänner bis einschließlich April 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 der 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 Obergurgl-Vent

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 Obergurgl-Vent (1938 m Seehöhe) dargestellt. Die winterliche Temperatur zeigt von 1850 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, wenn auch in gedämpfter Form. 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.

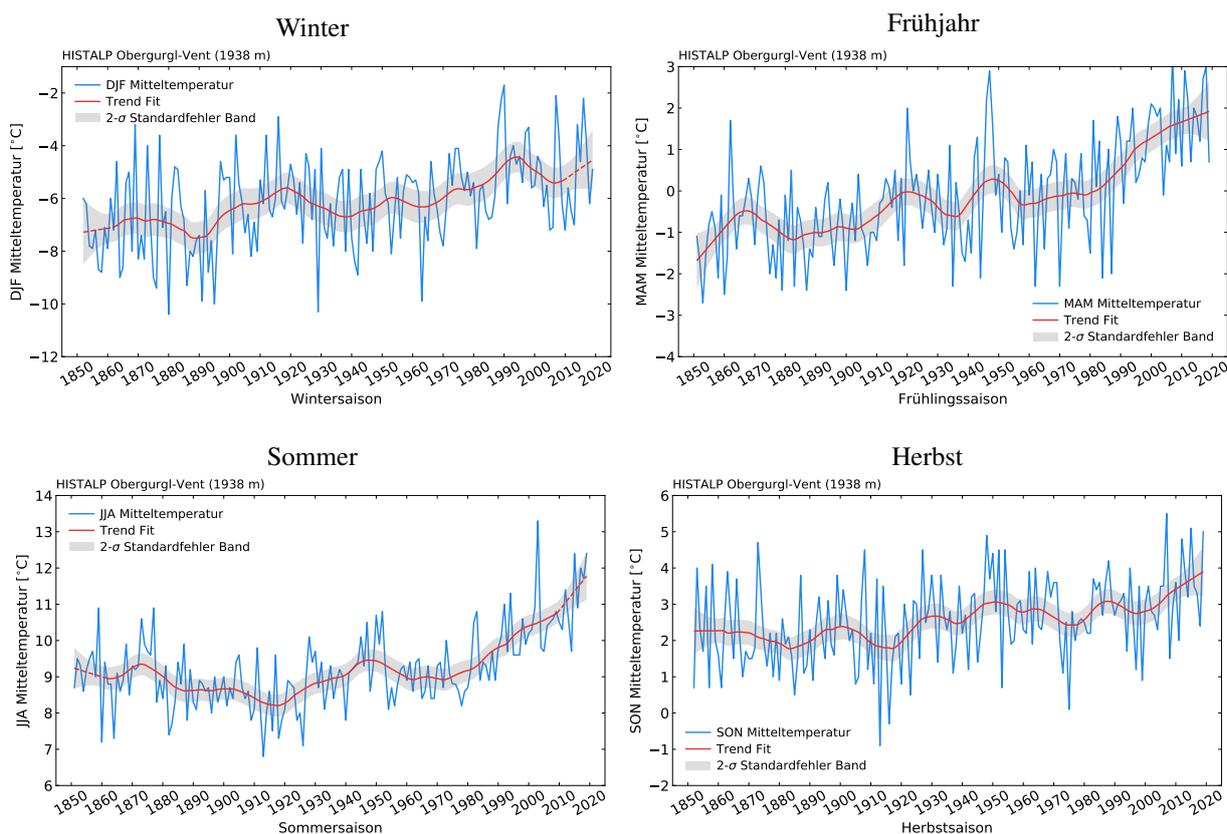


Abbildung 8: Verläufe der saisonalen Lufttemperatur an der HISTALP Station Obergurgl-Vent (1938 m) seit 1850. Die geglättete rote Kurve gibt einen Trend Fit an (parameterfreie Regression nach Gasser und Müller, 1984). Die schattierte Fläche repräsentiert das Unsicherheitsbandes des Trend Fits (95% Konfidenzintervall). 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/>.

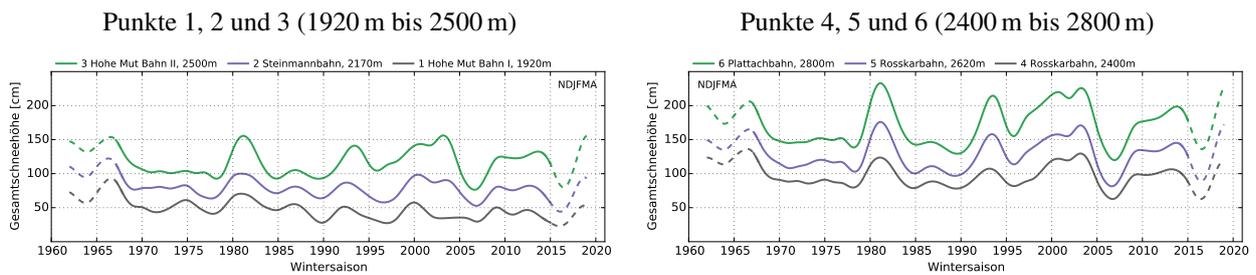
9 Ergebnisse

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 Obergurgl seit der Wintersaison 1962 liefert Abbildung 9. Die dargestellten Linienverläufe sind das Ergebnis der SNOWGRID-CL Schneedeckenmodellierung. Die Eingangsdaten für die Modellierung stammen aus dem SPARTACUS Beobachtungsdatensatz. Gut ersichtlich ist, dass die mittlere Schneehöhe an den Punkten unterhalb von ca. 2200 m Seehöhe (Punkt 1 Hohe Mut Bahn I und Punkt 2 Steinmannbahn) seit Ende der 1980er Jahre tendenziell abgenommen hat (siehe Abbildung 9, links oben). Diese Abnahme ist am tiefstgelegenen Punkt 1 Hohe Mut Bahn I (1920 m) am deutlichsten ausgeprägt. An den höher gelegenen Punkten ist dies nicht beobachtbar. Im Zeitraum Mitte der 1990er bis 2005 sowie zwischen 2010 und heute gab es oberhalb von ca. 2200 m Seehöhe vermehrt Wintersaisons mit einer größeren Schneehöhe (Abbildung 9, rechts oben). In den tiefen Lagen im Skigebiet hat auch die Schneedeckendauer seit Ende der 1980er Jahre abgenommen. Im Vergleich dazu hat sich die Schneedeckendauer in den höheren Lagen kaum verändert (Abbildung 9, unten).

mittlere Gesamtschneehöhe HS



Schneedeckendauer, HS \geq 30 cm

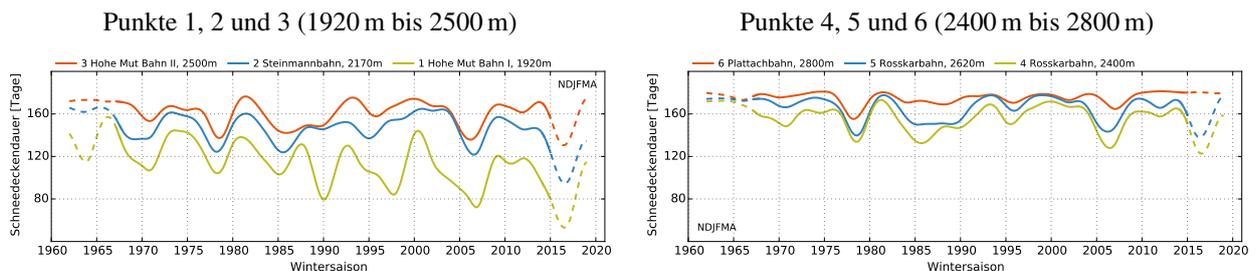


Abbildung 9: SNOWGRID-CL: Zeitliche Verläufe der saisonal (NDJFMA) gemittelten mittleren Gesamtschneehöhe HS (oben) und der saisonalen (NDJFMA) Schneedeckendauer (unten) an den 6 Punkten im Skigebiet für die Wintersaisonen 1962 bis 2019. Die Zeitreihen sind mit einem Gauss-Tiefpassfilter mit einer Fensterbreite 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 15 zeigen die Anomalien (Abweichungen zum 30-Jährigen Mittelwert einer Referenzperiode) der Schneeindikatoren (Naturschnee) an den 6 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 Seehöhe und Wintersaison. Anhand der Verläufe der Anomalien der mittleren und maximalen Gesamtschneehöhe ist deutlich zu erkennen, dass an den tiefer gelegenen Punkten 1 und 2 ab Ende der 1980er Jahre vermehrt Wintersaisonen mit einer unterdurchschnittlich hohen Schneedecke aufgetreten sind, unabhängig davon, ob die Saison von Dezember bis Februar (DJF) oder November bis April (NDJFMA) betrachtet wird. Am tiefsten Punkt (Hohe Mut Bahn I, 1920 m) ist auch die Schneedeckendauer vermehrt unterdurchschnittlich (negative Anomalien) seit Ende der 1980er Jahre (siehe Abbildung 10). Der Vergleich mit den oberhalb von ca. 2200 m Seehöhe gelegenen Punkten verdeutlicht die seehöhenabhängigen Unterschiede. In den höheren Lagen ist eine Zunahme von Wintersaisonen mit unterdurchschnittlich hohen Schneehöhen seit Ende der 1980er Jahre nicht beobachtbar. Auffällig ist jedoch die Periode zwischen Anfang der 1980er Jahre und 1992. Innerhalb dieses Zeitraumes waren die Schneehöhen in aufeinanderfolgenden Wintersaisonen unterdurchschnittlich. In den Jahren danach sind wiederum Winter mit einer deutlich überdurchschnittlicher Gesamtschneehöhe aufgetreten. Hierbei zeigen die Verläufe der Anomalien ein ähnliches Verhalten für die Wintersaisonen DJF und NDJFMA. Darüber hinaus sind um 2015 gehäuft deutlich negative Anomalien beobachtbar. Die letzten beiden Wintersaisonen 2018 und 2019 waren wieder meist überdurchschnittlich.

Die Anomalien der saisonalen Schneedeckendauer in Lagen über 2200 m Seehöhe zeigen keine eindeutigen Tendenzen. Die Anomalien im Kernwinter DJF sind meist positiv bzw. weichen bis auf wenige Ausnahmen vom klimatologischen Mittelwert ab. Speziell in den Saisonen 2005 bis 2008 und um 2016 sind jedoch negative Anomalien sehr deutlich ausgeprägt. Auch war die Schneedeckendauer zwischen Mitte der 1980er und Beginn der 1990er Jahre vermehrt unterdurchschnittlich, vor allem für die Saison NDJFMA (ähnlich wie bei der Gesamtschneehöhe).

Ein Grund für die höhenabhängigen Unterschiede ist, dass in höheren Lagen der Einfluss der Temperatur abnimmt und somit auch Temperaturänderungen geringere Auswirkungen auf die Schneehöhe haben, als in Tallagen. Anhand Tabelle 3 ist deutlich zu erkennen, dass die beobachtete Antikorrelation zwischen saisonaler Schneehöhe und Temperatur mit zunehmender Seehöhe geringer wird. Darüber hinaus nimmt im Allgemeinen 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 (NDJFMA) 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)
Plattachbahn	6	2800	-0,1	0,6
Rosskarbahn	5	2620	-0,2	0,7
Hohe Mut Bahn II	3	2500	-0,3	0,7
Rosskarbahn	4	2400	-0,3	0,7
Steinmannbahn	2	2170	-0,5	0,7
Hohe Mut Bahn I	1	1920	-0,6	0,6

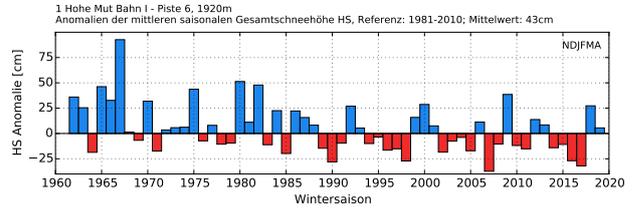
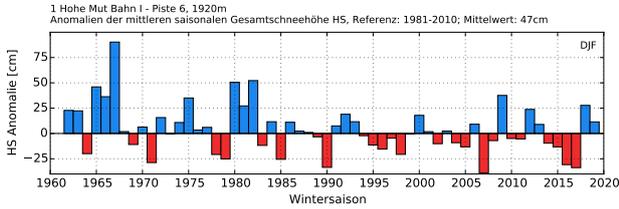
1 Hohe Mut Bahn I - Piste 6 (1920 m)

DJF

NDJFMA

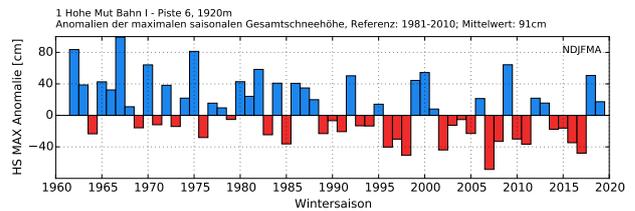
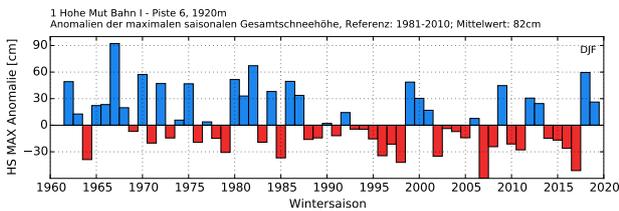
mittlere Gesamtschneehöhe

mittlere Gesamtschneehöhe



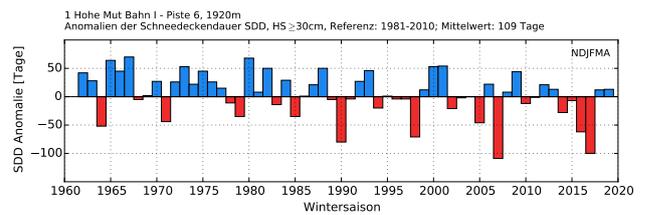
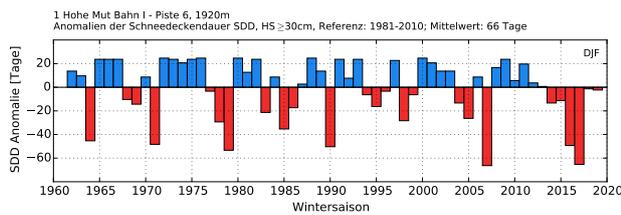
maximale Gesamtschneehöhe

maximale Gesamtschneehöhe



Schneedeckendauer, HS \geq 30 cm

Schneedeckendauer, HS \geq 30 cm



Schneedeckendauer, HS \geq 50 cm

Schneedeckendauer, HS \geq 50 cm

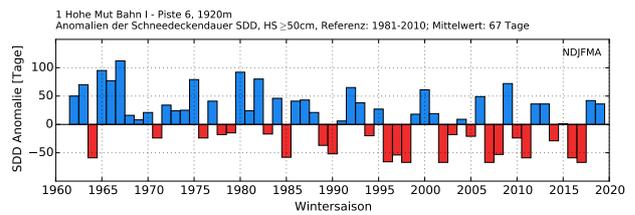
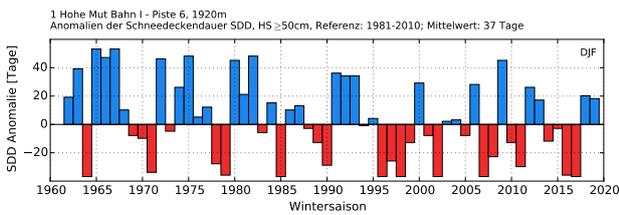


Abbildung 10: Anomalien (Abweichungen vom 30-Jährigen Mittelwert) der saisonalen Schneeeindikatoren (Naturschnee) für den Punkt 1 Hohe Mut Bahn I (1920 m). Die 30-Jährige Referenzperiode ist 1981 bis 2010. Linke Spalte: Wintersaison DJF; rechte Spalte: Wintersaison NDJFMA.

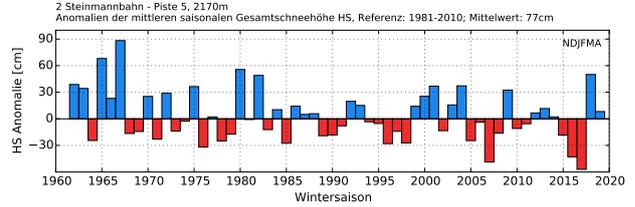
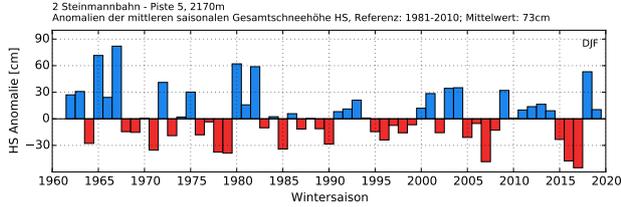
2 Steinmannbahn - Piste 5 (2170 m)

DJF

NDJFMA

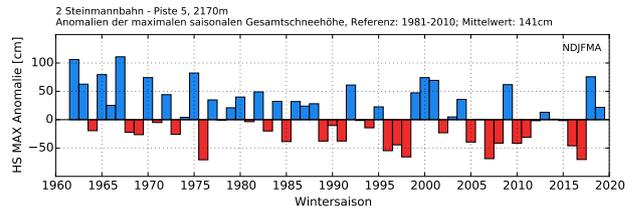
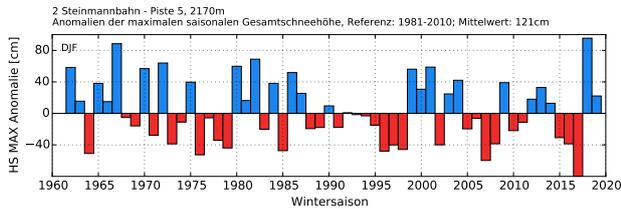
mittlere Gesamtschneehöhe

mittlere Gesamtschneehöhe



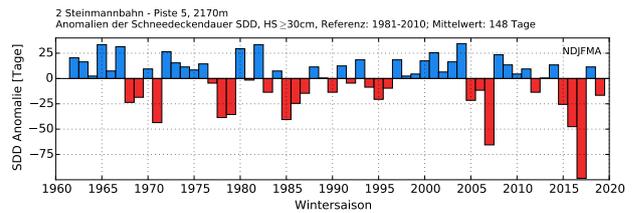
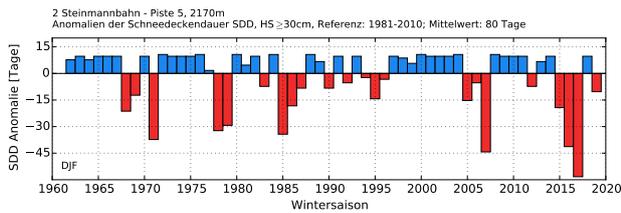
maximale Gesamtschneehöhe

maximale Gesamtschneehöhe



Schneedeckendauer, HS ≥ 30 cm

Schneedeckendauer, HS ≥ 30 cm



Schneedeckendauer, HS ≥ 50 cm

Schneedeckendauer, HS ≥ 50 cm

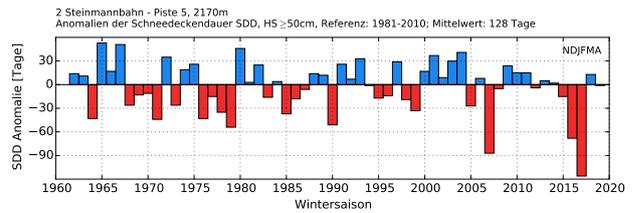
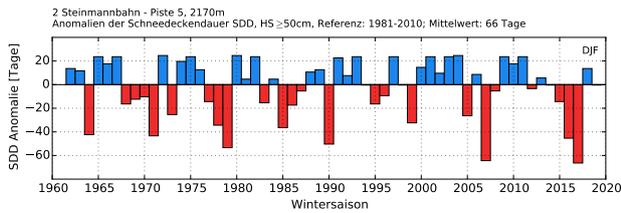


Abbildung 11: Anomalien (Abweichungen vom 30-Jährigen Mittelwert) der saisonalen Schneeeindikatoren (Naturschnee) für den Punkt 2 Steinmannbahn (2170 m). Die 30-Jährige Referenzperiode ist 1981 bis 2010. Linke Spalte: Wintersaison DJF; rechte Spalte: Wintersaison NDJFMA.

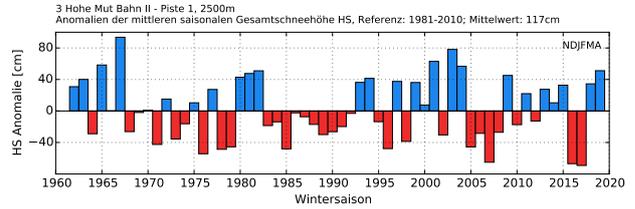
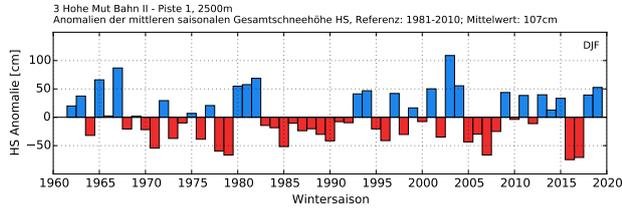
3 Hohe Mut Bahn II - Piste 1 (2500 m)

DJF

NDJFMA

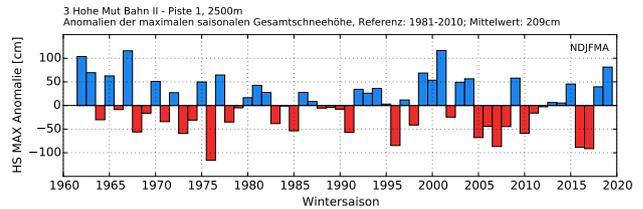
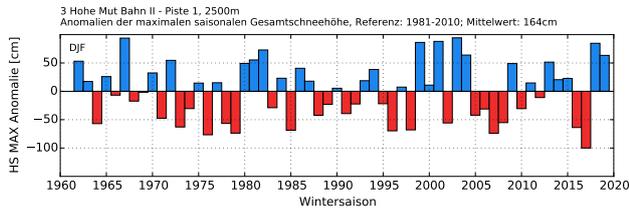
mittlere Gesamtschneehöhe

mittlere Gesamtschneehöhe



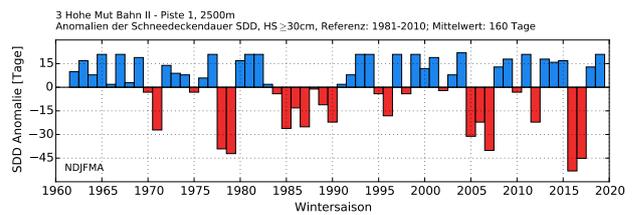
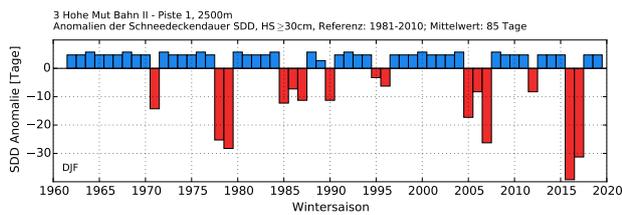
maximale Gesamtschneehöhe

maximale Gesamtschneehöhe



Schneedeckendauer, HS \geq 30 cm

Schneedeckendauer, HS \geq 30 cm



Schneedeckendauer, HS \geq 50 cm

Schneedeckendauer, HS \geq 50 cm

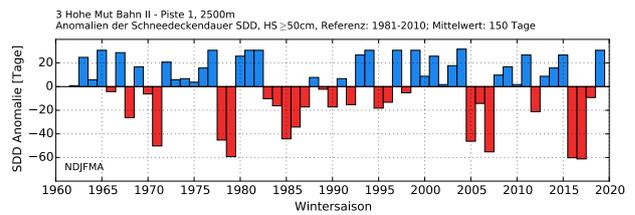
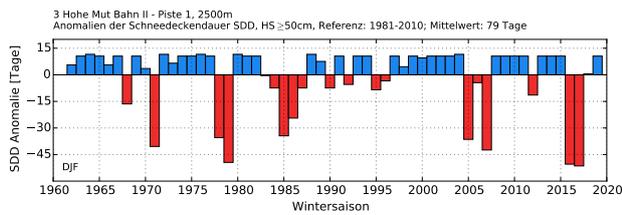


Abbildung 12: Anomalien (Abweichungen vom 30-jährigen Mittelwert) der saisonalen Schneeeindikatoren (Naturschnee) für den Punkt 3 Hohe Mut Bahn II (2500 m). Die 30-jährige Referenzperiode ist 1981 bis 2010. Linke Spalte: Wintersaison DJF; rechte Spalte: Wintersaison NDJFMA.

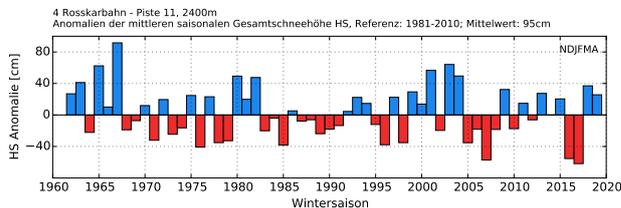
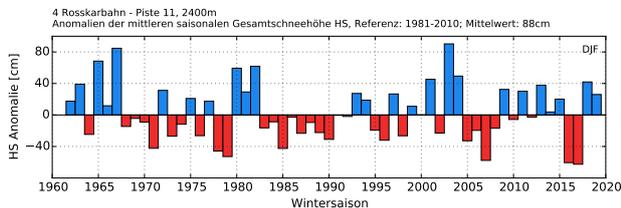
4 Rosskarbahn - Piste 11 (2400 m)

DJF

NDJFMA

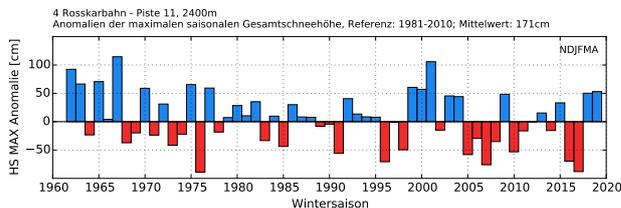
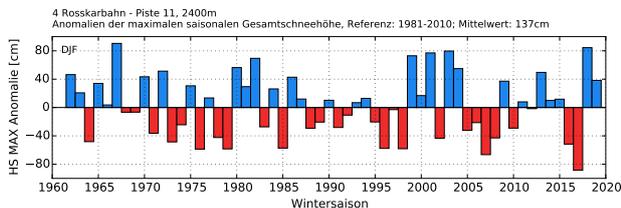
mittlere Gesamtschneehöhe

mittlere Gesamtschneehöhe



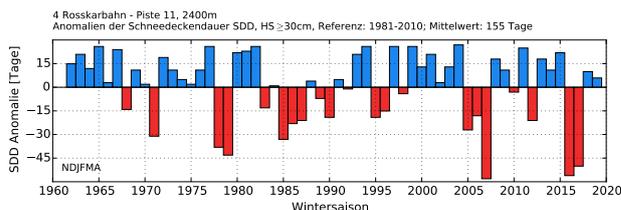
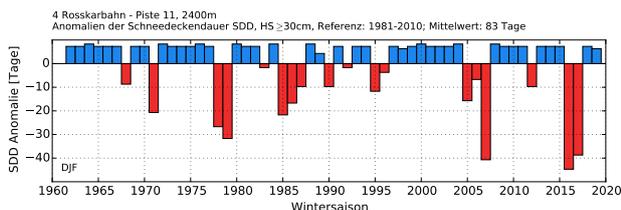
maximale Gesamtschneehöhe

maximale Gesamtschneehöhe



Schneedeckendauer, HS ≥ 30 cm

Schneedeckendauer, HS ≥ 30 cm



Schneedeckendauer, HS ≥ 50 cm

Schneedeckendauer, HS ≥ 50 cm

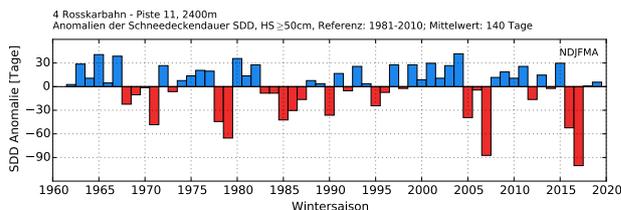
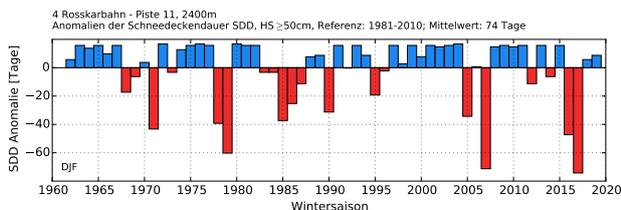


Abbildung 13: Anomalien (Abweichungen vom 30-Jährigen Mittelwert) der saisonalen Schneelindikatoren (Naturschnee) für den Punkt 4 Rosskarbahn (2400 m). Die 30-Jährige Referenzperiode ist 1981 bis 2010. Linke Spalte: Wintersaison DJF; rechte Spalte: Wintersaison NDJFMA.

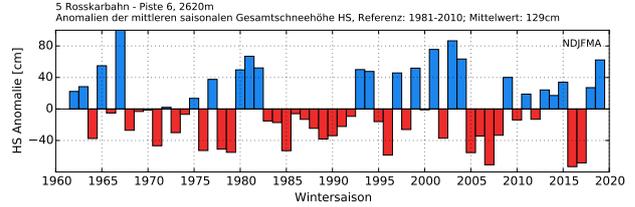
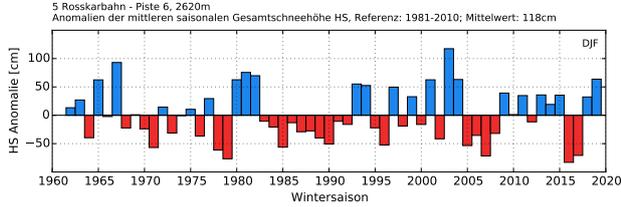
5 Rosskarbahn - Piste 6 (2620 m)

DJF

NDJFMA

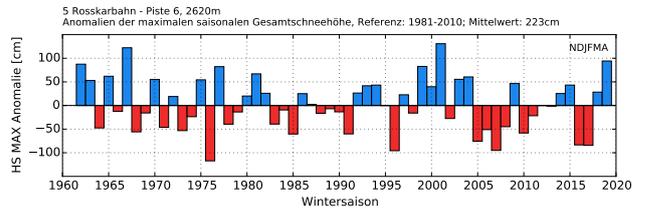
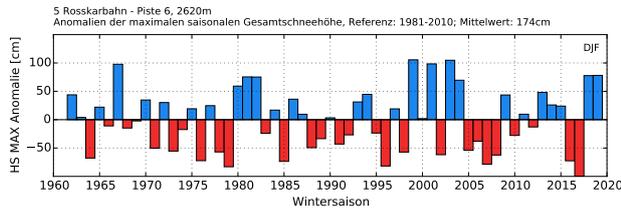
mittlere Gesamtschneehöhe

mittlere Gesamtschneehöhe



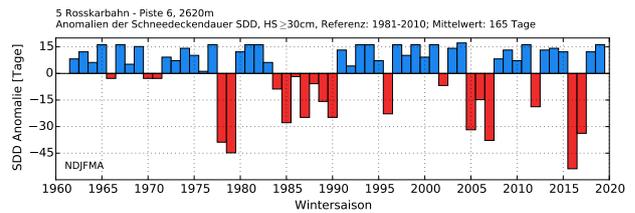
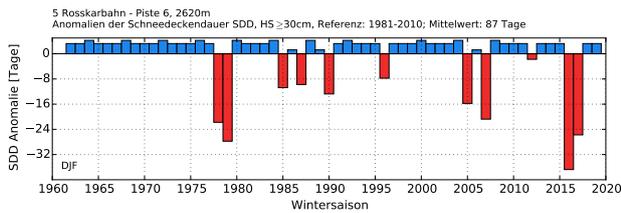
maximale Gesamtschneehöhe

maximale Gesamtschneehöhe



Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm

Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm



Schneedeckendauer, $HS \geq 50$ cm

Schneedeckendauer, $HS \geq 50$ cm

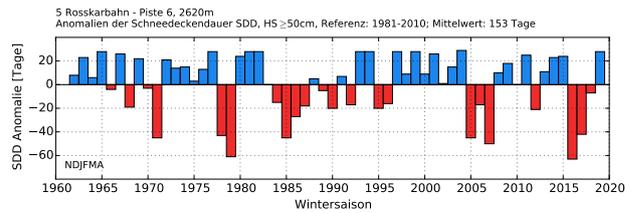
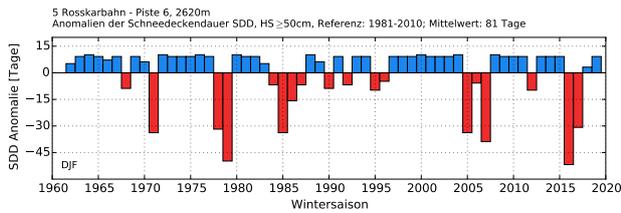


Abbildung 14: Anomalien (Abweichungen vom 30-jährigen Mittelwert) der saisonalen Schneeeindikatoren (Naturschnee) für den Punkt 5 Rosskarbahn (2620 m). Die 30-jährige Referenzperiode ist 1981 bis 2010. Linke Spalte: Wintersaison DJF; rechte Spalte: Wintersaison NDJFMA.

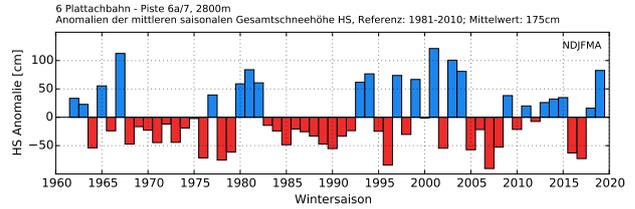
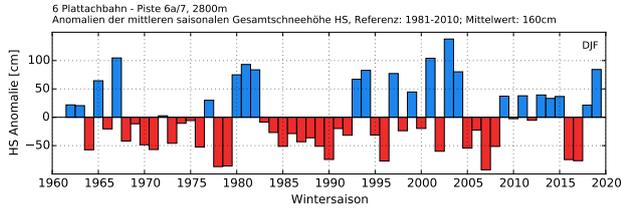
6 Plattachbahn - Piste 6a/7 (2800 m)

DJF

NDJFMA

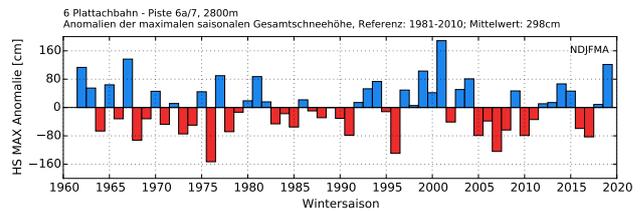
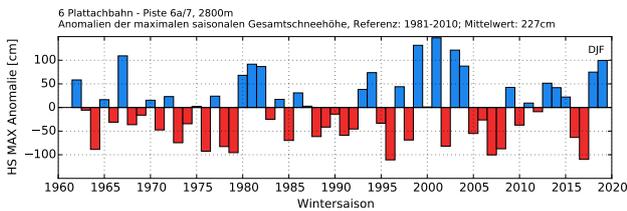
mittlere Gesamtschneehöhe

mittlere Gesamtschneehöhe



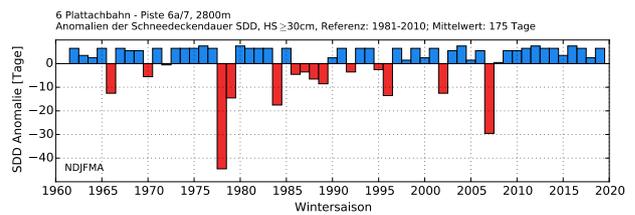
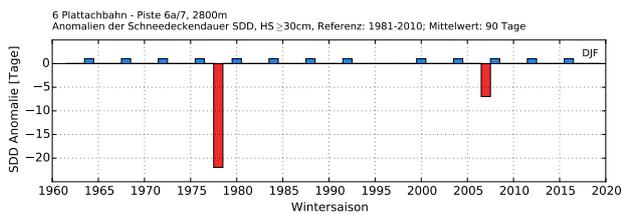
maximale Gesamtschneehöhe

maximale Gesamtschneehöhe



Schneedeckendauer, HS \geq 30 cm

Schneedeckendauer, HS \geq 30 cm



Schneedeckendauer, HS \geq 50 cm

Schneedeckendauer, HS \geq 50 cm

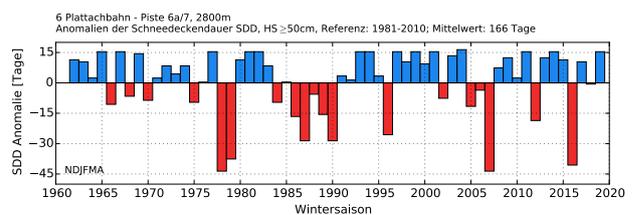
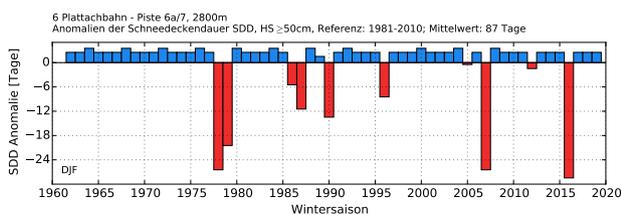


Abbildung 15: Anomalien (Abweichungen vom 30-Jährigen Mittelwert) der saisonalen Schneeeindikatoren (Naturschnee) für den Punkt 6 Plattachbahn (2800 m). Die 30-Jährige Referenzperiode ist 1981 bis 2010. Linke Spalte: Wintersaison DJF; rechte Spalte: Wintersaison NDJFMA.

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 16 zeigt die modellierte saisonale (NDJFMA) Schneedeckendauer unter Berücksichtigung von Naturschnee und technischem Schnee an den sechs ausgewählten Punkten im Skigebiet. Der Schwellwert der Schneehöhe für die Berechnung der Schneedeckendauer ist 30 cm. Der Linienvorlauf für Naturschnee (blau) am tiefsten Punkt Hohe Mut Bahn I zeigt eine deutliche Tendenz hin zu niedrigen Werten. Hierbei ist die Abnahme ab Ende der 1980er Jahre gut erkennbar. Deutlich wird, dass mit Hilfe der technischen Schneeproduktion (grüne Linien) die Schneedeckendauer allgemein erhöht wird, vor allem in den schneeärmeren Wintersaisons. Dieser positive Effekt ist auch in den Wintersaisons um 2016 erkennbar, in denen die Schneedeckendauer im Allgemeinen sehr unterdurchschnittlich war. In Höhenlagen unterhalb von ca. 2200 m wird zwar die Schneedeckendauer erhöht, der abnehmende Verlauf bleibt dennoch leicht erhalten. An den höheren Punkten führt die technische Schneeproduktion zu einer Stabilisierung der Schneedeckendauer. Der positive Einfluss der künstlichen Beschneigung ist somit in allen Höhenlagen und Expositionen gut ersichtlich. Allgemein führt auch die technische Schneeproduktion zu einer gedämpften Jahr-zu-Jahr Variabilität.

Schneedeckendauer: Naturschnee plus technischer Schnee

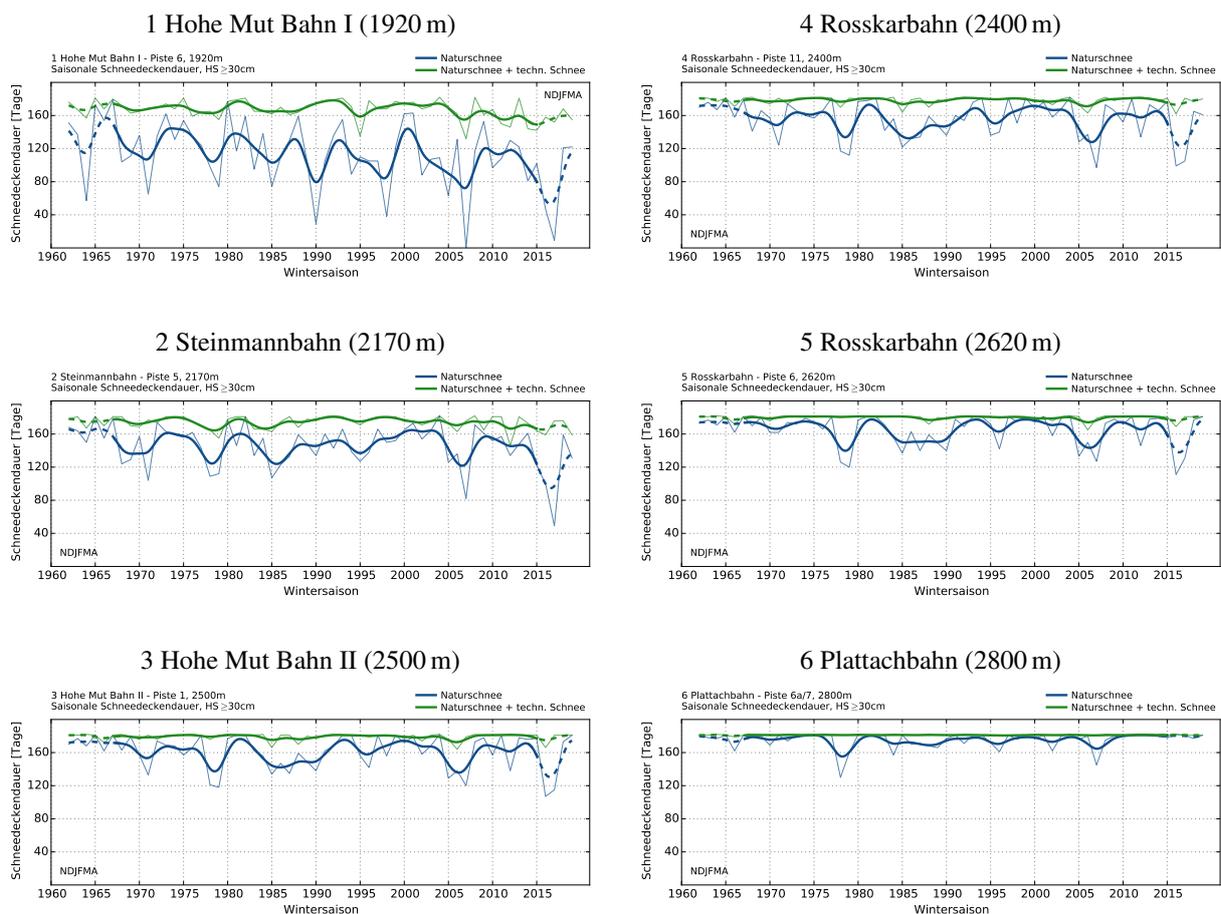
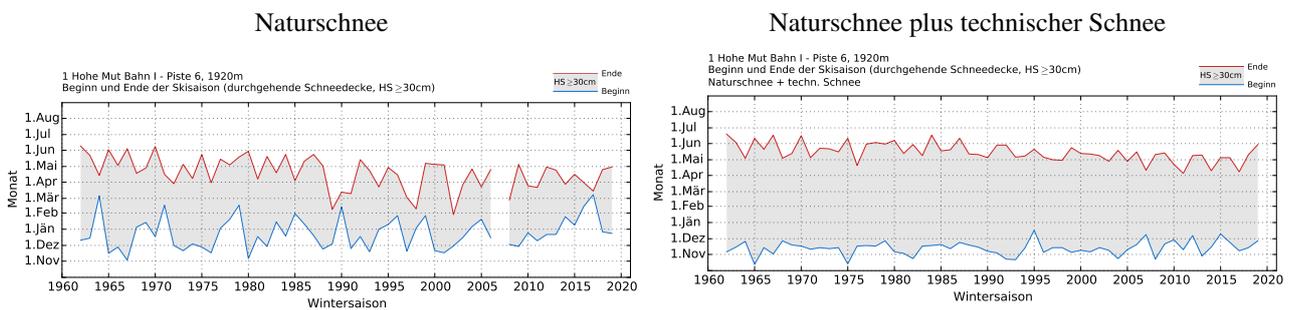


Abbildung 16: Modellerte saisonale (NDJFMA) Schneedeckendauer. Der Schwellwert der Schneehöhe HS beträgt 30 cm. Blau: Naturschnee; Grün: Naturschnee plus technischer Schnee. Fette Linien: Gauss-Tiefpassfilter mit einer Fensterbreite von 11 Jahren.

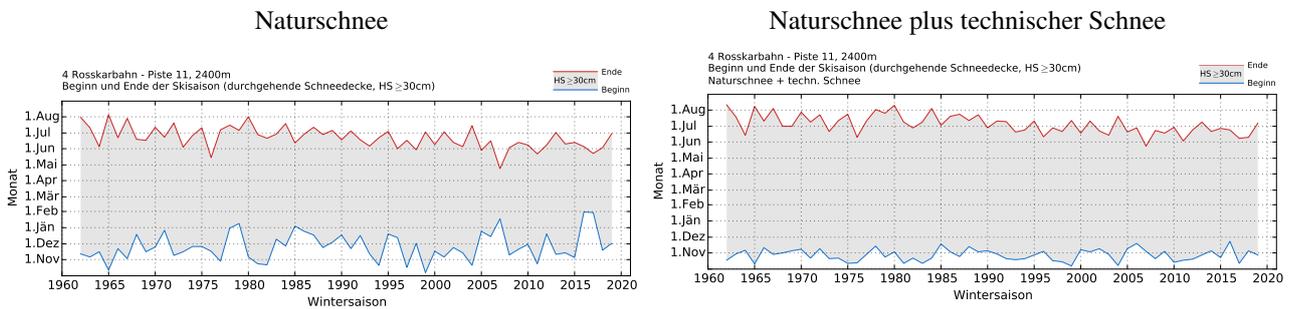
Der Beginn der Skisaison (Naturschnee) im Skigebiet zeigt seit der Wintersaison 1962 eine hohe Jahr-zu-Jahr Variabilität (Abbildung 17). Ein deutlicher Trend ist nicht erkennbar. Einzig in Lagen unterhalb von 2000 m Seehöhe hat sich der Beginn seit den 2005er Jahren nach hinten verschoben (rote Linien). Im Vergleich dazu ist in allen Seehöhen das Saisonende seit Ende der 1980er Jahre früher eingetreten. Die Saisonen (Naturschnee) sind folglich kürzer geworden (Abbildung 17, linke Spalte). Mit Hilfe der technischen Beschneigung kann die Skisaison früher starten (Abbildung 17, rechte Spalte). Dies wird vor allem in Lagen unterhalb von 2400 m Seehöhe deutlich. 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 Hohe Mut Bahn I (1920 m)



4 Rosskarbahn (2400 m)



5 Rosskarbahn (2620 m)

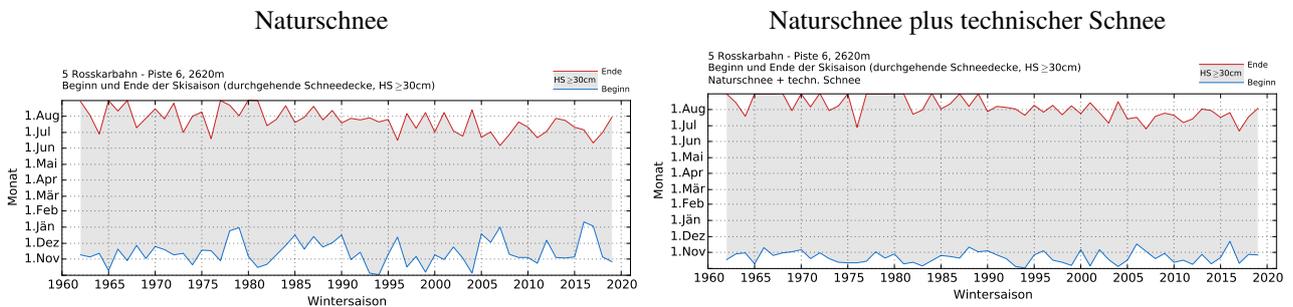


Abbildung 17: Beginn und Ende der Skisaison (durchgehend geschlossene Schneedecke mit einer mittleren Gesamtschneehöhe HS \geq 30 cm, innerhalb des Bezugszeitraumes 1. Oktober bis 31. August) für die Punkte 1, 4 und 5. Linke Spalte: Naturschnee; Rechte Spalte: Naturschnee plus technischer Schnee; Blau: 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 18 und 19 zeigen die möglichen Beschneistunden für die Punkte Hohe Mut Bahn I in 1920 m und Rosskarbahn in 2400 m sowie 2620 m Seehöhe, bezüglich unterschiedlicher Schwellwerte von T_f und Zeitperioden. Die Schwellwerte von T_f betragen -2°C , -4°C und -6°C , und die Perioden umfassen die Zeitfenster 10. Oktober bis 15. Dezember, 10. Oktober bis 6. Jänner und 10. Oktober bis 31. Jänner. Innerhalb dieser Zeitfenster werden die Stunden gezählt, an denen T_f kleiner oder gleich dem jeweiligen Schwellwert ist.

Am Punkt Hohe Mut Bahn I in 1920 m Seehöhe ist die Anzahl der möglichen Beschneistunden für alle T_f -Schwellwerte und für alle Zeitperioden seit den 1980er Jahren zurückgegangen. Dies ist auch für die höher gelegenen Punkte Rosskarbahn in 2400 m und 2620 m Seehöhe gültig. 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 2016 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.

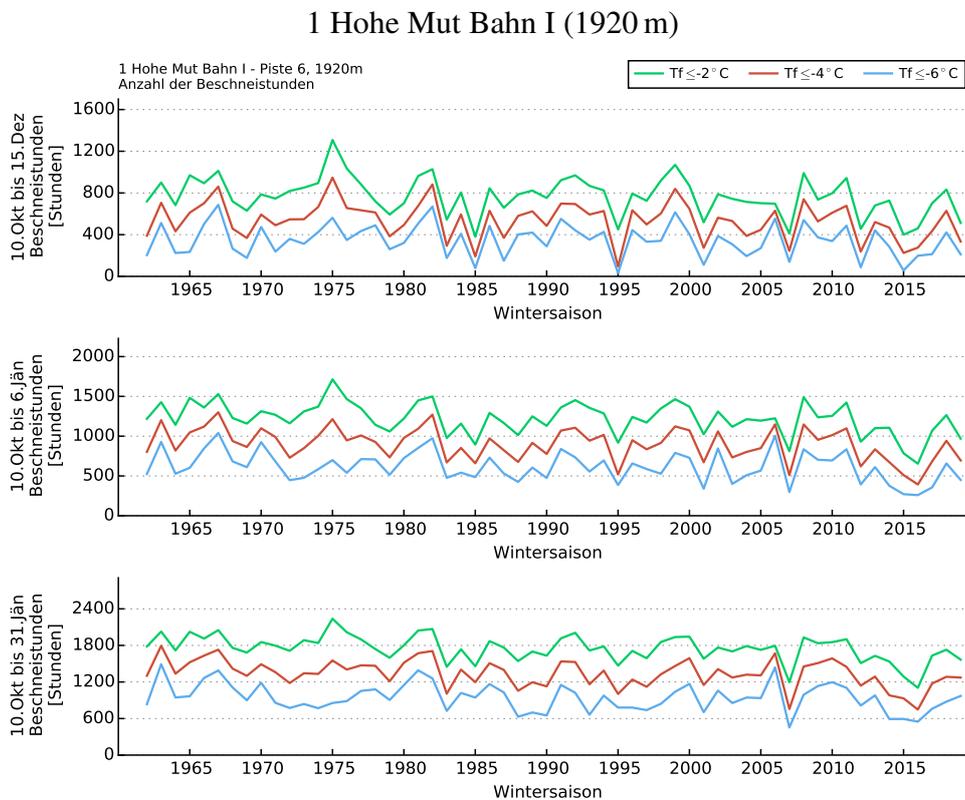


Abbildung 18: Anzahl der möglichen Beschneistunden bezüglich unterschiedlicher Perioden und Schwellwerte der Feuchtkugeltemperatur T_f für den Punkt 1 Hohe Mut Bahn I (1920 m).

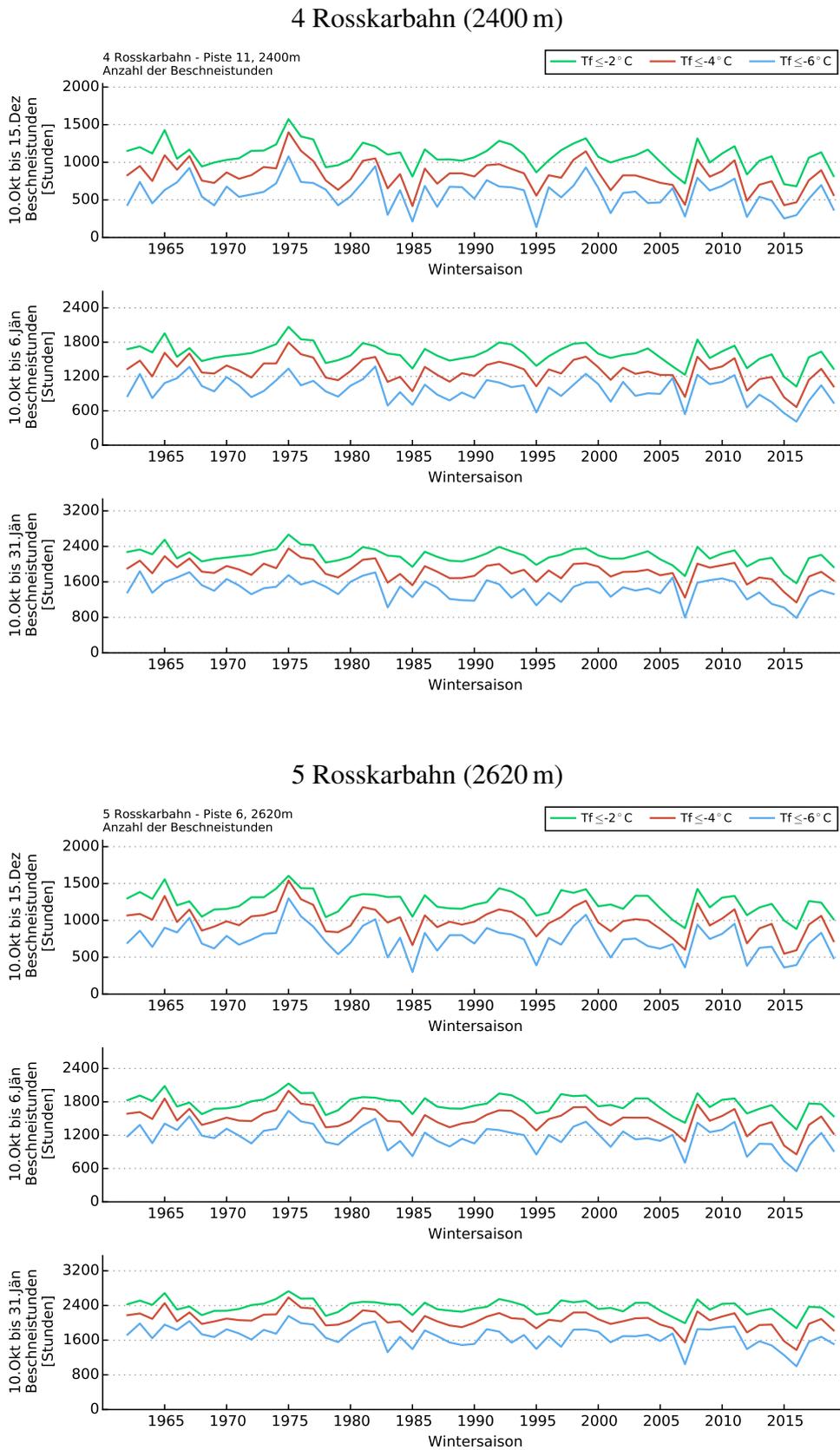


Abbildung 19: Anzahl der möglichen Beschneistunden bezüglich unterschiedlicher Perioden und Schwellwerte der Feuchtkugeltemperatur T_f für die Punkte Rosskarbahn 4 und 5 in 2400 m und 2620 m.

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 5 Rosskarbahn (2620 m) präsentiert. Die Erkenntnisse lassen sich auf die anderen Punkte übertragen. 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 20 und 21 zeigen stellvertretend für das Skigebiet die Resultate der MASH-Analyse für Niederschlag und Temperatur am Punkt 5 Rosskarbahn (2620 m). An den anderen Punkten nehmen die Strukturen der MASH-Analyse eine vergleichbare Form an. Auffällig ist die hohe Variabilität der Niederschlagssumme (Abbildung 20), welche keine eindeutige Aussage über einen Trend innerhalb der Wintersaison zulässt. Vielmehr wechseln sich trockene und feuchte Episoden ab. Auffallend ist jedoch, dass seit Beginn der 1990er Jahre die Monate Oktober und November 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 21).

Die einzelnen 5-Jahres Horizonte der Niederschlagssumme (Summen) und der Temperatur (Mittelungen) werden in Abbildung 22 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. Im Allgemeinen weist die Niederschlagssumme (Abbildung 22, oben) in den Wintermonaten ein Minimum auf. Die hohe Variabilität des Niederschlags ist hierbei gut erkennbar. Seit Beginn der 1990er Jahre gab es jedoch im Oktober und November überdurchschnittlich viel Niederschlag (orange und rot gefärbte Linienverläufe). In den letzten Wintersaisons war auch 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 21, unten). Ein ähnliches Bild ergibt sich für die anderen Punkte im Skigebiet (hier nicht gezeigt).

Zusammenfassend kann für die Wintersaison gesagt werden, dass es seit 1962 keine eindeutigen, langfristigen Änderungen in der täglichen Niederschlagssumme gibt. Vielmehr wechseln sich trockene und feuchte Perioden ab. Dennoch lässt sich sagen, dass ab den 1990er Jahren die Niederschlagssumme im Oktober und November 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 (unterhalb von 2000 m Seehöhe) zu einer Verkürzung der Wintersaison (Naturschnee) führen (verzögertes Einschneien und früheres Ausapern).

5 Rosskarbahn (2620 m)

Niederschlagssumme

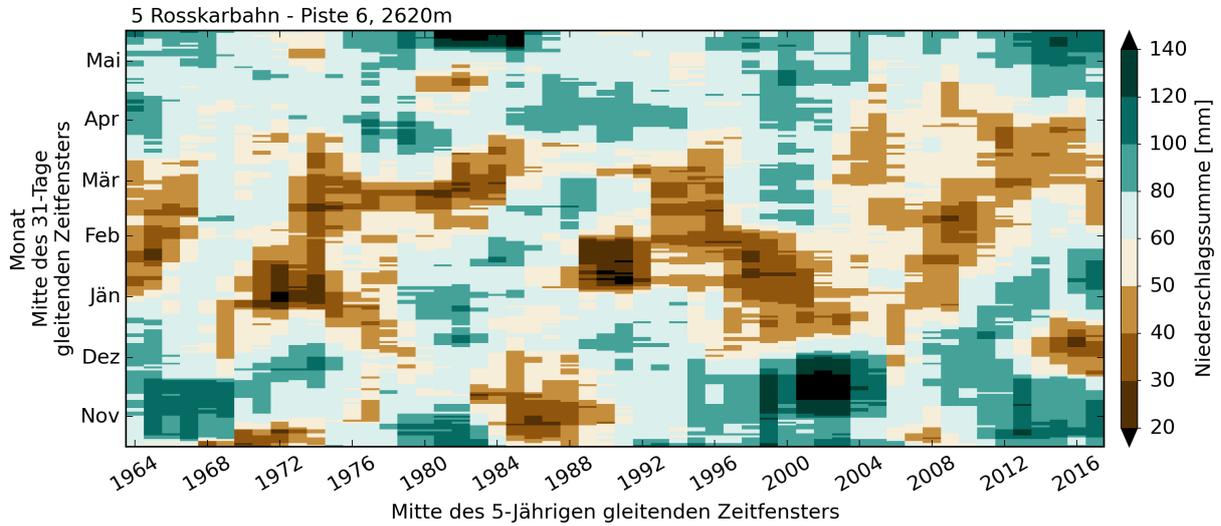


Abbildung 20: MASH-Analyse: tägliche Niederschlagssumme am Punkt 5 Rosskarbahn (2620 m). Auf der Ordinate sind die Zeitreihen gleitend über 31 Tage summiert, auf der Abszisse gleitend über 5 Jahre gemittelt.

Temperatur

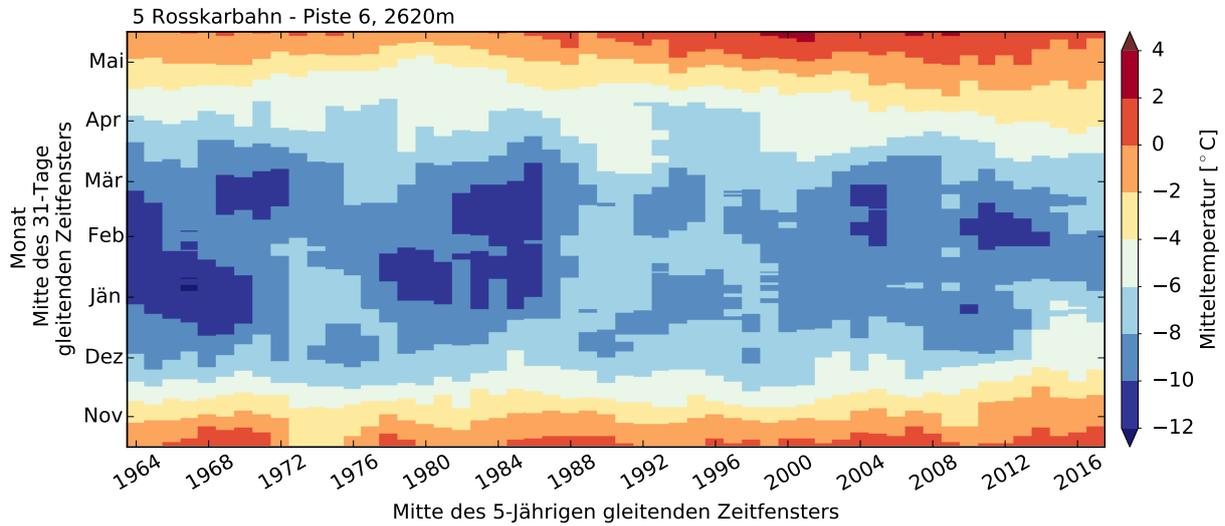


Abbildung 21: MASH-Analyse: Tagesmitteltemperatur am Punkt 5 Rosskarbahn (2620 m). Auf der Ordinate sind die Zeitreihen gleitend über 31 Tage gemittelt, auf der Abszisse gleitend über 5 Jahre.

5 Rosskarbahn (2620 m)

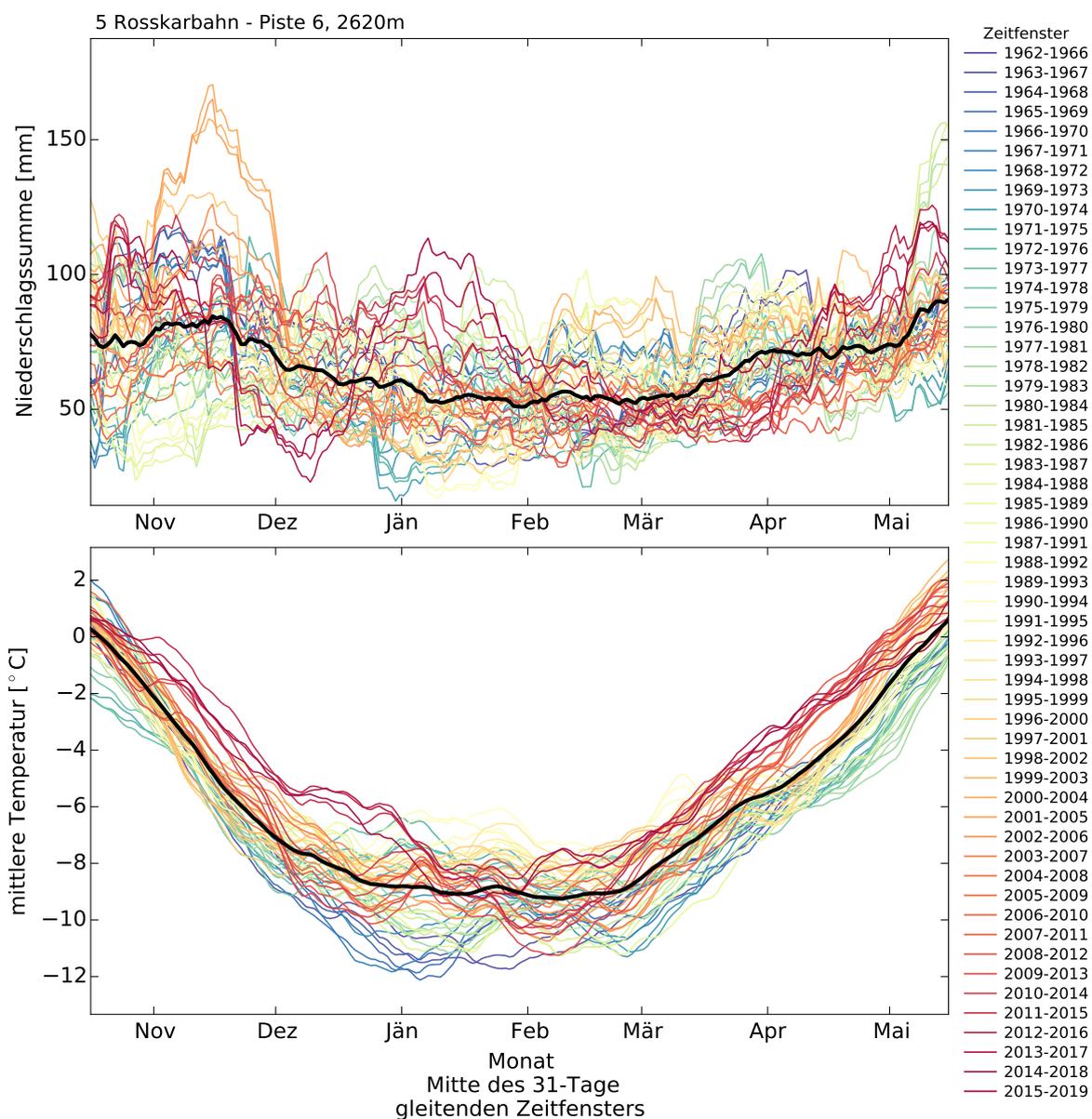


Abbildung 22: Resultat der MASH-Analyse (tägliche Niederschlagssumme, oben und Tagesmitteltemperatur, unten) am Punkt 5 Rosskarbahn (2620 m). Dargestellt ist die Variabilität der einzelnen 5-Jahres Horizonte. Die schwarze Linie ist der Mittelwert über alle Horizonte.

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).

Abbildungen 23 und 24 zeigen die mittleren monatlichen Abweichungen an den 6 Punkten im Skigebiet Obergurgl. Die Niederschlagssumme (obere Reihe) zeigt an allen Punkten in den Monaten Dezember, Jänner, Februar und April keine oder nur eine leichte Änderung (0 bis -10% Änderung) in der Periode 1991 bis 2019 (negative Abweichungen). Im Gegensatz dazu hat die Niederschlagssumme im Oktober und November deutlich zugenommen (bis zu 40% Zunahme im Oktober an den höher gelegenen Punkten). Die größten Änderungen in der Mitteltemperatur (zweite Reihe von oben) gibt es in den Monaten März/April bis August (Zunahme von über 1,5°C), die geringsten im September und Oktober. In der Periode 1991 bis 2019 hat auch die Temperatur in den Wintermonaten November bis März um ca. 1°C zugenommen im Vergleich zu 1962 bis 1990.

Die mittlere monatliche Schneehöhe (zweite Reihe von unten) hat an den Punkten unterhalb von 2200 m Seehöhe (Hohe Mut Bahn I und Steinmannbahn) in den Monaten November bis April abgenommen. An den höher gelegenen Punkten ist vor allem im April eine Abnahme beobachtbar (Temperaturerhöhung im April), von November bis März meist eine Zunahme.

Die Schneedeckendauer ($SH \geq 30$ cm, untere Reihe) hat in der Periode 1991 bis 2019 grundsätzlich in den tiefen Lagen im Skigebiet abgenommen, wobei die jeweiligen Abnahmen unterschiedlich ausfallen. An den höher gelegenen Punkten sind die Änderungen sehr gering ausgeprägt, wobei oberhalb von 2200 m Seehöhe eine Zunahme im November feststellbar ist (Zunahme von bis zu 3 Tagen). Am Punkt Hohe Mut Bahn I in 1920 m Seehöhe beträgt die Abnahme im März und April bis zu 8 Tage. Ein Grund ist die beobachtete Temperaturerhöhung im Spätwinter. Dies deutet auch darauf hin, dass die Temperatur in diesen Seehöhen der entscheidende Faktor ist. Die Verläufe der monatlichen Änderungen verdeutlichen die temperaturbedingte Höhenabhängigkeit der Änderungen (siehe auch Tabelle 3).

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

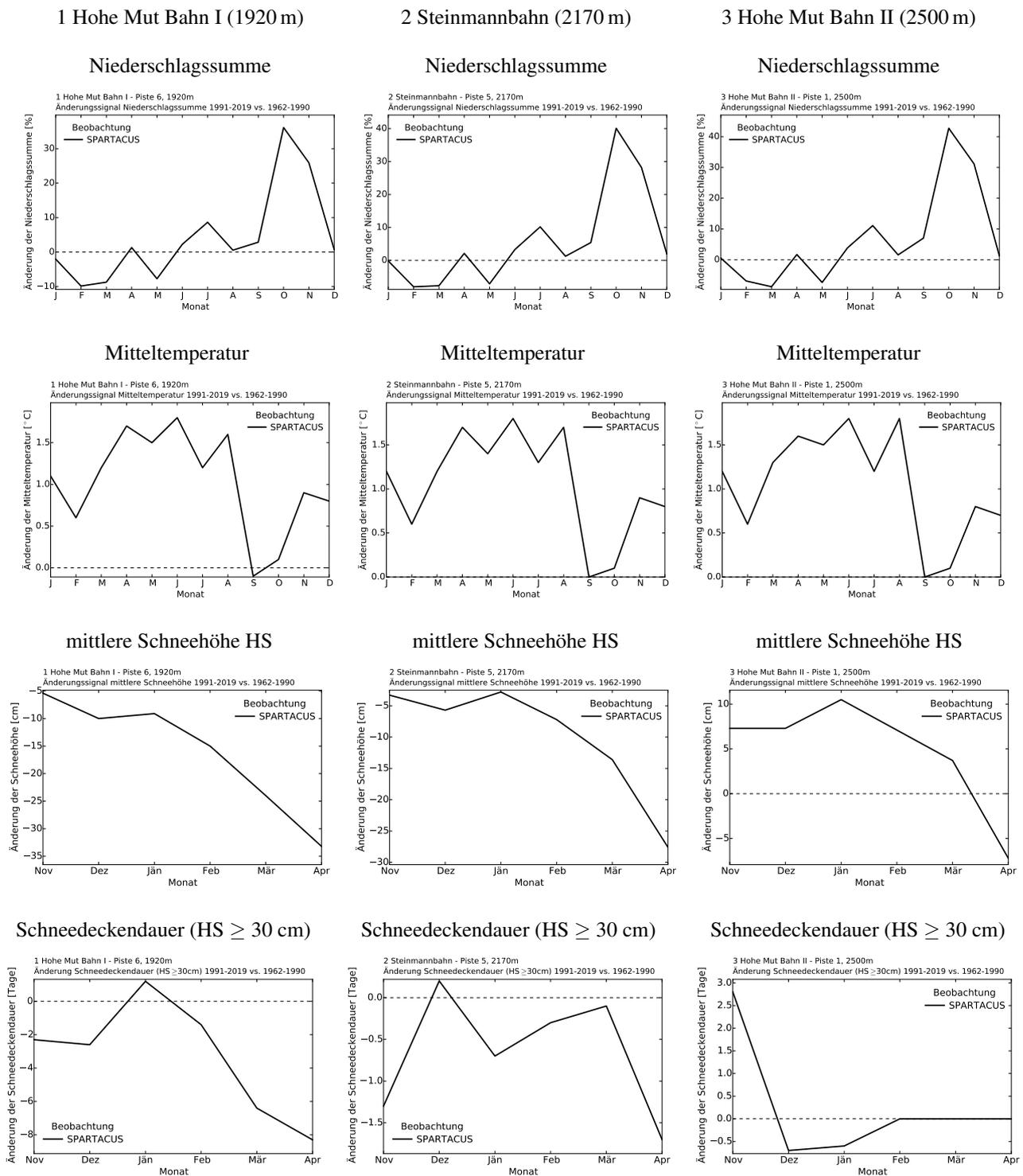


Abbildung 23: Vergleich zweier klimatologischer Zeitperioden: Änderung der mittleren monatlichen Niederschlagssumme, Mitteltemperatur, Gesamtschneehöhe und Schneedeckendauer (beides Naturschnee) zwischen 1991 bis 2019 und 1962 bis 1990 an den Punkten Hohe Mut Bahn I (links), Steinmannbahn (Mitte) und Hohe Mut Bahn II (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.

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

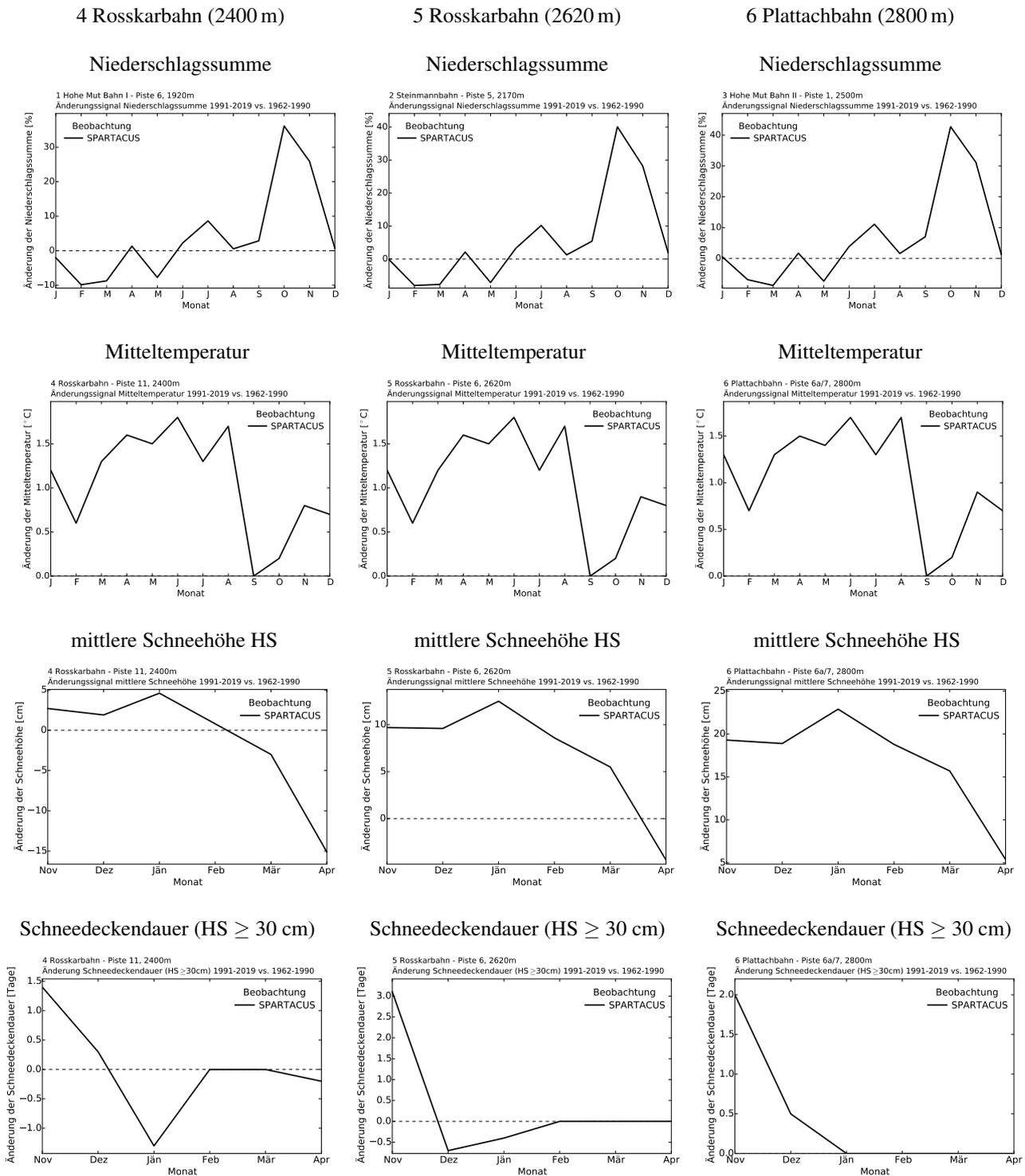


Abbildung 24: Vergleich zweier klimatologischer Zeitperioden: Änderung der mittleren monatlichen Niederschlagssumme, Mitteltemperatur, Gesamtschneehöhe und Schneedeckendauer (beides Naturschnee) zwischen 1991 bis 2019 und 1962 bis 1990 an den Punkten Rosskarbahn (links und Mitte) und Plattachbahn (rechts). 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 den höheren Lagen

Innerhalb der Periode 1991 bis 2019 hat die monatliche Niederschlagssumme (gegitterter Beobachtungsdatensatz SPARTACUS) im Oktober und November zwischen 25 und 40% zugenommen, im Vergleich zur Periode 1962 bis 1990. Aufgrund der tiefen Temperaturen in den höheren Lagen kann davon ausgegangen werden, dass der Niederschlag meist in fester Form niedergegangen ist. Abbildung 26 zeigt die zeitlichen Verläufe der monatlichen Niederschlagssummen am höchsten Punkt 6 Plattachbahn in 2800 m Seehöhe. Die Zeitreihen weisen keine statistische Signifikanz auf innerhalb der Zeitperiode 1962 bis 2019. Die Niederschlagssumme hat sich in den Monaten November bis April langfristig nur wenig geändert (gestrichelte orange Linien). Im Vergleich dazu ist im Oktober eine Tendenz hin zu höheren Niederschlagssummen erkennbar. Vor allem seit den 1990er Jahren gab es in den Monaten Oktober und November höhere Niederschlagssummen. Diese niederschlagsreicheren Monate in der Periode 1991 bis 2019 führten augenscheinlich zu den höheren saisonalen Schneehöhen in Lagen oberhalb von 2200 m Seehöhe (Abbildung 27).

In Abbildung 28 sind Totalisator-Niederschlagsmessungen im Gebiet um den Sonnblick dargestellt (siehe auch Leidinger, 2013). Bei den zeitlichen Verläufen handelt sich um über die Monate Oktober und November summierten Niederschlagsmengen. Auch hier sind neben der hohen Jahr-zu-Jahr Variabilität ebenfalls dekadische Schwankungen feststellbar. Die Totalisatormessungen sind aufgrund der bekannten Einflüsse im Hochgebirge (Schnee, Wind) mit großen Unsicherheiten behaftet. Dennoch sind seit den 1960er Jahren größere Niederschlagssummen in den 1990ern und 2000ern ersichtlich. Für die Monate Dezember, Jänner und Februar ist dieser Verlauf nicht eindeutig erkennbar (hier nicht gezeigt).

Abbildung 29 zeigt die historischen Schneepegelmessungen am Sonnblick gültig für den 1. Mai. Zusätzlich ist die mittels SNOWGRID-CL modellierte maximale Gesamtschneehöhe am 1. Mai für Punkt 6 Plattachbahn (2800 m) dargestellt (schwarzer Linienverlauf). Unter der Annahme, dass in alpinen Höhenlagen am Nordrand der Alpen sowie entlang des Alpenhauptkammes ähnliche klimatologische Rahmenbedingungen herrschen, sollten die Pegelmessungen vergleichbare zeitliche Verläufe zeigen wie die Modellergebnisse. Gut zu erkennen ist, dass die Schneepegelmessungen und die maximale Gesamtschneehöhe am Punkt 6 ähnliche dekadische Schwankungen aufweisen. Auch ist die Jahr-zu-Jahr Variabilität vergleichbar. Diese Tatsache untermauert die Aussagekraft der Modellergebnisse. Die größeren Niederschlagssummen im Herbst sind somit ein Indiz, dass mit einer im Mittel höheren Gesamtschneehöhe in den Winter gestartet wurde. Eine Erklärung für die größeren Niederschlagssummen ist, dass in den letzten Dekaden das Auftreten von Tiefdruckgebieten über dem gesamten Meditterrianen Gebiet in den Herbstmonaten zugenommen hat (Flocas et al., 2010).



Abbildung 25: Niederschlagsmessung im Hochgebirge: Totalisatoren im Sonnblick Gebiet (Leidinger, 2013).

9.1.7 Schneedeckenzuwachs in den höheren Lagen

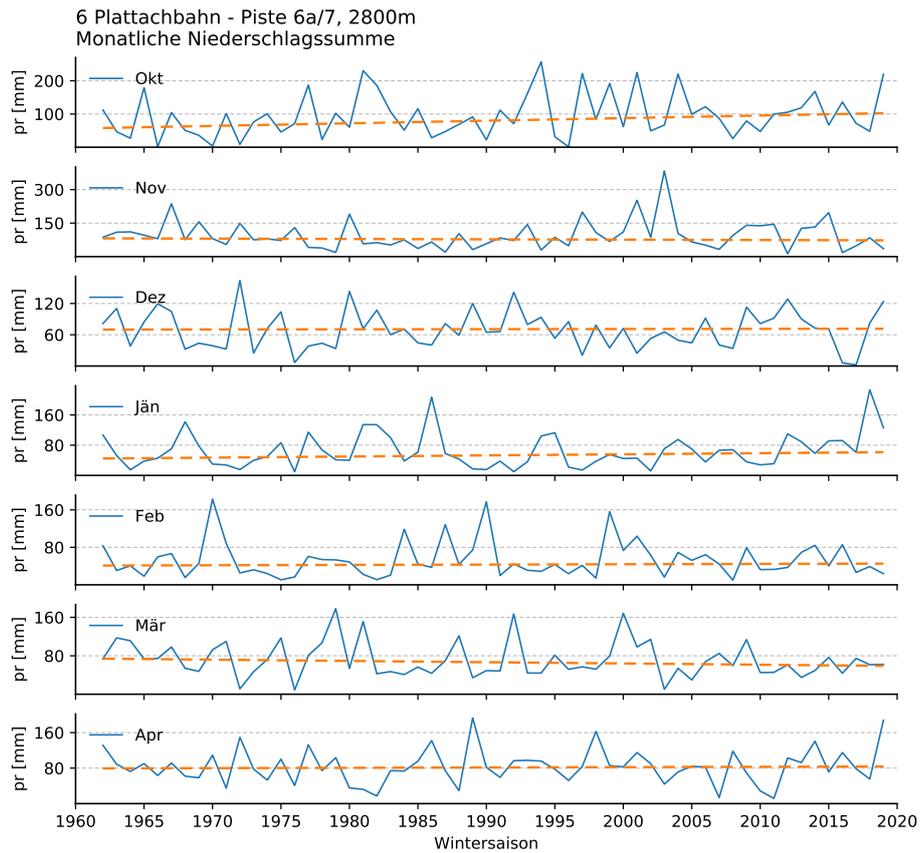


Abbildung 26: Monatliche (Oktober bis April) Niederschlagssummen am Punkt 6 Plattachbahn (2800 m) für die Periode 1962 bis 2019. Die orangenen Linien stellen einen linearen Fit dar (Sen Ausgleichsgerade). Existiert in den monatlichen Verläufen ein signifikanter Trend bezüglich eines 95% Konfidenzniveaus (Mann-Kendall Trendstatistik), so wird die lineare Ausgleichsgerade durchgezogen dargestellt, sonst gestrichelt. Die Niederschlagssummen basieren auf den gegitterten SPARTACUS Beobachtungsdatensatz.

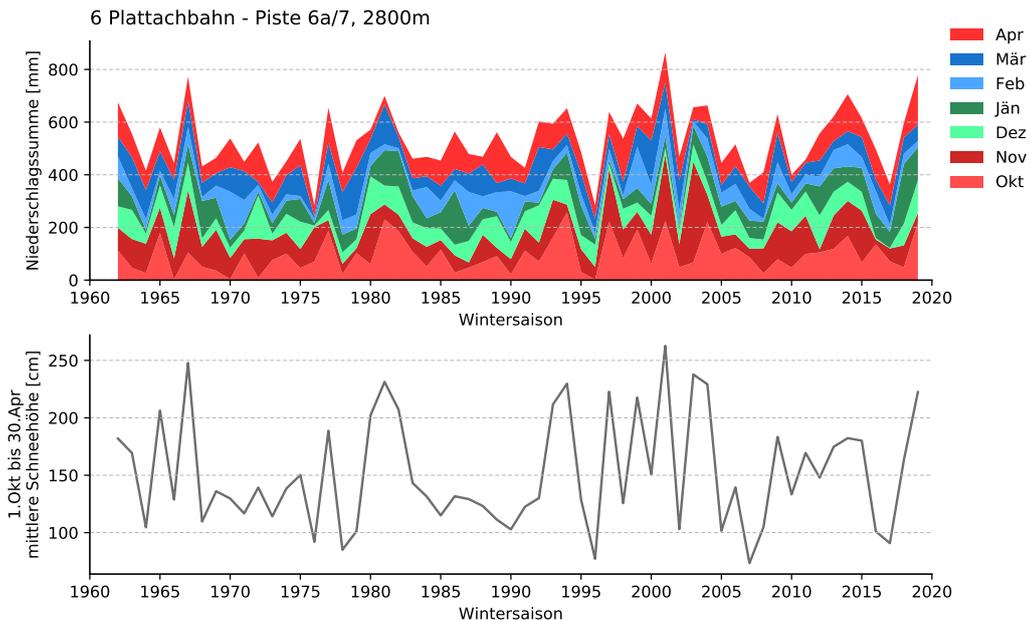


Abbildung 27: Akkumulierte monatliche (Oktober bis April) Niederschlagssumme (oben, SPARTACUS) und modellier- te mittlere Gesamtschneehöhe (1. Oktober bis 30. April, SNOWGRID-CL) am Punkt 6 Plattachbahn (2800 m) für die Periode 1962 bis 2019.

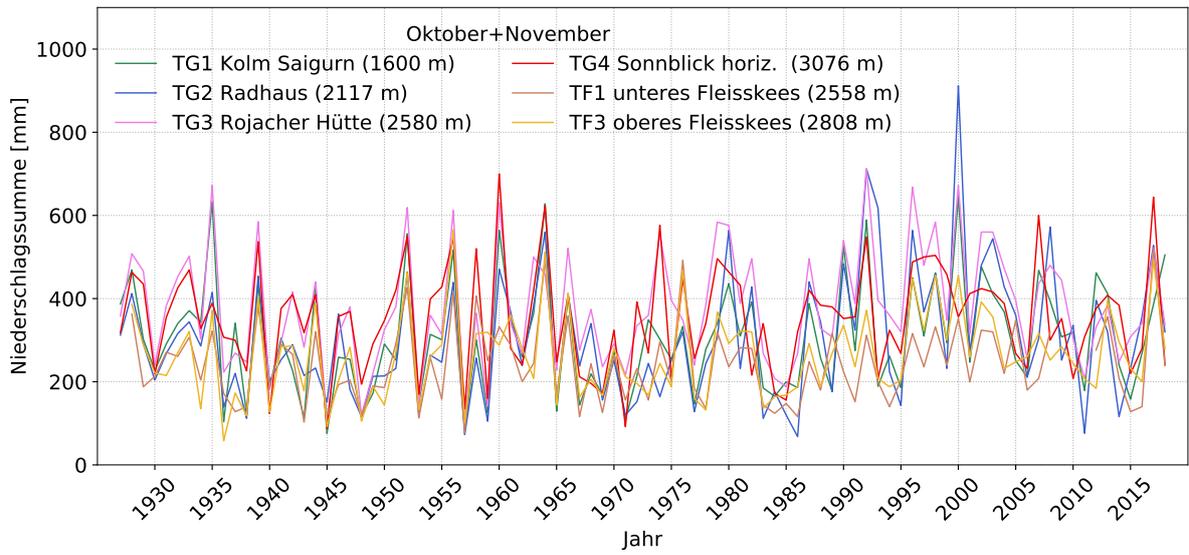


Abbildung 28: Totalisator Messungen: Niederschlagssumme (Oktober+November) an Messstellen im Sonnblick-Gebiet.

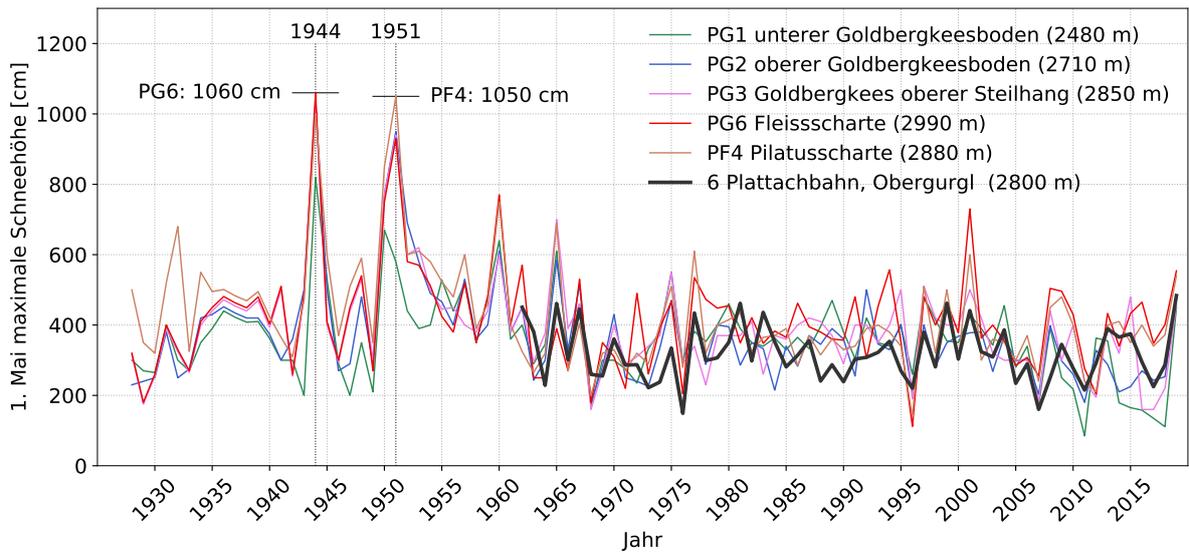


Abbildung 29: Schneepegelmessungen: Maximale Gesamtschneehöhe-Pegelmessungen am 1. Mai des jeweiligen Jahres am Sonnblick seit 1928. Die mittels SNOWGRID-CL modellierte maximale Gesamtschneehöhe am 1. Mai für Punkt 6 Plattachbahn (2800 m) in Obergurgl ist in schwarz dargestellt.

9.1.8 Änderungen in der Vergangenheit: Signifikanzprüfung

Unter Verwendung des rangbasierten, nicht-parametrischen statistischen Mann-Whitney-U Tests (Mann and Whitney, 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 (NDJFMA) Niederschlagssumme und Mitteltemperatur. Die Perioden sind für die Niederschlagssumme nicht signifikant unterschiedlich, wobei eine schwache Zunahme von 2% in der Periode 1991 bis 2019 ersichtlich ist (Tabelle 4). Die Niederschlagssumme weist somit keine deutliche Änderung auf. Die Zunahme von bis zu 1,1°C in der winterlichen Mitteltemperatur ist an allen Punkten im Skigebiet signifikant ((Tabelle 5).

Der Vergleich der zwei Perioden zeigt, dass die mittlere Gesamtschneehöhe und Schneedeckendauer (beides Naturschnee) im Skigebiet in Lagen unterhalb von 2400 m Seehöhe tendenziell abgenommen hat (Tabellen 6, 7 und 8), wobei die Abnahmen in Lagen unterhalb von ca. 2000 m Seehöhe am stärksten sind (Punkt 1 Hohe Mut Bahn I). An diesem Punkt hat z.B. die Schneedeckendauer ($HS \geq 30$ cm) um 20 Tage abgenommen. Eine Zunahme der Gesamtschneehöhe und Schneedeckendauer ist in Lagen oberhalb von 2400 m ersichtlich. Die Gesamtschneehöhe hat hierbei um bis zu 10% zugenommen, die Schneedeckendauer ($HS \geq 30$ cm, Anzahl der Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 cm) um bis zu 3 Tage. Wird die technische Schneeproduktion berücksichtigt, so unterscheiden sich die zwei Perioden an allen Punkten nur geringfügig (Tabelle 9).

Die Änderung der Anzahl der möglichen Beschneigungsstunden ($Tf \leq -4^\circ\text{C}$) für die Periode 10. Oktober bis 15. Dezember beträgt zwischen -8 und -10% (Tabelle 10). Sowohl für das Beschneigungszeitfenster 10. Oktober bis 6. Jänner als auch für 10. Oktober bis 31. Jänner ((Tabellen 11 und 12) fallen die Änderungen etwas geringer aus (-5 bis -9%). Die Änderungen sind für alle Zeitfenster statistisch nicht signifikant. Die Abnahmen der möglichen Beschneigungsstunden sind mit der beobachteten Temperaturzunahme erklärbar.

Tabellen 13 und 14 zeigen die Änderungen bezüglich Beginn und Ende der Skisaison, 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 nur gering geändert hat. Im Vergleich dazu ist das Ende der Skisaison zwischen 6 und 24 Tage früher eingetreten, wobei die Änderungen in Lagen bis 2600 m Seehöhe am stärksten sind.

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: NDJFMA.

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [mm]	Δ [%]	Sig
					1962-1990 [mm]	1991-2019 [mm]			
Plattachbahn - Piste 6a/7	6	2800	NW	20	433,2	443,9	10,7	2	
Rosskarbahn - Piste 6	5	2620	NW	20	372,9	380,1	7,2	2	
Rosskarbahn - Piste 11	4	2400	NW	25	348,6	356,2	7,6	2	
Hohe Mut Bahn II - Piste 1	3	2500	NW	20	376,1	385,4	9,3	2	
Steinmannbahn - Piste 5	2	2170	NW	20	369,5	378,4	8,9	2	
Hohe Mut Bahn I - Piste 6	1	1920	NW	15	357,2	363,6	6,4	2	

Tagesmitteltemperatur

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

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	Mittelwert			Sig
					1962-1990 [°C]	1991-2019 [°C]	Δ [°C]	
Plattachbahn - Piste 6a/7	6	2800	NW	20	-9,0	-8,0	1,0	
Rosskarbahn - Piste 6	5	2620	NW	20	-7,6	-6,5	1,1	
Rosskarbahn - Piste 11	4	2400	NW	25	-6,0	-5,0	1,0	
Hohe Mut Bahn II - Piste 1	3	2500	NW	20	-6,8	-5,7	1,1	
Steinmannbahn - Piste 5	2	2170	NW	20	-4,5	-3,4	1,1	
Hohe Mut Bahn I - Piste 6	1	1920	NW	15	-2,9	-1,8	1,1	

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: NDJFMA.

Perioden Name	ID	Höhe [m]	Exp. [°]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [cm]	Δ [%]	Sig
					1962-1990 [cm]	1991-2019 [cm]			
Plattachbahn - Piste 6a/7	6	2800	NW	20	164,5	181,4	16,9	10	
Rosskarbahn - Piste 6	5	2620	NW	20	125,4	132,4	7,0	6	
Rosskarbahn - Piste 11	4	2400	NW	25	98,2	96,9	-1,3	-1	
Hohe Mut Bahn II - Piste 1	3	2500	NW	20	115,7	120,5	4,8	4	
Steinmannbahn - Piste 5	2	2170	NW	20	84,9	74,9	-10,0	-12	
Hohe Mut Bahn I - Piste 6	1	1920	NW	15	55,8	39,7	-16,1	-29	

Schneedeckendauer, $HS \geq 1$ cm

Tabelle 7: Mittlere Schneedeckendauer, $HS \geq 1$ 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: NDJFMA.

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [Tage]	Δ [%]	Sig
					1962-1990 [Tage]	1991-2019 [Tage]			
Plattachbahn - Piste 6a/7	6	2800	NW	20	180,7	181,2	0,5	0	
Rosskarbahn - Piste 6	5	2620	NW	20	179,9	180,3	0,4	0	
Rosskarbahn - Piste 11	4	2400	NW	25	177,3	176,3	-1,0	-1	
Hohe Mut Bahn II - Piste 1	3	2500	NW	20	178,1	178,3	0,2	0	
Steinmannbahn - Piste 5	2	2170	NW	20	174,6	171,4	-3,2	-2	
Hohe Mut Bahn I - Piste 6	1	1920	NW	15	167,9	158,2	-9,7	-6	

Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm

Tabelle 8: Mittlere Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ 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: NDJFMA.

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [Tage]	Δ [%]	Sig
					1962-1990 [Tage]	1991-2019 [Tage]			
Plattachbahn - Piste 6a/7	6	2800	NW	20	174,3	176,8	2,5	1	
Rosskarbahn - Piste 6	5	2620	NW	20	164,3	166,5	2,2	1	
Rosskarbahn - Piste 11	4	2400	NW	25	155,8	156,0	0,2	0	
Hohe Mut Bahn II - Piste 1	3	2500	NW	20	160,1	161,7	1,6	1	
Steinmannbahn - Piste 5	2	2170	NW	20	147,8	143,7	-4,1	-3	
Hohe Mut Bahn I - Piste 6	1	1920	NW	15	123,2	103,3	-19,9	-16	

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

Tabelle 9: Mittlere Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ 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: NDJFMA.

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [Tage]	Δ [%]	Sig
					1962-1990 [Tage]	1991-2019 [Tage]			
Plattachbahn - Piste 6a/7	6	2800	NW	20	181,2	181,1	-0,1	0	
Rosskarbahn - Piste 6	5	2620	NW	20	180,2	179,7	-0,5	0	
Rosskarbahn - Piste 11	4	2400	NW	25	178,3	178,4	0,1	0	
Hohe Mut Bahn II - Piste 1	3	2500	NW	20	179,2	179,3	0,1	0	
Steinmannbahn - Piste 5	2	2170	NW	20	174,1	174,0	-0,1	0	
Hohe Mut Bahn I - Piste 6	1	1920	NW	15	169,1	164,7	-4,4	-3	

Anzahl der möglichen Beschneigungsstunden 10. Okt bis 15. Dez

Tabelle 10: Beschneigungsstunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$) im Zeitraum 10. Oktober 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]			
Plattachbahn - Piste 6a/7	6	2800	NW	20	1256,9	1160,9	-96,0	-8	
Rosskarbahn - Piste 6	5	2620	NW	20	1085,1	984,1	-101,0	-9	
Rosskarbahn - Piste 11	4	2400	NW	25	901,2	805,2	-96,0	-11	
Hohe Mut Bahn II - Piste 1	3	2500	NW	20	994,3	892,1	-102,2	-10	
Steinmannbahn - Piste 5	2	2170	NW	20	728,6	656,6	-72,0	-10	
Hohe Mut Bahn I - Piste 6	1	1920	NW	15	570,6	512,6	-58,0	-10	

Anzahl der möglichen Beschneigungsstunden 10. Okt bis 06. Jän

Tabelle 11: Beschneigungsstunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$) im Zeitraum 10. Oktober 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]			
Plattachbahn - Piste 6a/7	6	2800	NW	20	1703,6	1609,9	-93,7	-6	
Rosskarbahn - Piste 6	5	2620	NW	20	1534,0	1437,9	-96,1	-6	
Rosskarbahn - Piste 11	4	2400	NW	25	1339,5	1241,2	-98,3	-7	
Hohe Mut Bahn II - Piste 1	3	2500	NW	20	1438,9	1341,3	-97,6	-7	
Steinmannbahn - Piste 5	2	2170	NW	20	1141,9	1052,3	-89,6	-8	
Hohe Mut Bahn I - Piste 6	1	1920	NW	15	940,8	858,2	-82,6	-9	

Anzahl der möglichen Beschneigungsstunden 10. Okt bis 31. Jän

Tabelle 12: Beschneigungsstunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$) im Zeitraum 10. Oktober 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]			
Plattachbahn - Piste 6a/7	6	2800	NW	20	2297,6	2189,9	-107,7	-5	
Rosskarbahn - Piste 6	5	2620	NW	20	2119,0	1997,8	-121,2	-6	
Rosskarbahn - Piste 11	4	2400	NW	25	1901,1	1768,2	-132,9	-7	
Hohe Mut Bahn II - Piste 1	3	2500	NW	20	2014,6	1886,0	-128,6	-6	
Steinmannbahn - Piste 5	2	2170	NW	20	1660,0	1531,6	-128,4	-8	
Hohe Mut Bahn I - Piste 6	1	1920	NW	15	1401,4	1278,1	-123,3	-9	

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

Tabelle 13: Beginn 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.

Perioden Name	ID	Höhe [m]	Exp. [°]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [Tage]	Sig
					1962-1990 [-]	1991-2019 [-]		
Plattachbahn - Piste 6a/7	6	2800	NW	20	31. Okt	26. Okt	-5	■
Rosskarbahn - Piste 6	5	2620	NW	20	17. Nov	11. Nov	-6	
Rosskarbahn - Piste 11	4	2400	NW	25	26. Nov	26. Nov	0	
Hohe Mut Bahn II - Piste 1	3	2500	NW	20	21. Nov	17. Nov	-4	
Steinmannbahn - Piste 5	2	2170	NW	20	04. Dez	08. Dez	4	
Hohe Mut Bahn I - Piste 6	1	1920	NW	15	23. Dez	26. Dez	3	

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

Tabelle 14: 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.

Perioden Name	ID	Höhe [m]	Exp. [°]	Neig. [°]	Mittelwert		Δ [Tage]	Sig
					1962-1990 [-]	1991-2019 [-]		
Plattachbahn - Piste 6a/7	6	2800	NW	20	29. Aug	23. Aug	-6	■
Rosskarbahn - Piste 6	5	2620	NW	20	05. Aug	12. Jul	-24	
Rosskarbahn - Piste 11	4	2400	NW	25	02. Jul	12. Jun	-20	
Hohe Mut Bahn II - Piste 1	3	2500	NW	20	22. Jul	30. Jun	-22	
Steinmannbahn - Piste 5	2	2170	NW	20	05. Jun	17. Mai	-19	
Hohe Mut Bahn I - Piste 6	1	1920	NW	15	01. Mai	07. Apr	-24	

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. November und 30. April um 20 bis 136% erhöht wird, wobei an allen Punkten im Skigebiet die Änderungen signifikant sind (Tabelle 15). Die Zunahmen betragen im Mittel bis zu 50 cm.

Auch ist die Änderung bei der Schneedeckendauer für alle Punkte signifikant positiv (Tabelle 16). Die größten Änderungen ergeben sich hierbei in Lagen unterhalb von 2600 m Seehöhe. So nimmt die Schneedeckendauer zwischen 22 (Rosskarbahn, 2400 m) und 61 Tagen (Hohe Mut Bahn I, 1920 m) zu. Auch wird der Beginn der Skisaison in den tieferen Lagen im Skigebiet im Mittel um ca. 30 Tage nach vor verlegt, das Ende tritt um ca. 10 bis 30 Tage später ein. Es zeigt sich, dass vor allem die tiefer gelegenen Punkte von der technischen 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: NDJFMA.

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [°]	Neig. [°]	Mittelwert				Sig
					Naturschnee		Δ [cm]	Δ [%]	
					1991-2019 [cm]	techn. Schnee 1991-2019 [cm]			
Plattachbahn - Piste 6a/7	6	2800	NW	20	181,4	218,4	37,0	20	
Rosskarbahn - Piste 6	5	2620	NW	20	132,4	179,7	47,3	36	
Rosskarbahn - Piste 11	4	2400	NW	25	96,9	150,9	54,0	56	
Hohe Mut Bahn II - Piste 1	3	2500	NW	20	120,5	171,8	51,3	43	
Steinmannbahn - Piste 5	2	2170	NW	20	74,9	128,2	53,3	71	
Hohe Mut Bahn I - Piste 6	1	1920	NW	15	39,7	93,5	53,8	136	

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: NDJFMA.

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	Mittelwert				Sig
					Naturschnee		Δ [Tage]	Δ [%]	
					1991-2019 [Tage]	techn. Schnee 1991-2019 [Tage]			
Plattachbahn - Piste 6a/7	6	2800	NW	20	176,8	181,1	4,3	2	
Rosskarbahn - Piste 6	5	2620	NW	20	166,5	179,7	13,2	8	
Rosskarbahn - Piste 11	4	2400	NW	25	156,0	178,4	22,4	14	
Hohe Mut Bahn II - Piste 1	3	2500	NW	20	161,7	179,3	17,6	11	
Steinmannbahn - Piste 5	2	2170	NW	20	143,7	174,0	30,3	21	
Hohe Mut Bahn I - Piste 6	1	1920	NW	15	103,3	164,7	61,4	59	

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	techn. Schnee		
					1991-2019 [-]	1991-2019 [-]		
Plattachbahn - Piste 6a/7	6	2800	NW	20	26. Okt	16. Okt	-10	Rot
Rosskarbahn - Piste 6	5	2620	NW	20	11. Nov	21. Okt	-21	
Rosskarbahn - Piste 11	4	2400	NW	25	26. Nov	27. Okt	-30	
Hohe Mut Bahn II - Piste 1	3	2500	NW	20	17. Nov	24. Okt	-24	Rot
Steinmannbahn - Piste 5	2	2170	NW	20	08. Dez	05. Nov	-33	
Hohe Mut Bahn I - Piste 6	1	1920	NW	15	26. Dez	14. Nov	-42	

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	techn. Schnee		
					1991-2019 [-]	1991-2019 [-]		
Plattachbahn - Piste 6a/7	6	2800	NW	20	23. Aug	27. Aug	4	Grün
Rosskarbahn - Piste 6	5	2620	NW	20	12. Jul	24. Jul	12	Rot
Rosskarbahn - Piste 11	4	2400	NW	25	12. Jun	25. Jun	13	
Hohe Mut Bahn II - Piste 1	3	2500	NW	20	30. Jun	11. Jul	11	
Steinmannbahn - Piste 5	2	2170	NW	20	17. Mai	04. Jun	18	Rot
Hohe Mut Bahn I - Piste 6	1	1920	NW	15	07. Apr	07. Mai	30	

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 30 bis 41 zeigen die winterlichen (NDJFMA) Verläufe (Projektionen) der Niederschlagssumme, Temperatur, Gesamtschneehöhe und Schneedeckendauer (Naturschnee, Naturschnee plus technischer Schnee, siehe auch Kapitel 6.2) der Klima-Szenarien an den sechs ausgewählten Punkten im Skigebiet Obergurgl. 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). 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 (begrenztes 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 Lagen unterhalb von 2400 m Seehöhe ist vor allem bei der saisonalen Schneedeckendauer 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. Auch werden die tiefergelegenen Abschnitte im Skigebiet sensibler auf Temperaturänderungen reagieren. Die hohe Schwankungsbreite ist auch in der Vergangenheit am tiefsten Punkt Hohe Mut (1920 m) gut erkennbar.

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 Stabilisierung der Schneedeckendauer und zu einer gedämpften Jahr-zu-Jahr Variabilität. In RCP8.5 ist dennoch in Lagen unterhalb von 2400 m Seehöhe 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. In den höheren Lagen projiziert RCP8.5 für die Periode 2070 bis 2099 eine mittlere Schneedeckendauer zwischen 140 und über 170 Tage zwischen November und April. 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 vor allem die mittleren Lagen im Skigebiet von der technischen Beschneigung profitieren. Darüber hinaus verdeutlichen die Ergebnisse die Wichtigkeit, dass sowohl klimapolitische als auch gesellschaftspolitische Maßnahmen auf regionaler, nationer und globaler Ebene umgesetzt werden, um die Eintrittswahrscheinlichkeit der möglichen Zukunftsprojektion RCP8.5 zu verringern.

1 Hohe Mut Bahn I (1920 m)

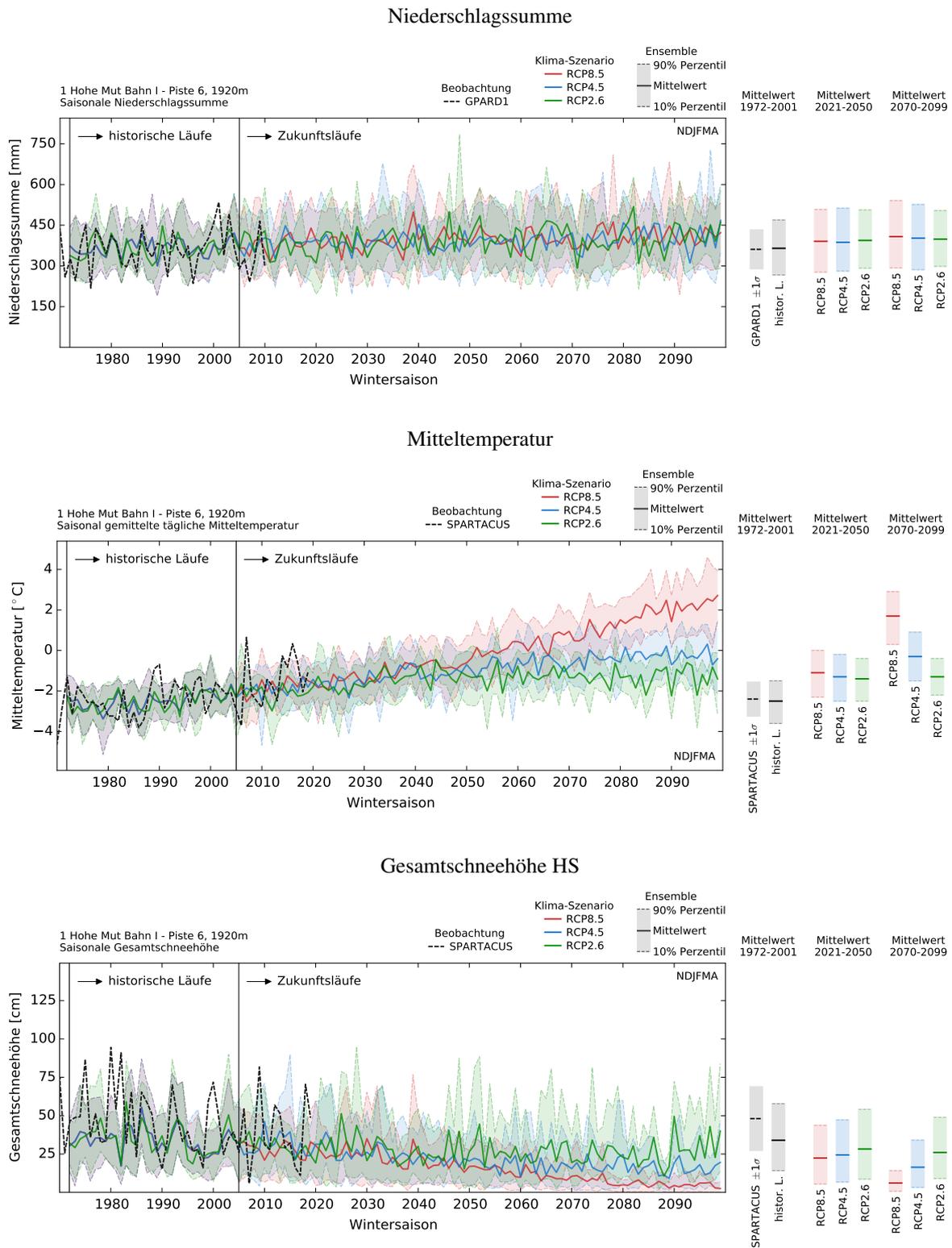
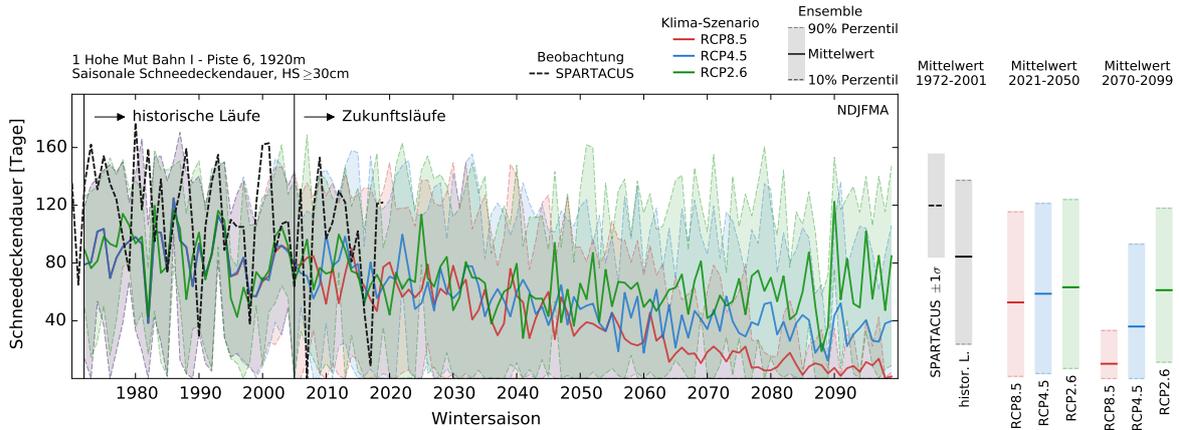


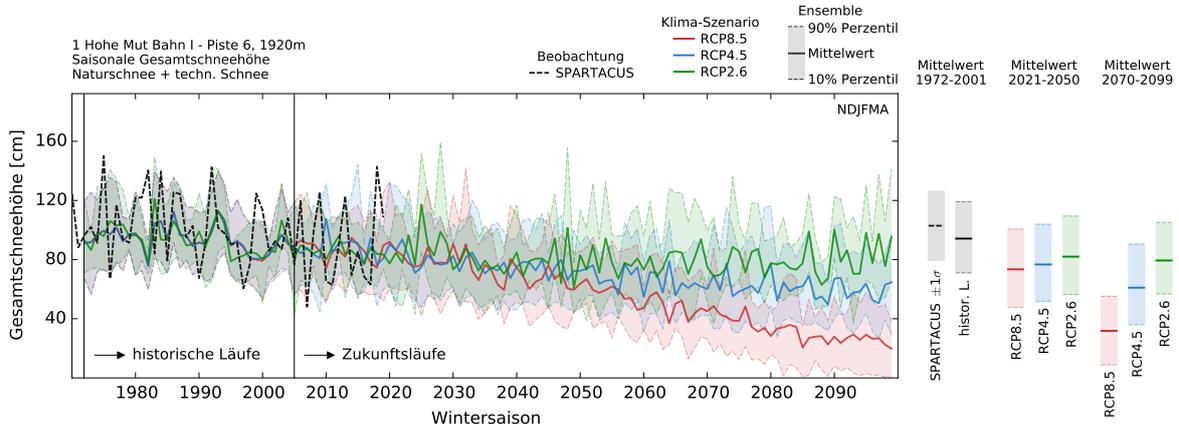
Abbildung 30: Linienvläufe der saisonalen (NDJFMA) Niederschlagssumme (oben), Mitteltemperatur (Mitte) und Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) am Punkt 1 Hohe Mut Bahn I (1920 m) bis in die ferne Zukunft 2099. Die dicken Linien stellen 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 Beobachtungsdatensatz GPARD1/SPARTACUS, ist in schwarz dargestellt. 30-Jährige Mittelwerte, bezüglich der Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099, sind rechts abgebildet.

1 Hohe Mut Bahn I (1920 m)

Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm



Gesamtschneehöhe HS: Naturschnee plus technischer Schnee



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

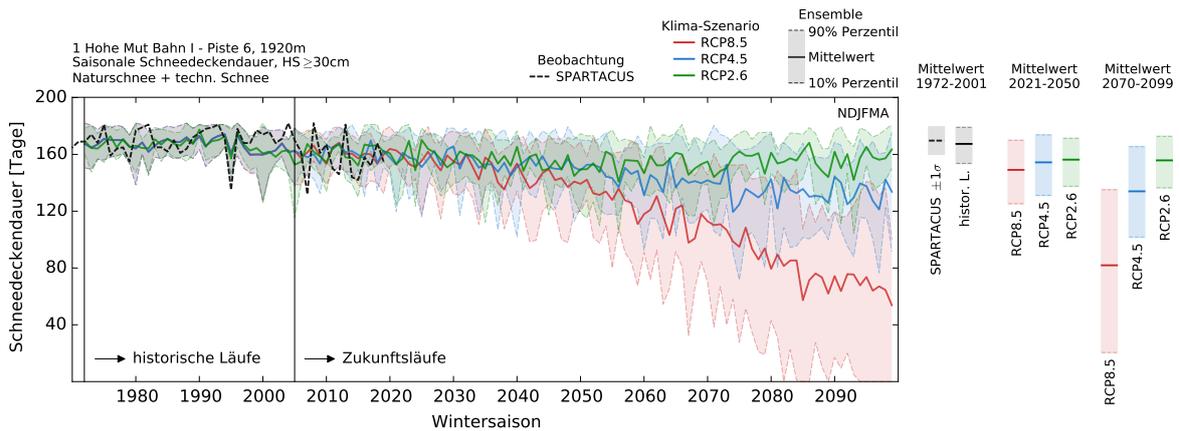


Abbildung 31: Linienverläufe der saisonalen (NDJFMA) Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm, (Naturschnee, oben), Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee+techn. Schnee, Mitte) und der Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm, (Naturschnee+techn. Schnee, unten) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) am Punkt 1 Hohe Mut Bahn I (1920 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 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.

2 Steinmannbahn (2170 m)

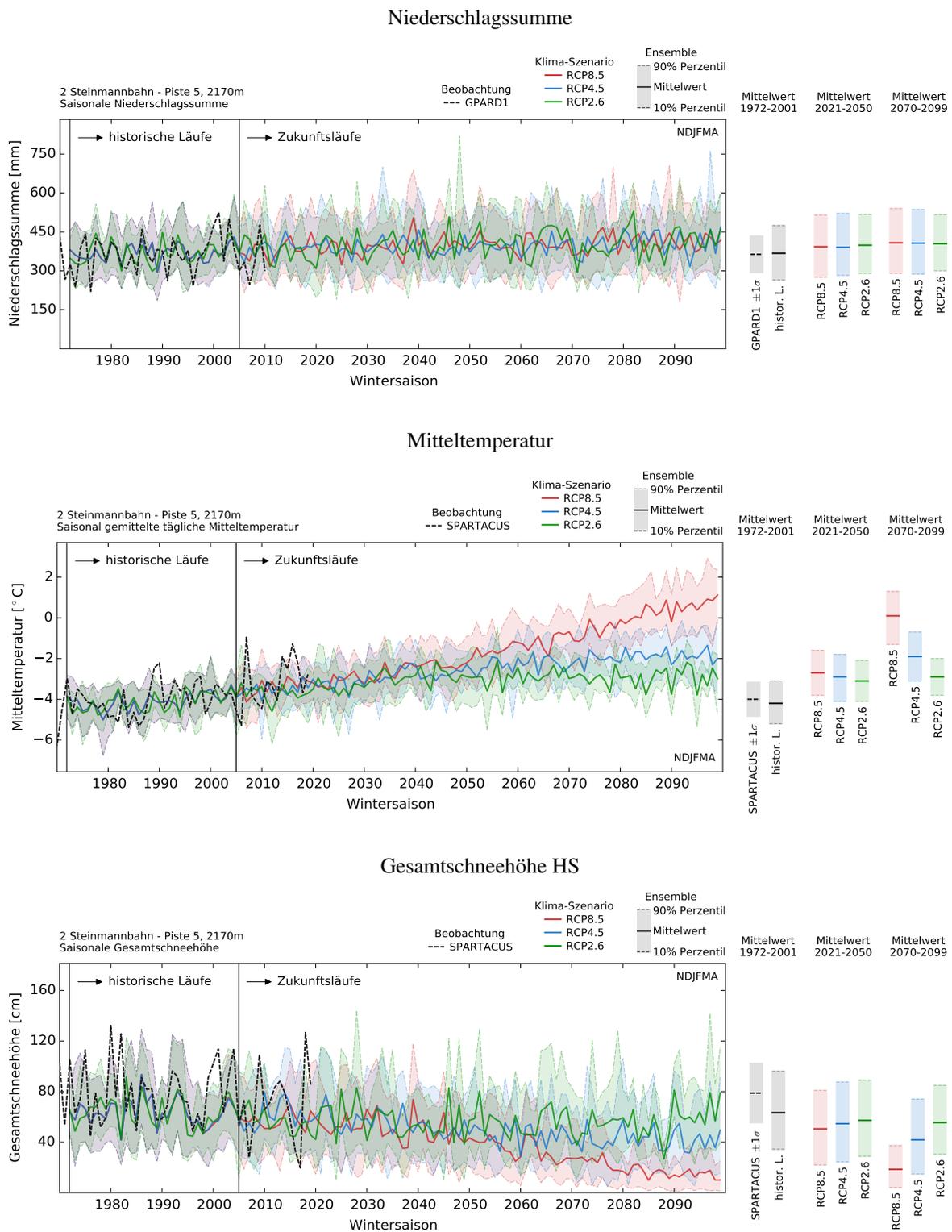
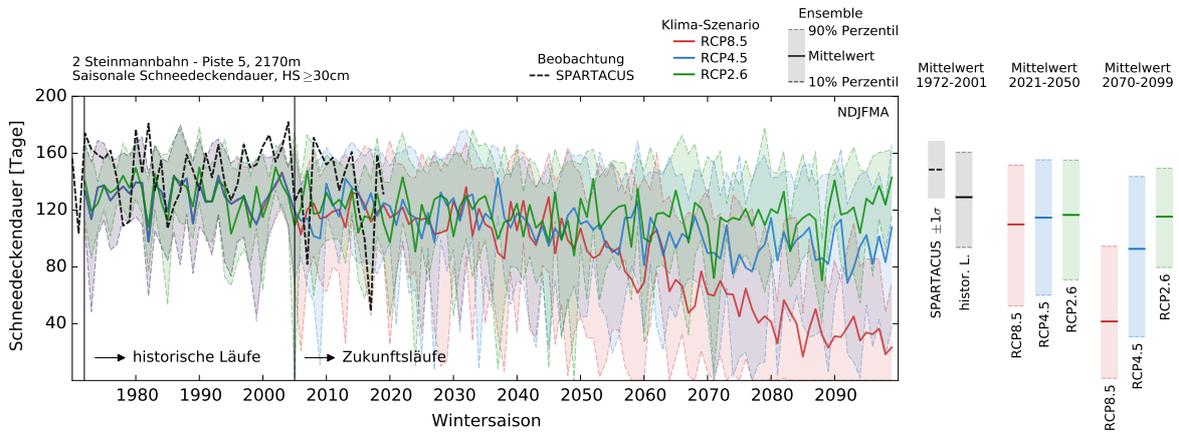


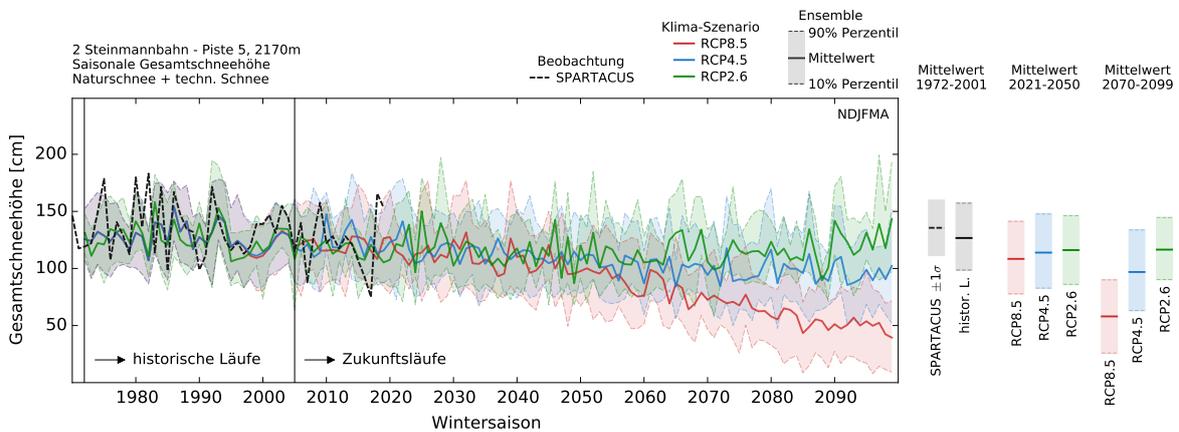
Abbildung 32: Linienvläufe der saisonalen (NDJFMA) Niederschlagssumme (oben), Mitteltemperatur (Mitte) und Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) am Punkt 2 Steinmannbahn (2170 m) bis in die ferne Zukunft 2099. Die dicken Linien stellen 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 Beobachtungsdatensatz GPARD1/SPARTACUS, ist in schwarz dargestellt. 30-Jährige Mittelwerte, bezüglich der Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099, sind rechts abgebildet.

2 Steinmannbahn (2170 m)

Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm



Gesamtschneehöhe HS: Naturschnee plus technischer Schnee



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

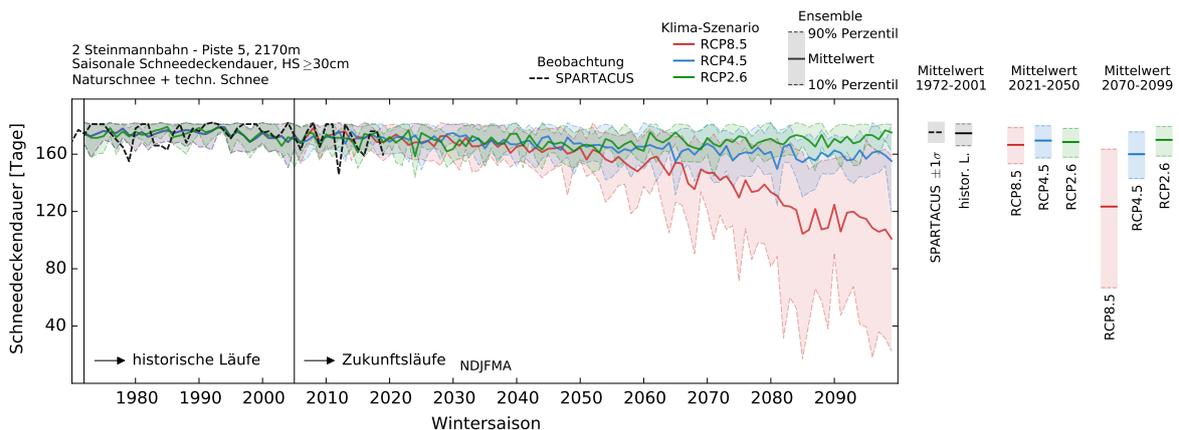


Abbildung 33: Linienverläufe der saisonalen (NDJFMA) Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm, (Naturschnee, oben), Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee+techn. Schnee, Mitte) und der Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm, (Naturschnee+techn. Schnee, unten) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) am Punkt 2 Steinmannbahn (2170 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 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.

3 Hohe Mut Bahn II (2500 m)

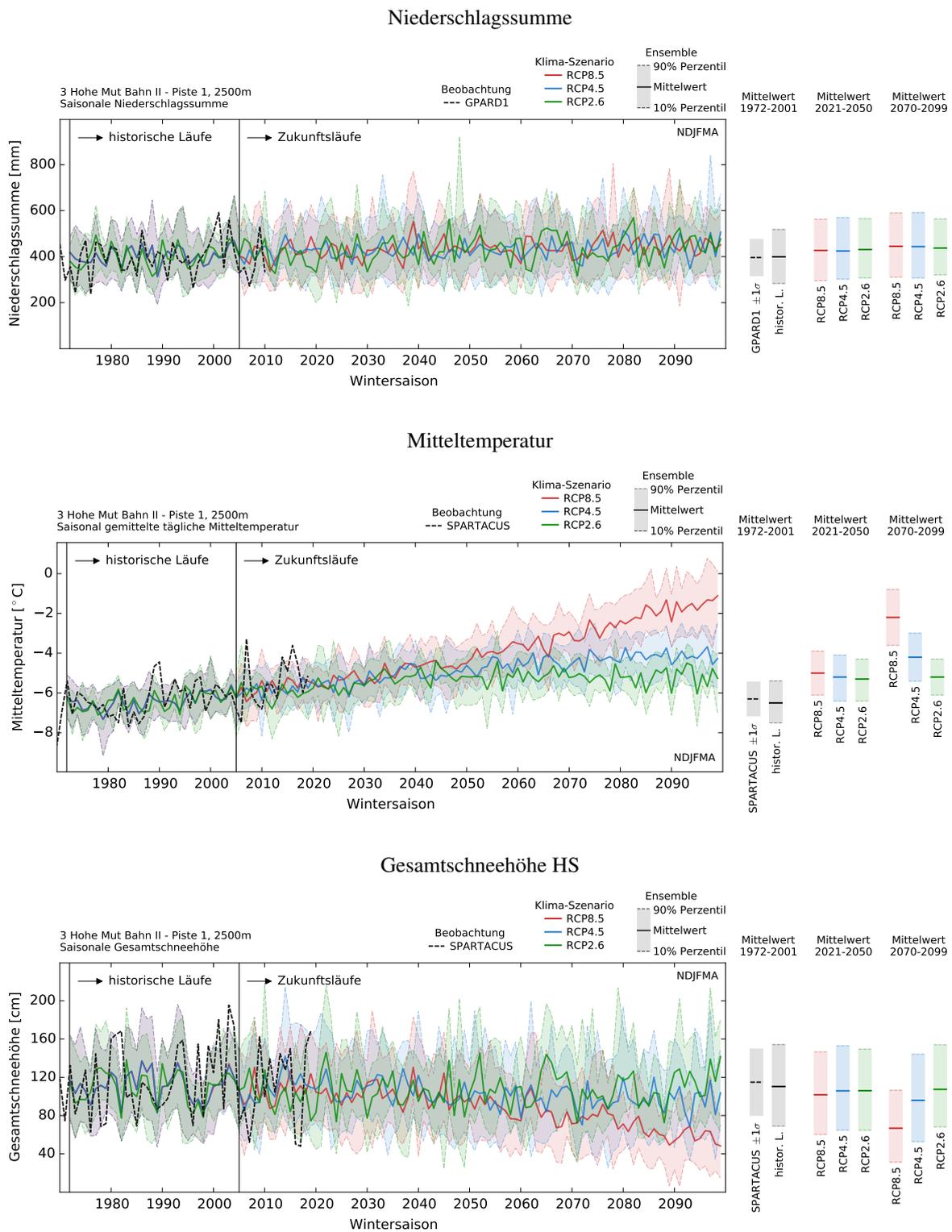
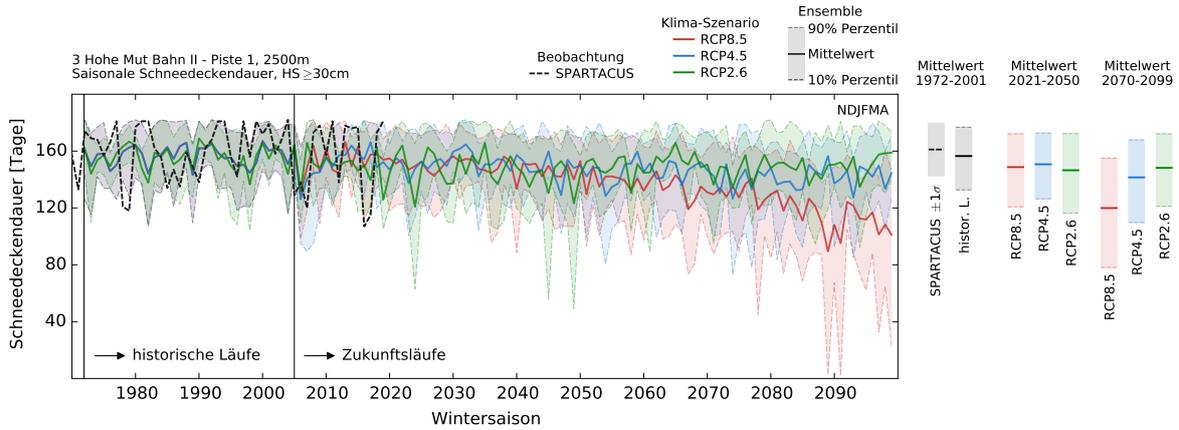


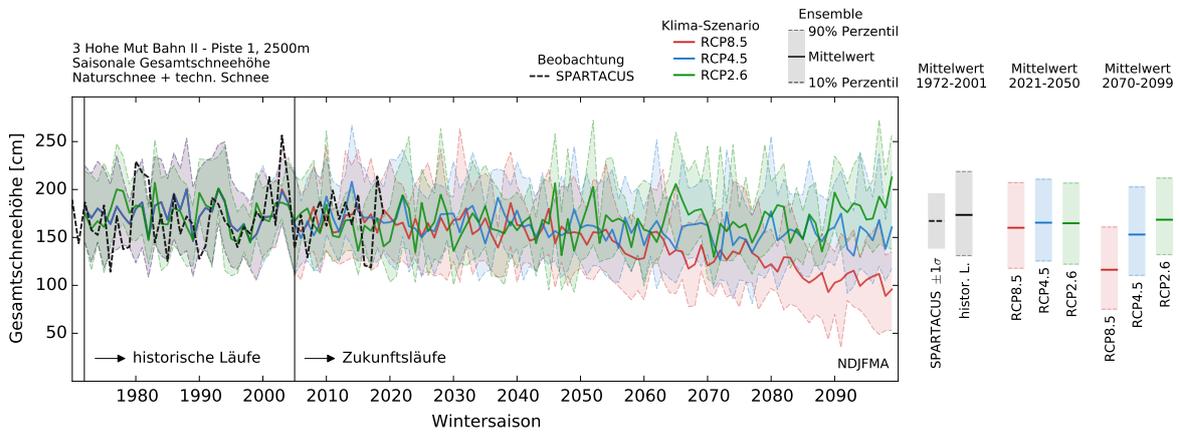
Abbildung 34: Linienvläufe der saisonalen (NDJFMA) Niederschlagssumme (oben), Mitteltemperatur (Mitte) und Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) am Punkt 3 Hohe Mut Bahn II (2500 m) bis in die ferne Zukunft 2099. Die dicken Linien 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 Beobachtungsdatensatz GPARD1/SPARTACUS, ist in schwarz dargestellt. 30-Jährige Mittelwerte, bezüglich der Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099, sind rechts abgebildet.

3 Hohe Mut Bahn II (2500 m)

Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm



Gesamtschneehöhe HS: Naturschnee plus technischer Schnee



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

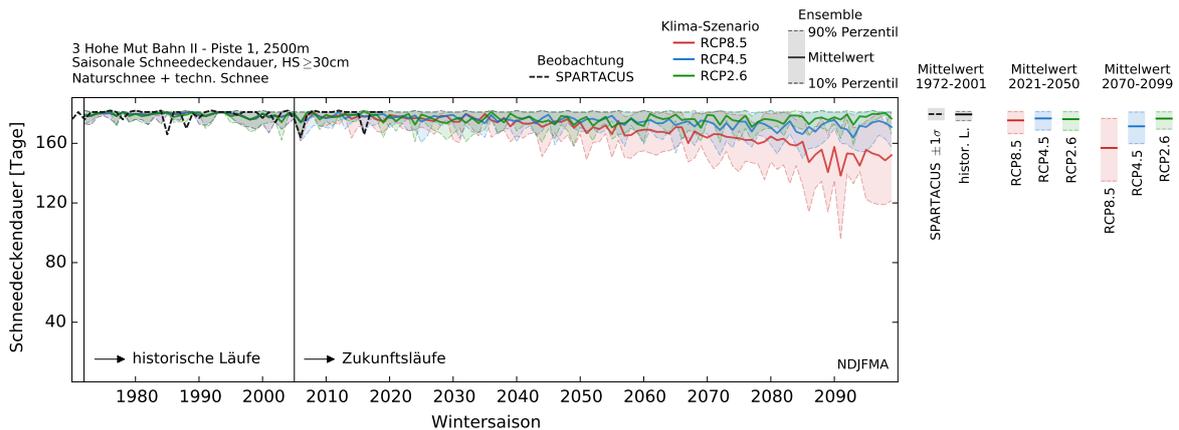
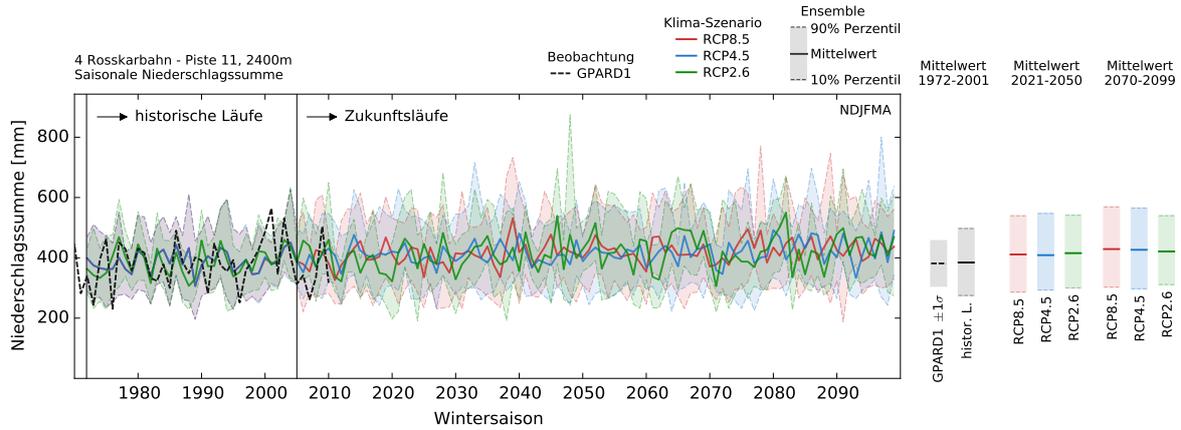


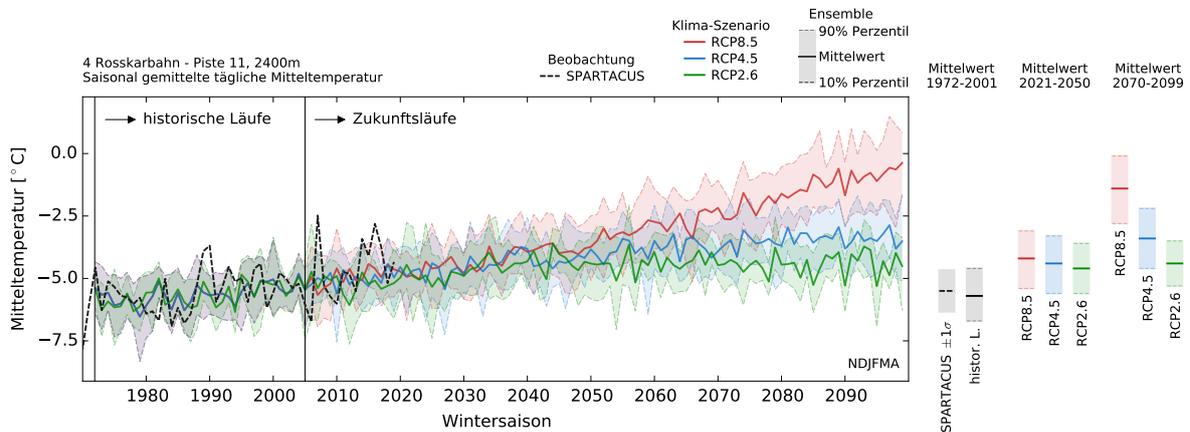
Abbildung 35: Linienverläufe der saisonalen (NDJFMA) Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm, (Naturschnee, oben), Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee+techn. Schnee, Mitte) und der Schneedeckendauer, $HS \geq 30$ cm, (Naturschnee+techn. Schnee, unten) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) am Punkt 3 Hohe Mut Bahn II (2500 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 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.

4 Rosskarbahn (2400 m)

Niederschlagssumme



Mitteltemperatur



Gesamtschneehöhe HS

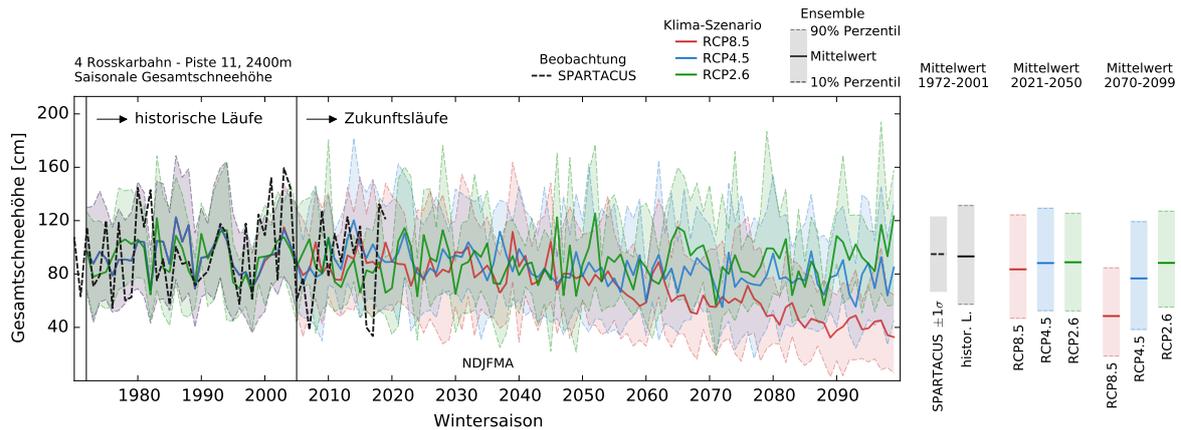


Abbildung 36: Linienverläufe der saisonalen (NDJFMA) Niederschlagssumme (oben), Mitteltemperatur (Mitte) und Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) am Punkt 4 Rosskarbahn (2400 m) bis in die ferne Zukunft 2099. Die dicken Linien stellen 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 Beobachtungsdatensatz GPARD1/SPARTACUS, ist in schwarz dargestellt. 30-Jährige Mittelwerte, bezüglich der Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099, sind rechts abgebildet.

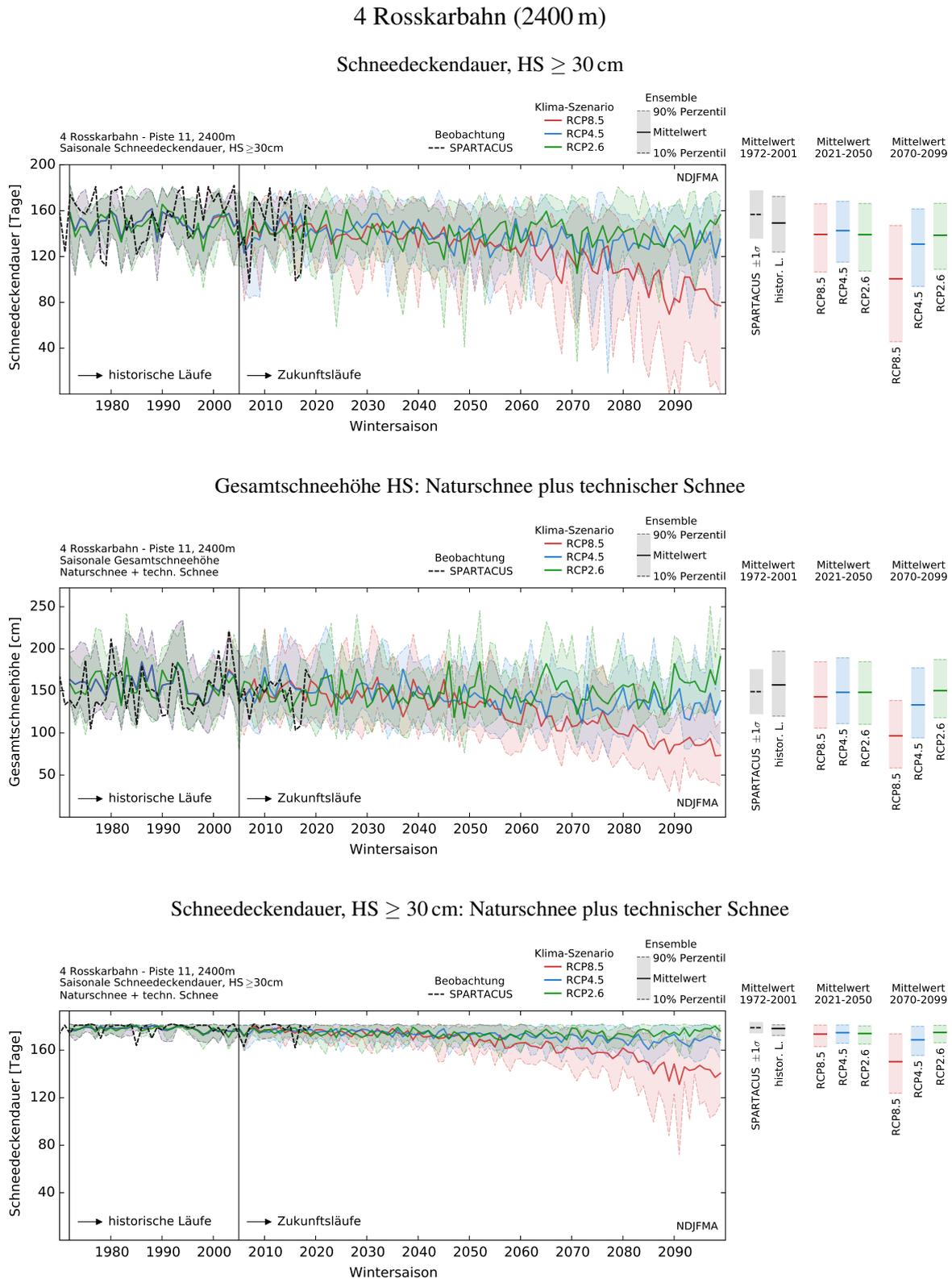
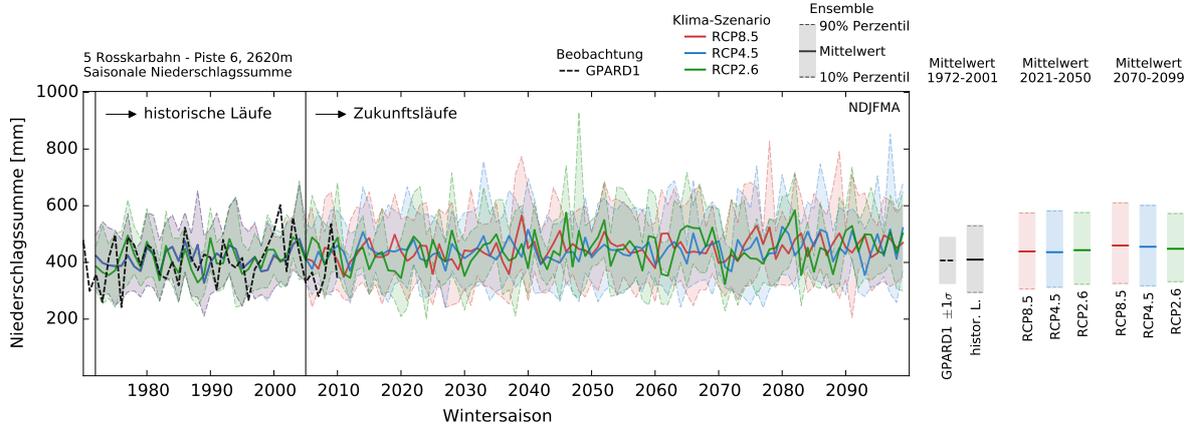


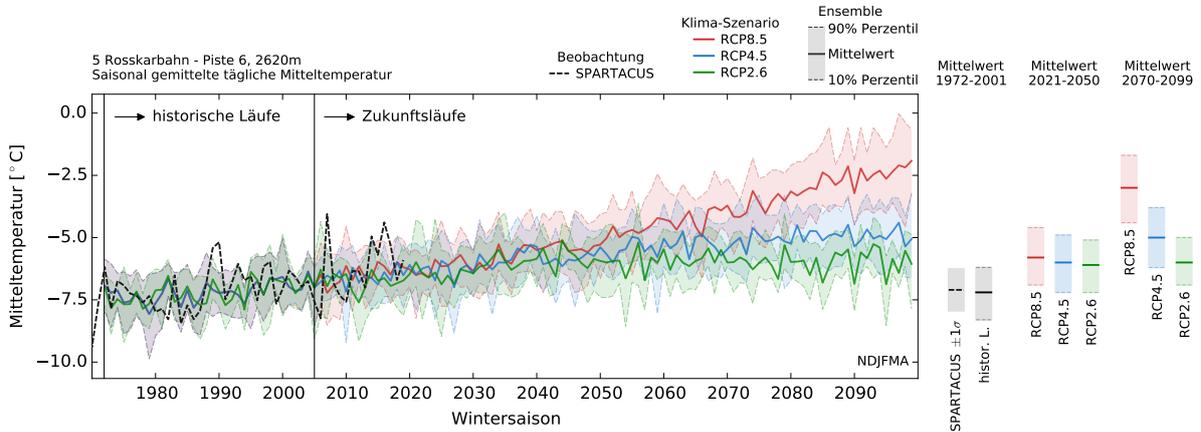
Abbildung 37: Linienverläufe der saisonalen (NDJFMA) Schneedeckendauer, HS \geq 30 cm, (Naturschnee, oben), Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee+techn. Schnee, Mitte) und der Schneedeckendauer, HS \geq 30 cm, (Naturschnee+techn. Schnee, unten) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) am Punkt 4 Rosskarbahn (2400 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 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.

5 Rosskarbahn (2620 m)

Niederschlagssumme



Mitteltemperatur



Gesamtschneehöhe HS

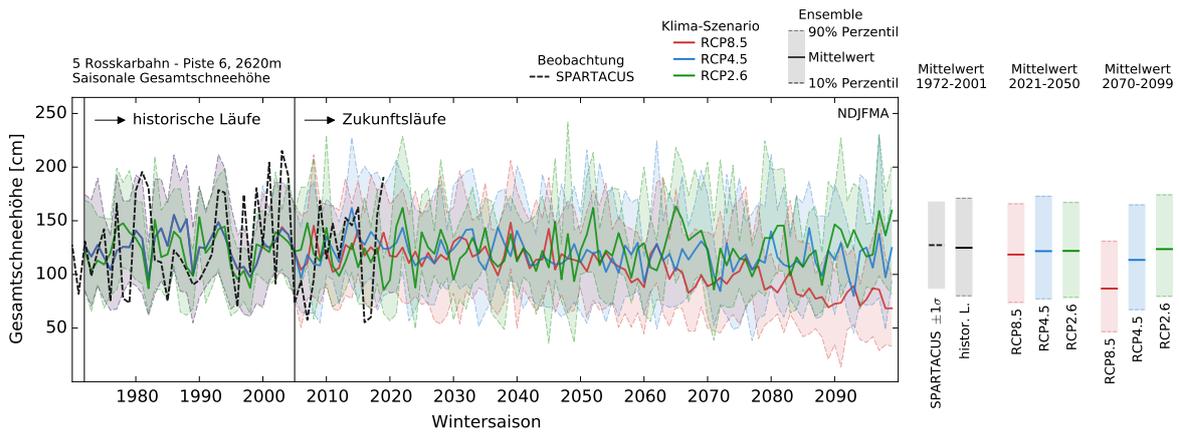


Abbildung 38: Linienvläufe der saisonalen (NDJFMA) Niederschlagssumme (oben), Mitteltemperatur (Mitte) und Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) am Punkt 5 Rosskarbahn (2620 m) bis in die ferne Zukunft 2099. Die dicken Linien stellen 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 Beobachtungsdatensatz GPARD1/SPARTACUS, ist in schwarz dargestellt. 30-Jährige Mittelwerte, bezüglich der Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099, sind rechts abgebildet.

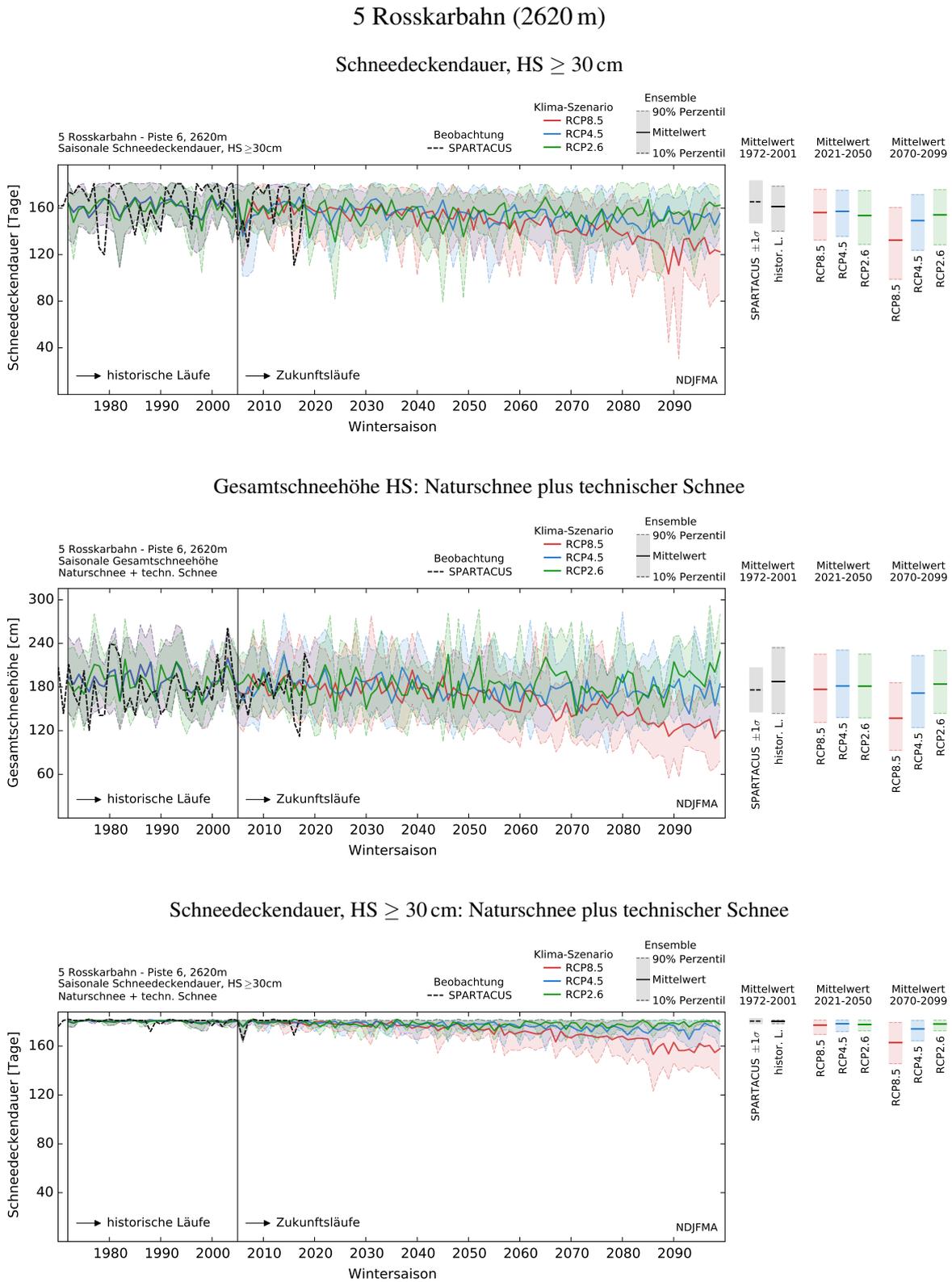


Abbildung 39: Linienverläufe der saisonalen (NDJFMA) Schneedeckendauer, HS \geq 30 cm, (Naturschnee, oben), Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee+techn. Schnee, Mitte) und der Schneedeckendauer, HS \geq 30 cm, (Naturschnee+techn. Schnee, unten) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) am Punkt 5 Rosskarbahn (2620 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 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.

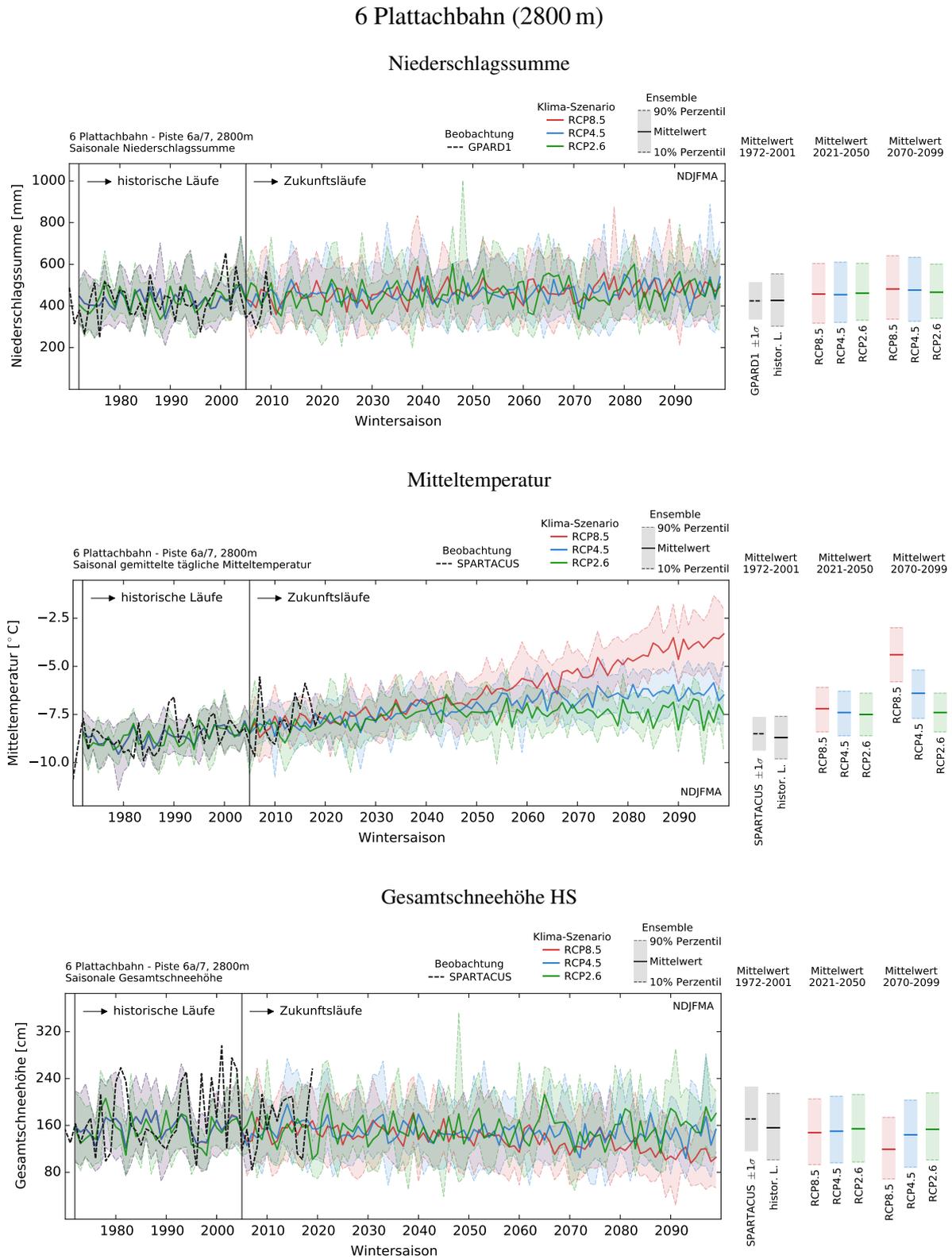


Abbildung 40: Linienverläufe der saisonalen (NDJFMA) Niederschlagssumme (oben), Mitteltemperatur (Mitte) und Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) am Punkt 6 Plattachbahn (2800 m) bis in die ferne Zukunft 2099. Die dicken Linien stellen 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 Beobachtungsdatensatz GPARD1/SPARTACUS, ist in schwarz dargestellt. 30-Jährige Mittelwerte, bezüglich der Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099, sind rechts abgebildet.

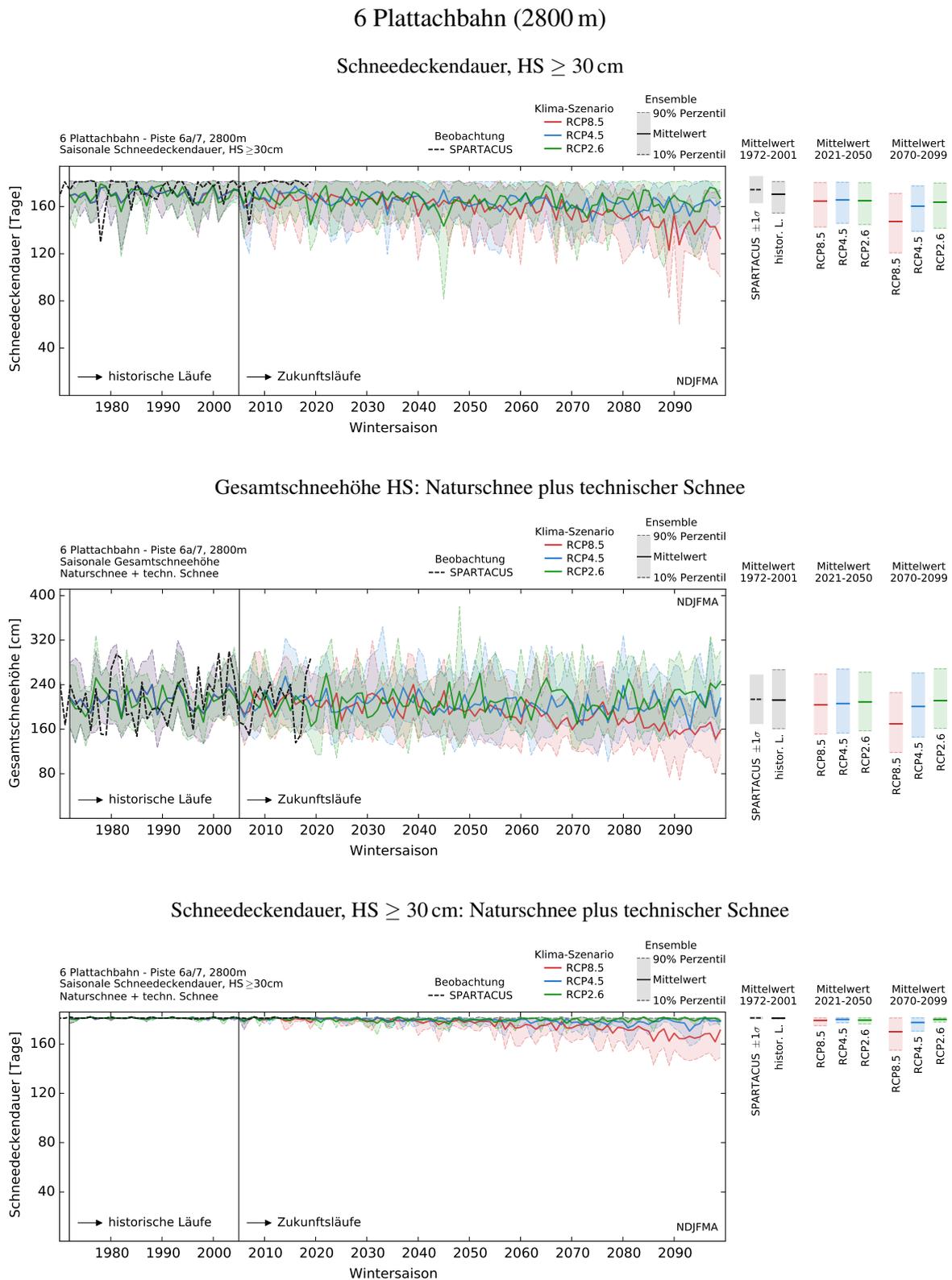


Abbildung 41: Linienverläufe der saisonalen (NDJFMA) Schneedeckendauer, HS \geq 30 cm, (Naturschnee, oben), Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee+techn. Schnee, Mitte) und der Schneedeckendauer, HS \geq 30 cm, (Naturschnee+techn. Schnee, unten) der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) am Punkt 6 Plattachbahn (2800 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 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.

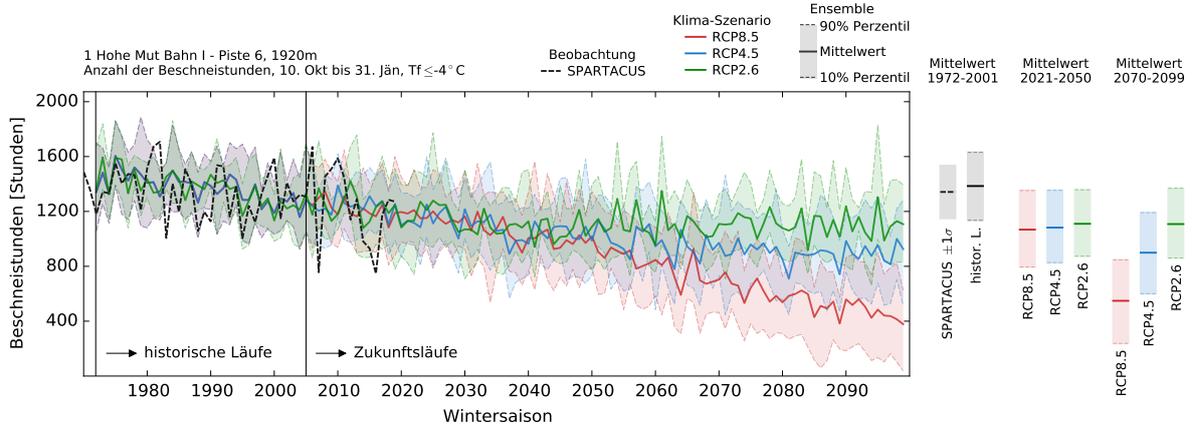
9.2.2 Zeitlicher Verlauf der Anzahl der möglichen Beschneistunden bis in die ferne Zukunft

Die zeitlichen Verläufe der Anzahl der möglichen Beschneistunden an den ausgewählten Punkten im Skigebiet Obergurgl bis in die ferne Zukunft 2099 ist in den Abbildungen 42 und 43 dargestellt. Der Zeitraum, in welchem die Beschneistunden gezählt werden ist 10. Oktober 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.

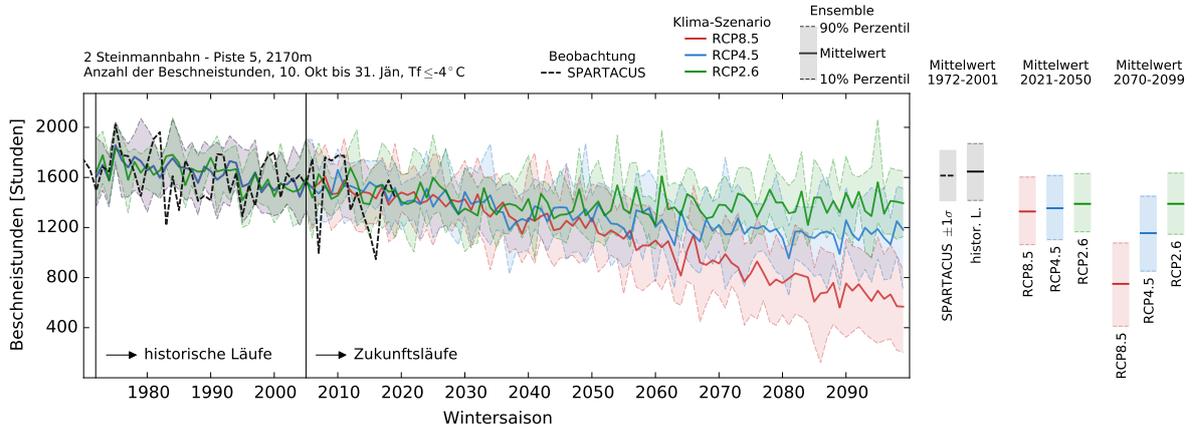
Deutlich wird, dass in allen Seehöhen eine Abnahme projiziert wird, unabhängig davon welches Emissionsszenario betrachtet wird. Dies deutet darauf hin, dass die zu erwartende Temperaturzunahme in allen Höhenlagen spürbar sein wird. Die Änderungen werden jedoch in den verschiedenen Seehöhen eine unterschiedliche Bedeutung (für die Schneeproduktion) haben. Die stärksten Abnahmen zeigen sich erwartungsgemäß in RCP8.5. Hierbei kommt es für die Periode 2070 bis 2099 im Mittel zu einer Halbierung 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 in RCP8.5 das Spektrum möglicher zukünftiger Zustände breiter (Bandbreite) als in den Klima-Szenarien RCP4.5 und RCP2.6.

Beschneistunden 10. Okt bis 31. Jän, $T_f \leq -4^\circ\text{C}$

1 Hohe Mut Bahn I (1920 m)



2 Steinmannbahn (2170 m)



3 Hohe Mut Bahn II (2500 m)

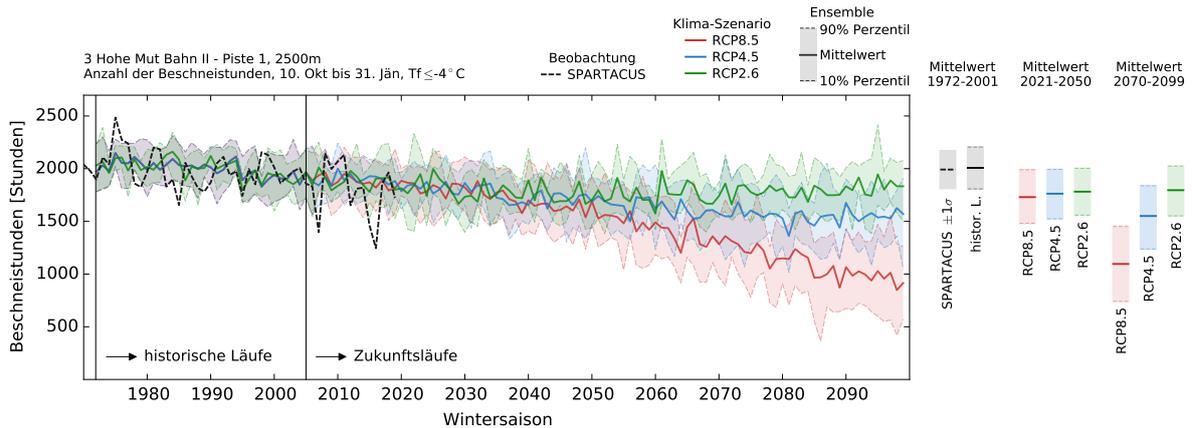


Abbildung 42: Linienverläufe der Anzahl der möglichen Beschneistunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$) im Zeitraum 10. Oktober bis 31. Jänner der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) an den Punkten 1, 2 und 3 bis in die ferne Zukunft 2099. Die dicken 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.

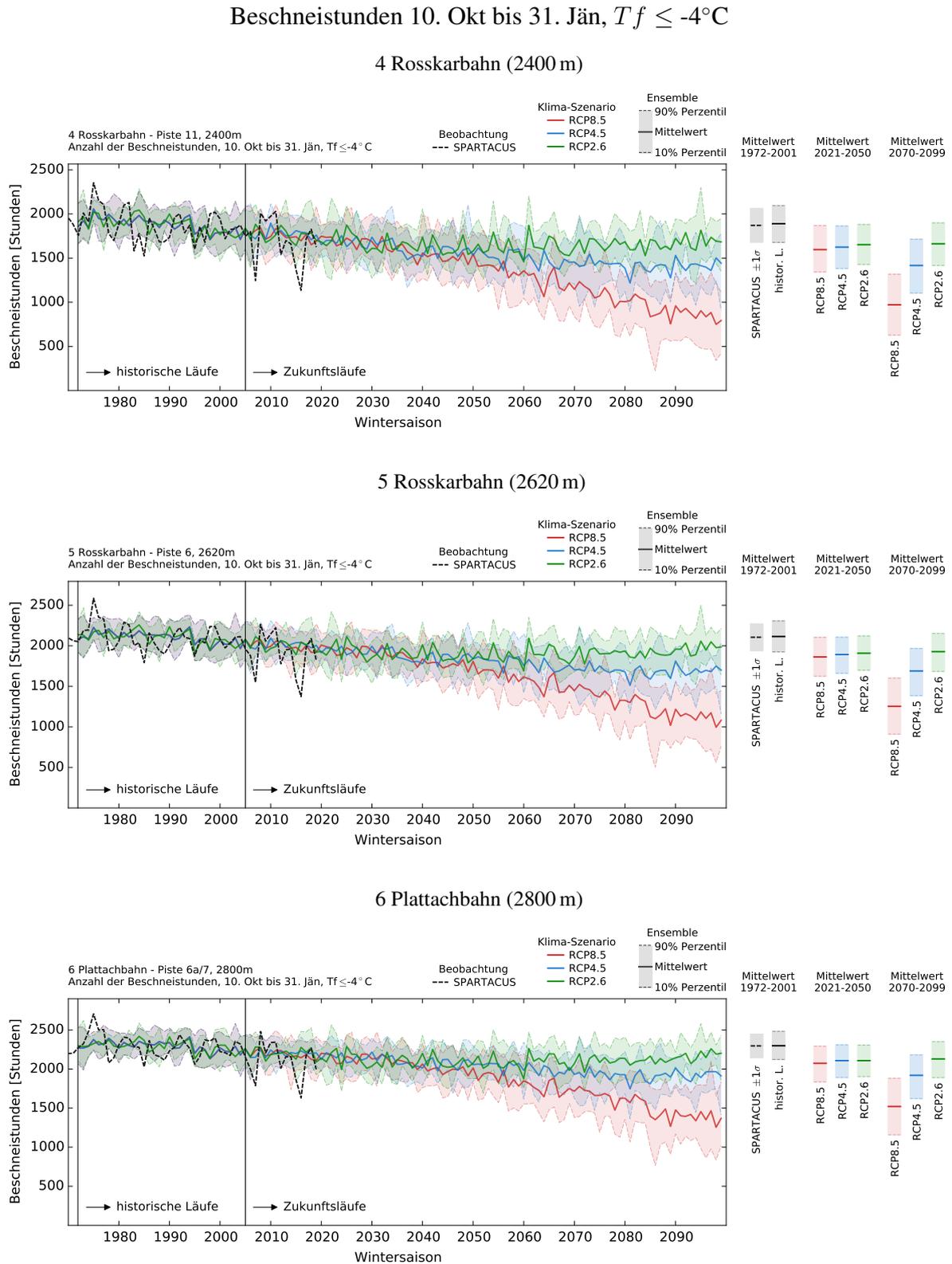


Abbildung 43: Linienverläufe der Anzahl der möglichen Beschneistunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$) im Zeitraum 10. Oktober bis 31. Jänner der drei Emissionsszenarien RCP2.6 (grün), RCP4.5 (blau) und RCP8.5 (rot) an den Punkten 4, 5 und 6 bis in die ferne Zukunft 2099. Die dicken 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.

Abbildungen 44 bis 49 zeigen die zukünftigen Verläufe der Dauer sowie Beginn und Ende der Skisaisonen für die Punkte 1, 4 und 5 in 1920 m bis 2620 m Seehöhe. 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 in allen Seehöhen zu einer Verlängerung der Skisaison führt (siehe Abbildungen 44, 46 und 48). Am tiefsten Punkt im Skigebiet (1 Hohe Mut Bahn I, 1920 m) nimmt die Dauer der Skisaison (Naturschnee) 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. Im Vergleich dazu wird die Bandbreite der zeitlichen Verläufe in den mittleren und hohen Lagen im Skigebiet deutlich verringert und die Jahr-zu-Jahr Variabilität drastisch gedämpft. Die abnehmende Tendenz ab 2050 ist in allen Seehöhen erkennbar, wobei die Stärke der Änderungen deutlich von der Seehöhe abhängt.

In RCP8.5 führt die technische Beschneigung im Mittel zu einem früheren Beginn der Skisaison. Auch kann das Ende nach hinten verschoben werden (siehe Abbildungen 45, 47 und 49). 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. Die projizierten Änderungen in Beginn und Ende der Skisaison werden vor allem die tiefen Lagen im Skigebiet treffen. In den mittleren und hohen Lagen wird der Beginn ebenfalls im Mittel später stattfinden. Der Start der Skisaison wird von November hin zu Anfang Dezember verschoben. Mit Hilfe der technischen Beschneigung kann jedoch das Betriebsende (z.B. 30. April) gehalten werden. Im Skigebiet werden somit Regionen in tiefen Lagen stärker von der zu erwartenden Temperaturerhöhung betroffen sein. 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.

1 Hohe Mut Bahn I (1920 m)

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

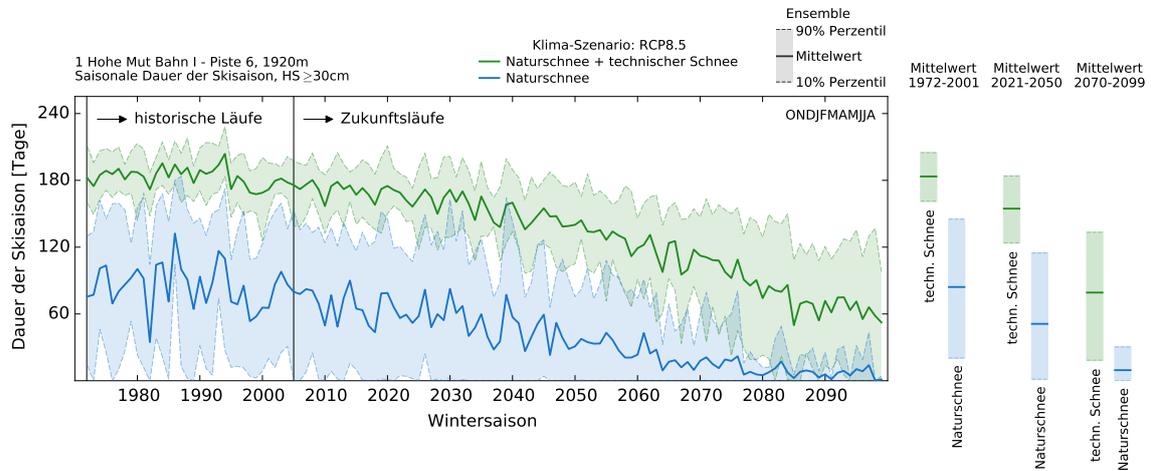


Abbildung 44: Klima-Szenario RCP8.5, Punkt 1 Hohe Mut Bahn I (1920 m): Dauer der Skisaison (durchgehend geschlossene Schneedecke mit einer Schneehöhe von mindestens 30 cm zwischen 1. Oktober und 31. August), basierend auf Naturschnee (blau) und Naturschnee plus technischem Schnee (grün). Die dicken Linien 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

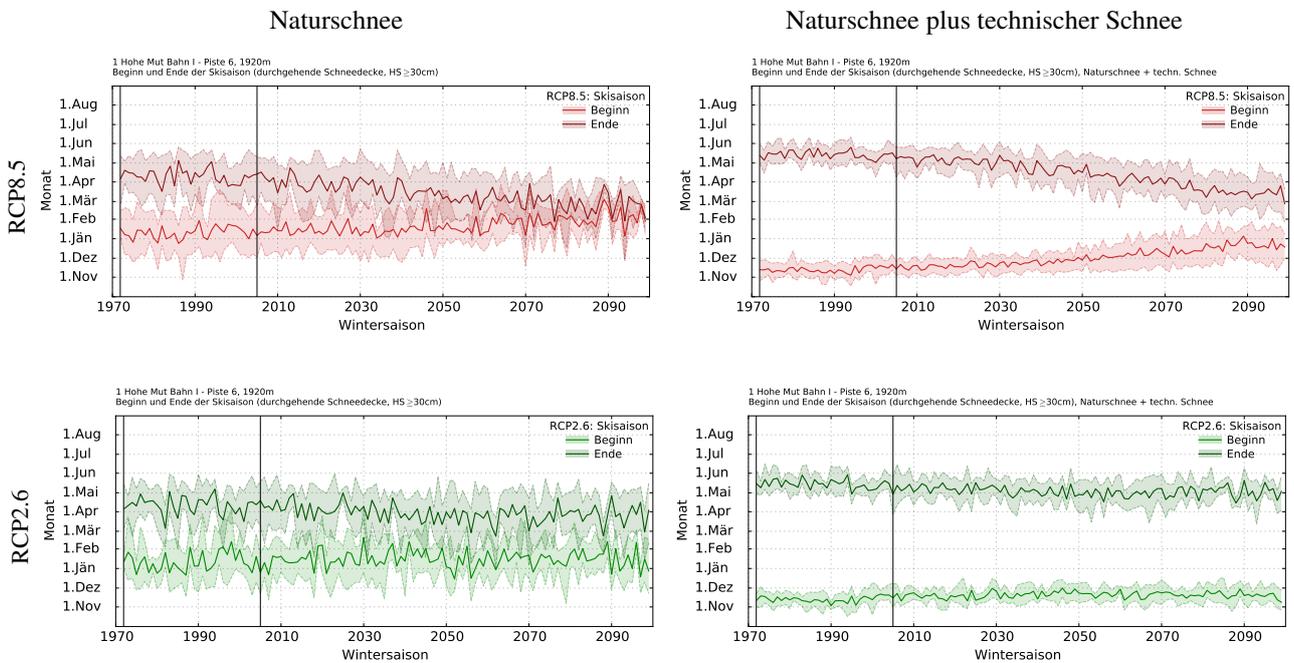


Abbildung 45: Klima-Szenarien RCP8.5 und RCP2.6, Punkt 1 Hohe Mut Bahn I (1920 m): Beginn und Ende der Skisaison ($HS \geq 30$ cm), basierend auf Naturschnee (links) und Naturschnee plus technischem Schnee (rechts) in RCP8.5 (oben) und RCP2.6 (unten). Die dicken Linien stellen den Ensemble-Mittelwert 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.

4 Rosskarbahn (2400 m)

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

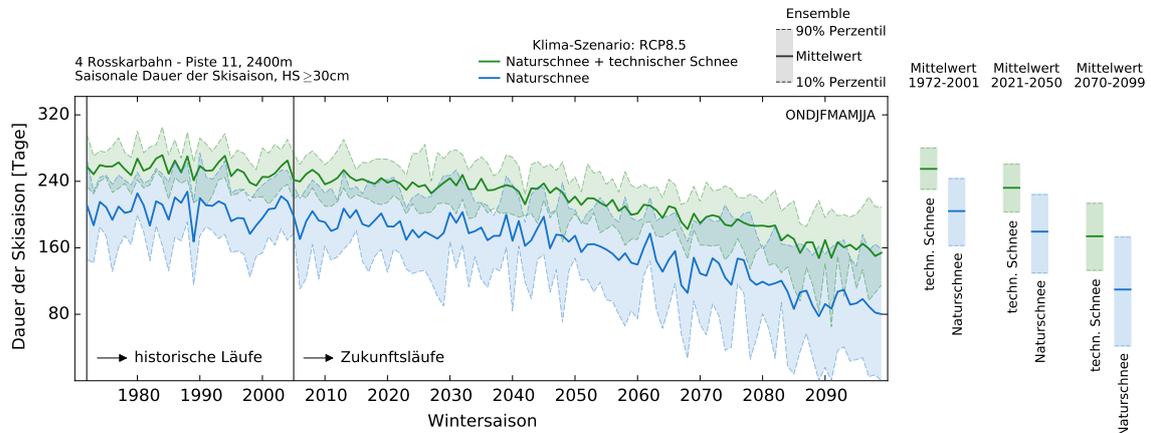


Abbildung 46: Klima-Szenario RCP8.5, Punkt 4 Rosskarbahn (2400 m): Dauer der Skisaison (durchgehend geschlossene Schneedecke mit einer Schneehöhe von mindestens 30 cm zwischen 1. Oktober und 31. August), basierend auf Naturschnee (blau) und Naturschnee plus technischem Schnee (grün). Die dicken Linien 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

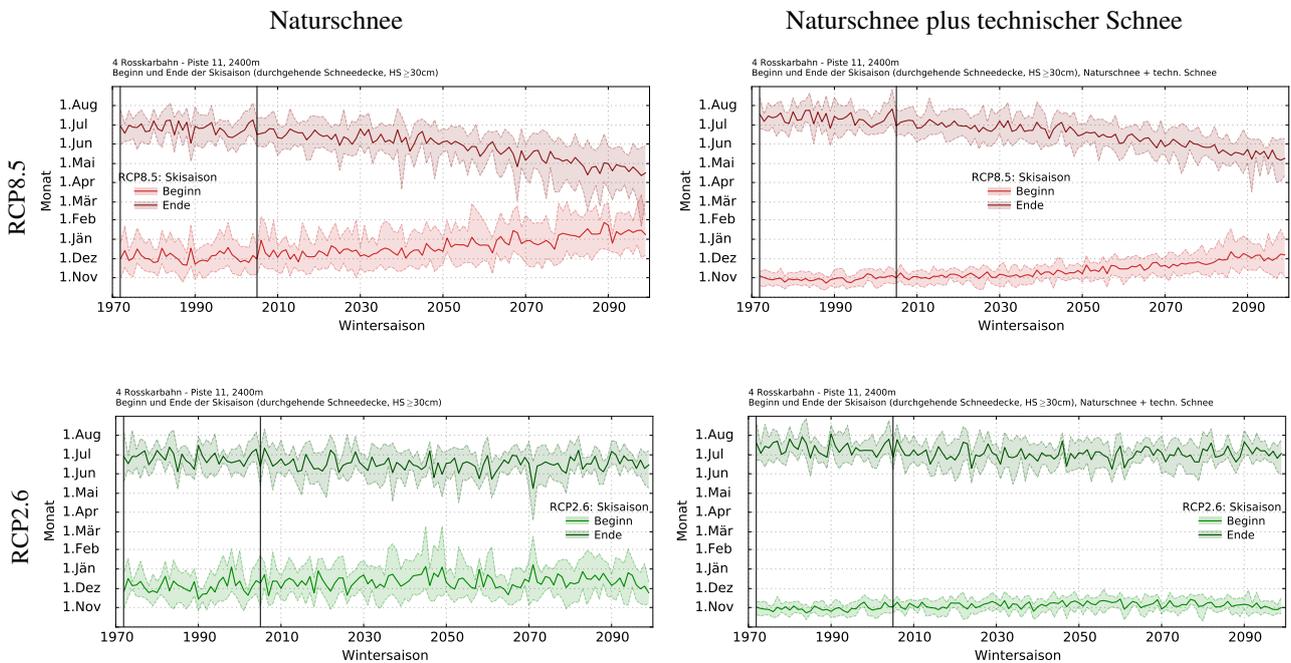


Abbildung 47: Klima-Szenarien RCP8.5 und RCP2.6, Punkt 4 Rosskarbahn (2400 m): Beginn und Ende der Skisaison ($HS \geq 30$ cm), basierend auf Naturschnee (links) und Naturschnee plus technischem Schnee (rechts) in RCP8.5 (oben) und RCP2.6 (unten). Die dicken Linien stellen den Ensemble-Mittelwert dar. 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.

5 Rosskarbahn (2620 m)

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

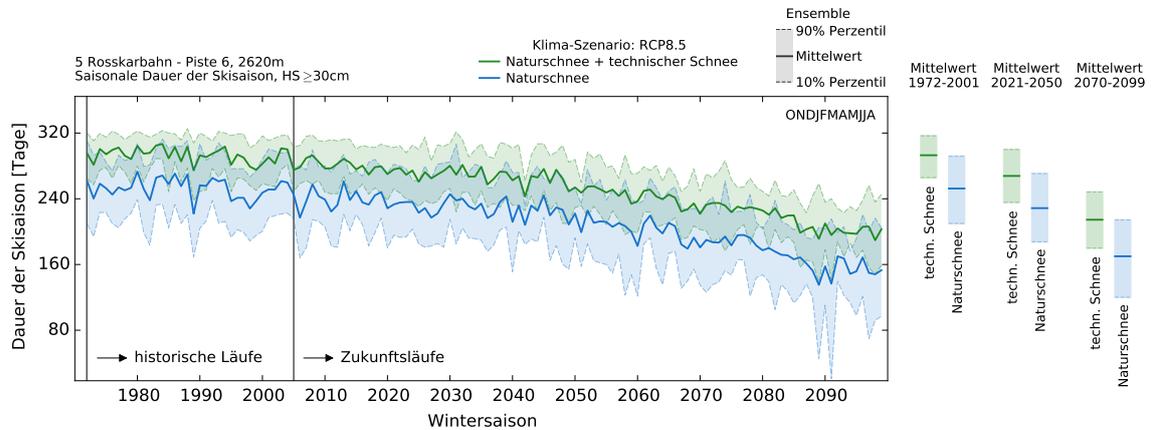


Abbildung 48: Klima-Szenario RCP8.5, Punkt 5 Rosskarbahn (2620 m): Dauer der Skisaison (durchgehende geschlossene Schneedecke mit einer Schneehöhe von mindestens 30 cm zwischen 1. Oktober und 31. August), basierend auf Naturschnee (blau) und Naturschnee plus technischem Schnee (grün). Die dicken Linien 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

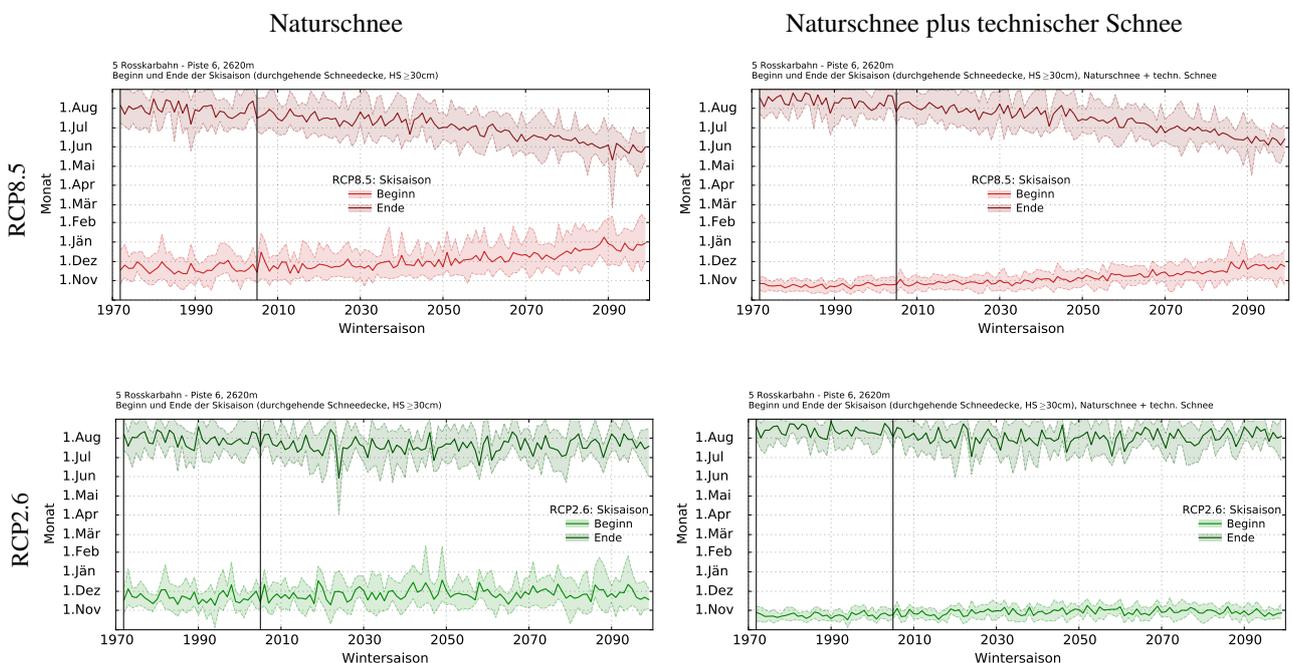


Abbildung 49: Klima-Szenarien RCP8.5 und RCP2.6, Punkt 5 Rosskarbahn (2620 m): Beginn und Ende der Skisaison ($HS \geq 30$ cm), basierend auf Naturschnee (links) und Naturschnee plus technischem Schnee (rechts) in RCP8.5 (oben) und RCP2.6 (unten). Die dicken Linien stellen den Ensemble-Mittelwert dar. 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 50 bis 55 sind die mittleren monatlichen Änderungen der Niederschlagssumme, Temperatur, Gesamtschneehöhe und der Schneedeckendauer (beides Naturschnee) an den sechs Punkten im Skigebiet dargestellt. Darüber hinaus ist auch die Änderung der Anzahl der möglichen Beschneistunden als Funktion der Feuchtkugeltemperatur Tf abgebildet. Die Schwellwerte für Tf betragen -4°C und -6°C . Die Änderung der Schneeindikatoren bezieht sich auf die Monate November bis April, die der Beschneistunden auf die Perioden 10. Okt bis 15. Dez, 10. Okt bis 24. Dez, 10. Okt bis 6. Jän und 10. Okt 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 Jänner, Februar und März zunehmen, unabhängig von Klima-Szenario (z.B. mittlere Zunahme von 10 bis zu 20% im Jänner). Hierbei ist die Bandbreite der Änderungen 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 leicht über den Änderungen in RCP4.5 und RCP2.6 am sind. Darüber hinaus sind alle Höhenlagen von der Temperaturzunahme betroffen. Speziell in den Monaten Juli bis Oktober sind die Änderungen am deutlichsten ausgeprägt. RCP8.5 projiziert z.B. eine mittlere Zunahme von bis zu 2°C im September. Im Vergleich dazu fallen die Änderungen in RCP2.6 etwas geringer aus (ca. $1,5^{\circ}\text{C}$). Innerhalb der erweiterten Wintersaison November bis April sind die Änderungen im Dezember und Jänner am stärksten ausgeprägt, unabhängig von Klima-Szenario und Seehöhe.

Alle drei Klima-Szenarien weisen für Lagen unterhalb von 2400 m Seehöhe (Hohe Mut Bahn I und Steinmannbahn) auf eine Abnahme der monatlichen Gesamtschneehöhe hin. In RCP4.5 und RCP8.5 sind die Änderungen vergleichbar. In RCP2.6 fallen die negativen Änderungen gedämpfter aus und gehen für Februar und März gegen Null. Die Bandbreite (schattierte Flächen) umfassen positive als auch negative Änderungen. In den höheren Lagen zeigen die monatlichen Änderungen zwischen November und April einen durchwegs einen ähnlichen Verlauf, wobei die Änderungen geringer ausfallen und in RCP2.6 etwas deutlicher positiv sind. In RCP8.5 und RCP4.5 verbleiben die mittleren Änderungen auf einem ähnlichen Niveau. Grundsätzlich umfasst die Bandbreite der Änderungen der RCPs auch in diesen Höhenlagen positive und negative Werte. Das heißt, die Spannbreite der möglichen Änderungen ist recht groß (schattierte Flächen) und somit auch die Unsicherheit in den Ergebnissen. Die mittleren positiven Änderungen dürften in Zusammenhang mit der projizierten Niederschlagszunahme in den Monaten Jänner, Februar und März stehen.

In Hinblick auf die monatliche Schneedeckendauer (Anzahl der Tage mit einer Gesamtschneehöhe von mindestens 30 cm) sind ebenfalls höhenabhängige Unterschiede erkennbar. In den tiefen Lagen 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 an den Punkten bis ca. 2200 m Seehöhe im Jänner, Februar und März im Mittel zwischen 6 und 9 Tage. In den mittleren und höheren Lagen treten die größten monatlichen Abnahmen im November und Dezember auf, unabhängig von Klima-Szenario. Die Temperaturzunahme in diesen Monaten macht sich somit auch in größeren Seehöhen in Form eines geringeren Schneedeckenzuwachses bemerkbar. In den Monaten Jänner bis April schwächen sich die Abnahmen ab und gehen gegen Null. Die projizierte winterliche Niederschlagszunahme dürfte hier eine wesentliche

Rolle spielen. Darüber hinaus fällt die mittlere Temperaturerhöhung in den Monaten Februar bis April geringer aus. Grundsätzlich ist der Schneedeckenzuwachs im November und Dezember in tieferen Lagen temperaturbedingt geringer, sodass in der Vorwintersaison Änderungen weniger stark ausgeprägt sind, im Vergleich zu den höher gelegenen Punkten im Skigebiet.

Die Anzahl der möglichen Beschneisstunden in den Teilperioden an den sechs Punkten im Skigebiet wird in allen Höhenlagen abnehmen, unabhängig von Klima-Szenario (siehe Abbildungen 50 bis 55, unterste Reihe). Dies lässt den Schluss zu, dass speziell in den tiefen und mittleren Lagen die Zeitfenster für die Beschneigung im Mittel kürzer werden. In den höheren Lagen sollten die Abnahmen aufgrund der vorherrschenden niedrigen Wintertemperaturen zu keiner drastischen Verschlechterung der Rahmenbedingungen für die Beschneigung führen.

Speziell in den tieferen Lagen im Skigebiet wird die Temperaturzunahme ungünstige Auswirkungen auf die mittlere Gesamtschneehöhe, Schneedeckendauer und Beschneigung mit sich bringen. Die Temperaturzunahme wirkt sich in den höheren Lagen geringer aus, die Niederschlagssumme gewinnt an Bedeutung. Es zeigt sich aber auch, 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: 2021 bis 2050 vs. 1972 bis 2001

1 Hohe Mut Bahn I (1920 m)

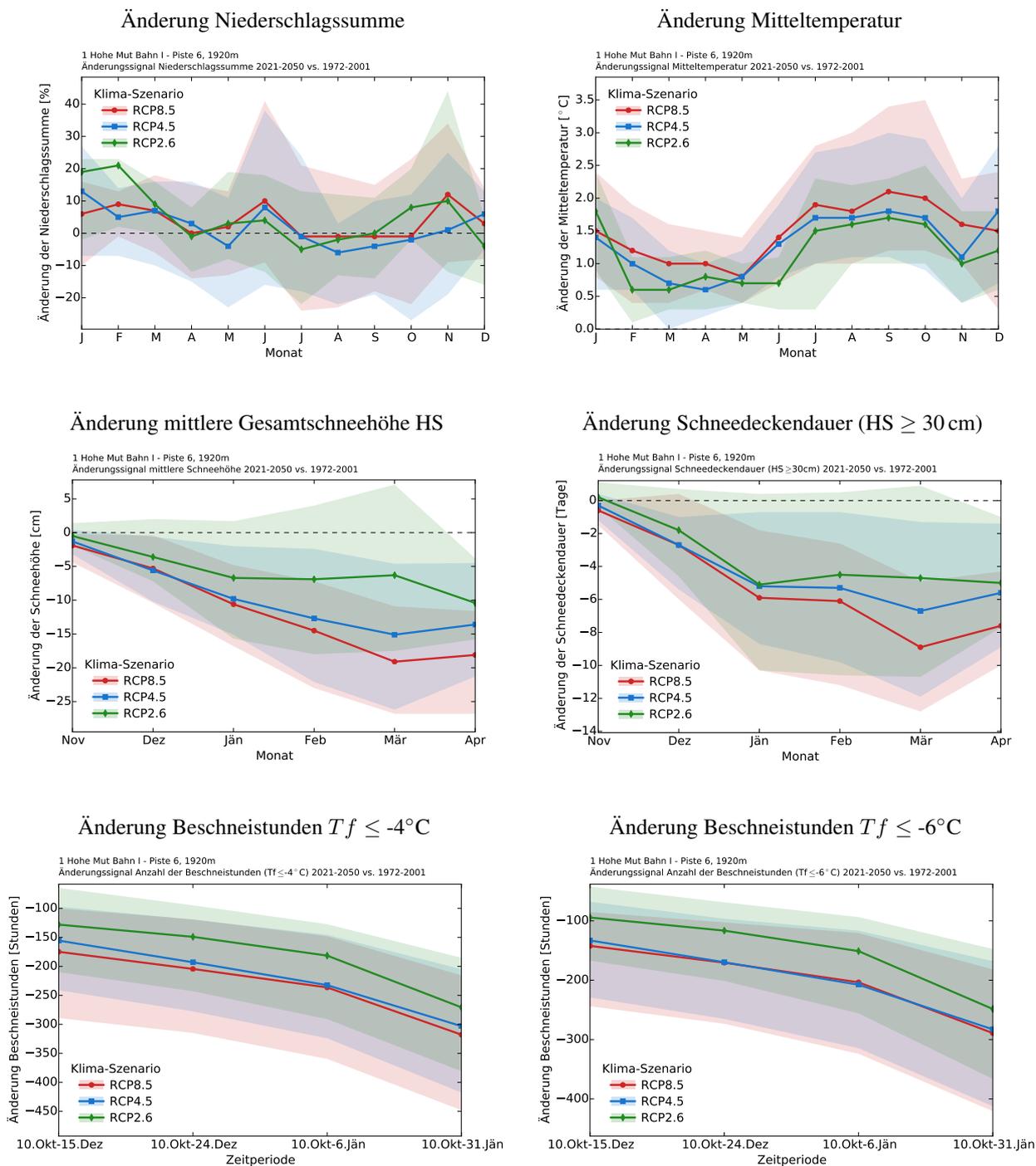


Abbildung 50: Mittlere monatliche Änderung der Niederschlagssumme, Temperatur sowie der Schneeindikatoren (Gesamtschneehöhe HS, Schneedeckendauer $HS \geq 30$ cm, beides Naturschnee) und der Anzahl der Beschneistunden ($Tf \leq -4^{\circ}C$ und $Tf \leq -6^{\circ}C$), betreffend der Perioden 2021 bis 2050 und 1972 bis 2001, am Punkt 1 Hohe Mut Bahn I (1920 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 10. Okt bis 15. Dez, 10. Okt bis 24. Dez, 10. Okt bis 6. Jän und 10. Okt bis 31. Jän.

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

2 Steinmannbahn (2170 m)

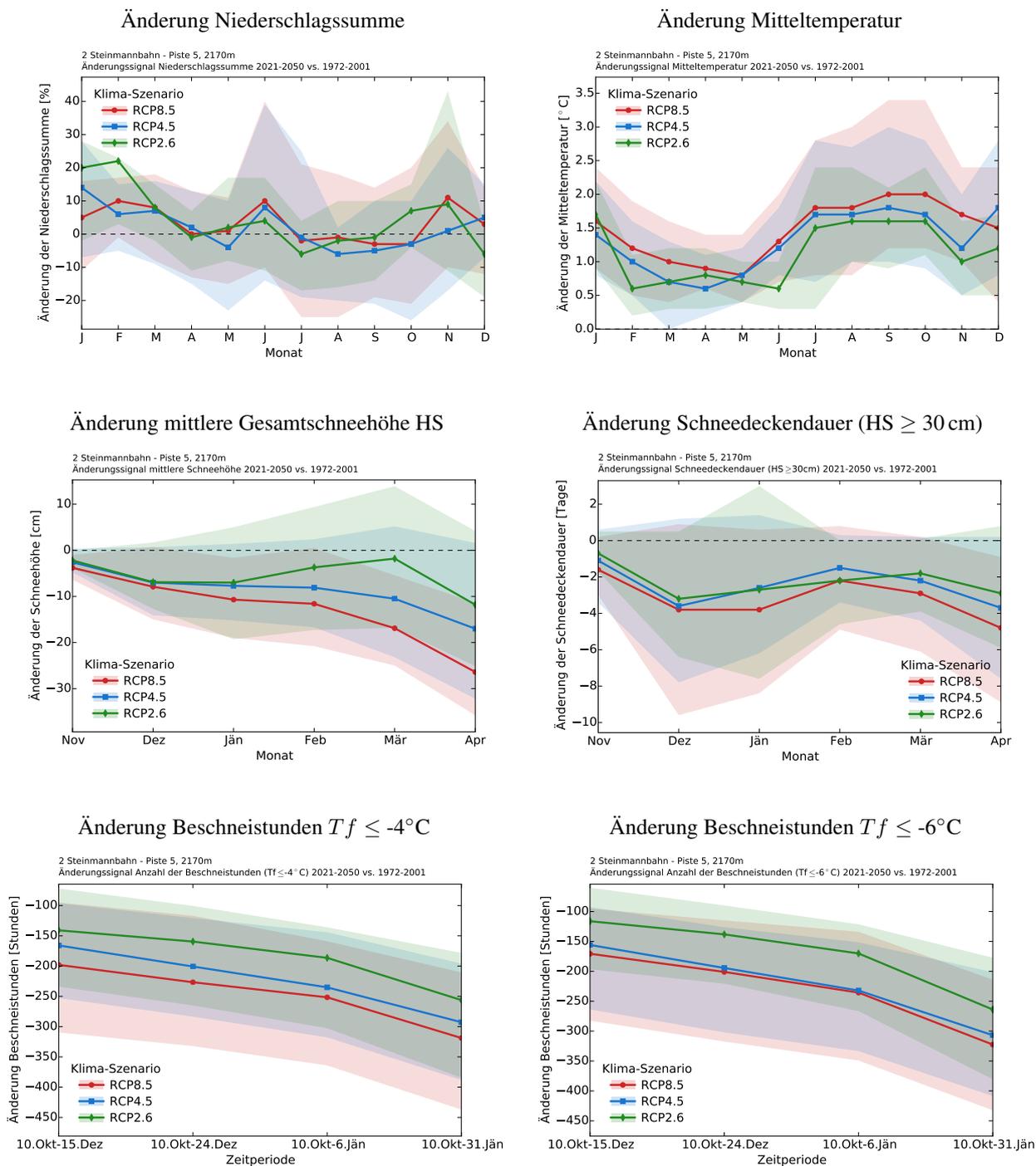


Abbildung 51: Mittlere monatliche Änderung der Niederschlagssumme, Temperatur sowie der Schneeindikatoren (Gesamtschneehöhe HS, Schneedeckendauer HS \geq 30 cm, beides Naturschnee) und der Anzahl der Beschneistunden ($Tf \leq -4^{\circ}C$ und $Tf \leq -6^{\circ}C$), betreffend der Perioden 2021 bis 2050 und 1972 bis 2001, am Punkt 2 Steinmannbahn (2170 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 10. Okt bis 15. Dez, 10. Okt bis 24. Dez, 10. Okt bis 6. Jän und 10. Okt bis 31. Jän.

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

3 Hohe Mut Bahn II (2500 m)

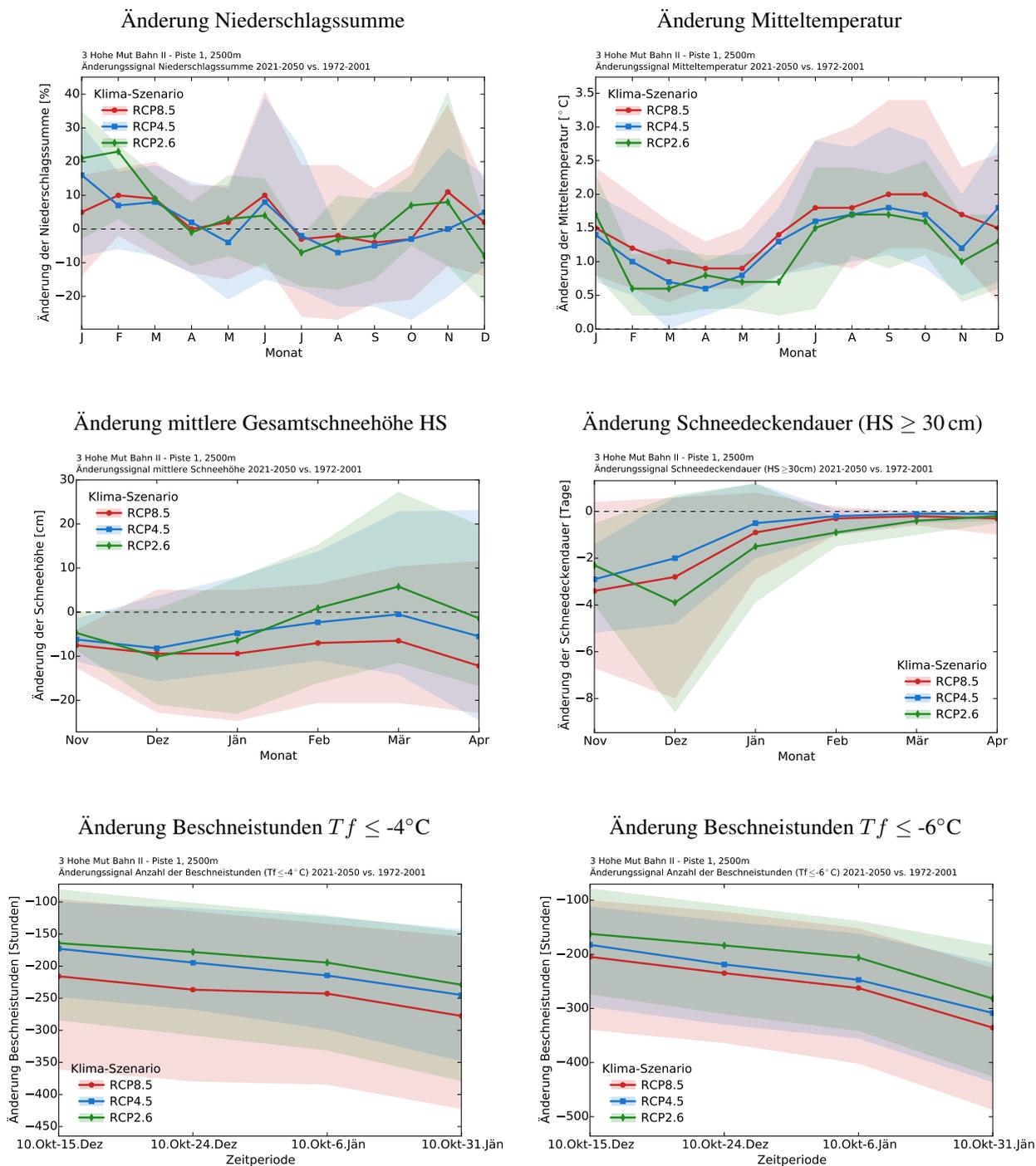


Abbildung 52: Mittlere monatliche Änderung der Niederschlagssumme, Temperatur sowie der Schneeindikatoren (Gesamtschneehöhe HS, Schneedeckendauer $HS \geq 30$ cm, beides Naturschnee) und der Anzahl der Beschneistunden ($Tf \leq -4^{\circ}C$ und $Tf \leq -6^{\circ}C$), betreffend der Perioden 2021 bis 2050 und 1972 bis 2001, am Punkt 3 Hohe Mut Bahn II (2500 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 10. Okt bis 15. Dez, 10. Okt bis 24. Dez, 10. Okt bis 6. Jän und 10. Okt bis 31. Jän.

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

4 Rosskarbahn (2400 m)

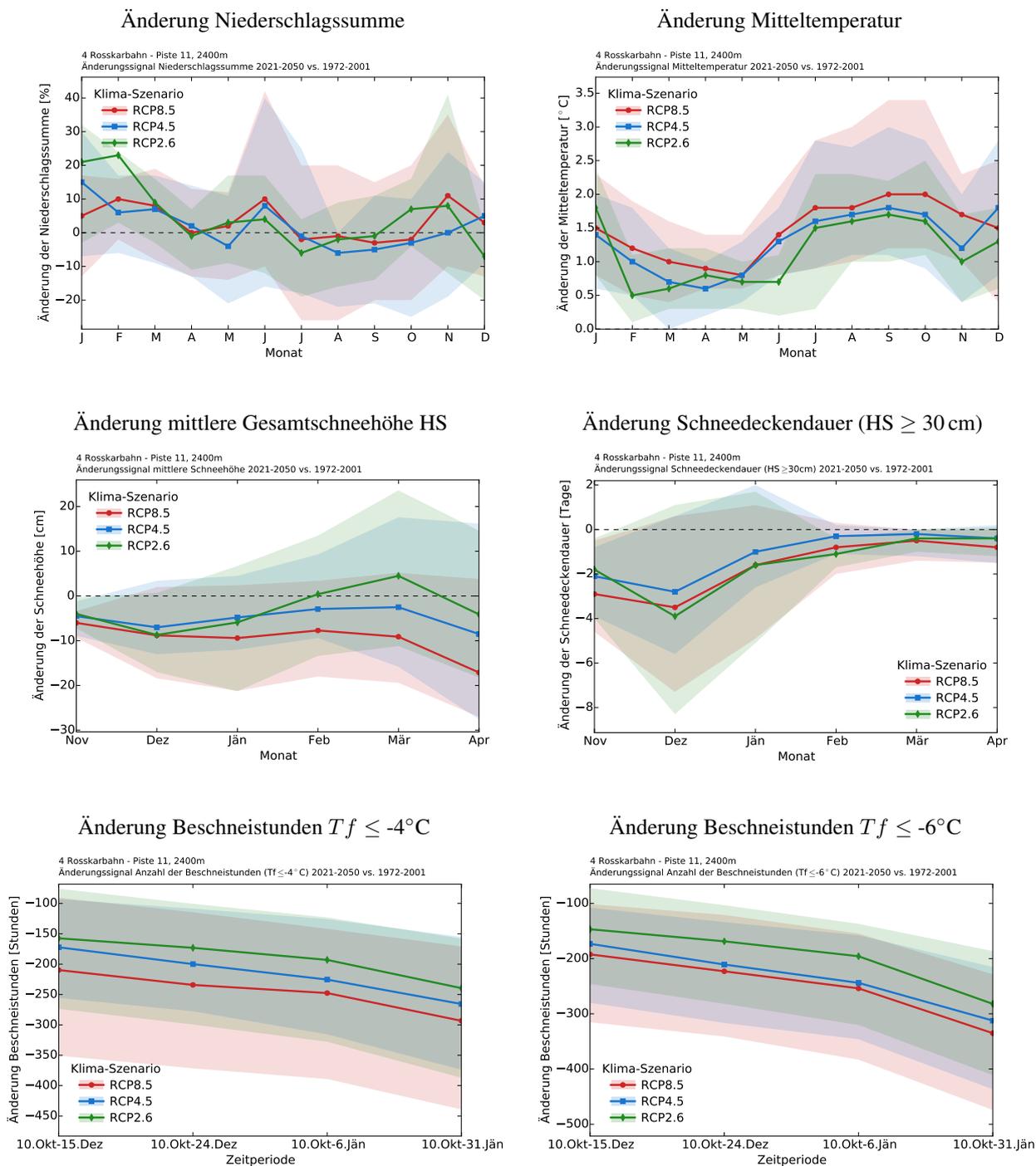


Abbildung 53: Mittlere monatliche Änderung der Niederschlagssumme, Temperatur sowie der Schneeindikatoren (Gesamtschneehöhe HS, Schneedeckendauer HS \geq 30 cm, beides Naturschnee) und der Anzahl der Beschneistunden ($Tf \leq -4^{\circ}C$ und $Tf \leq -6^{\circ}C$), betreffend der Perioden 2021 bis 2050 und 1972 bis 2001, am Punkt 4 Rosskarbahn (2400 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 10. Okt bis 15. Dez, 10. Okt bis 24. Dez, 10. Okt bis 6. Jän und 10. Okt bis 31. Jän.

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

5 Rosskarbahn (2620 m)

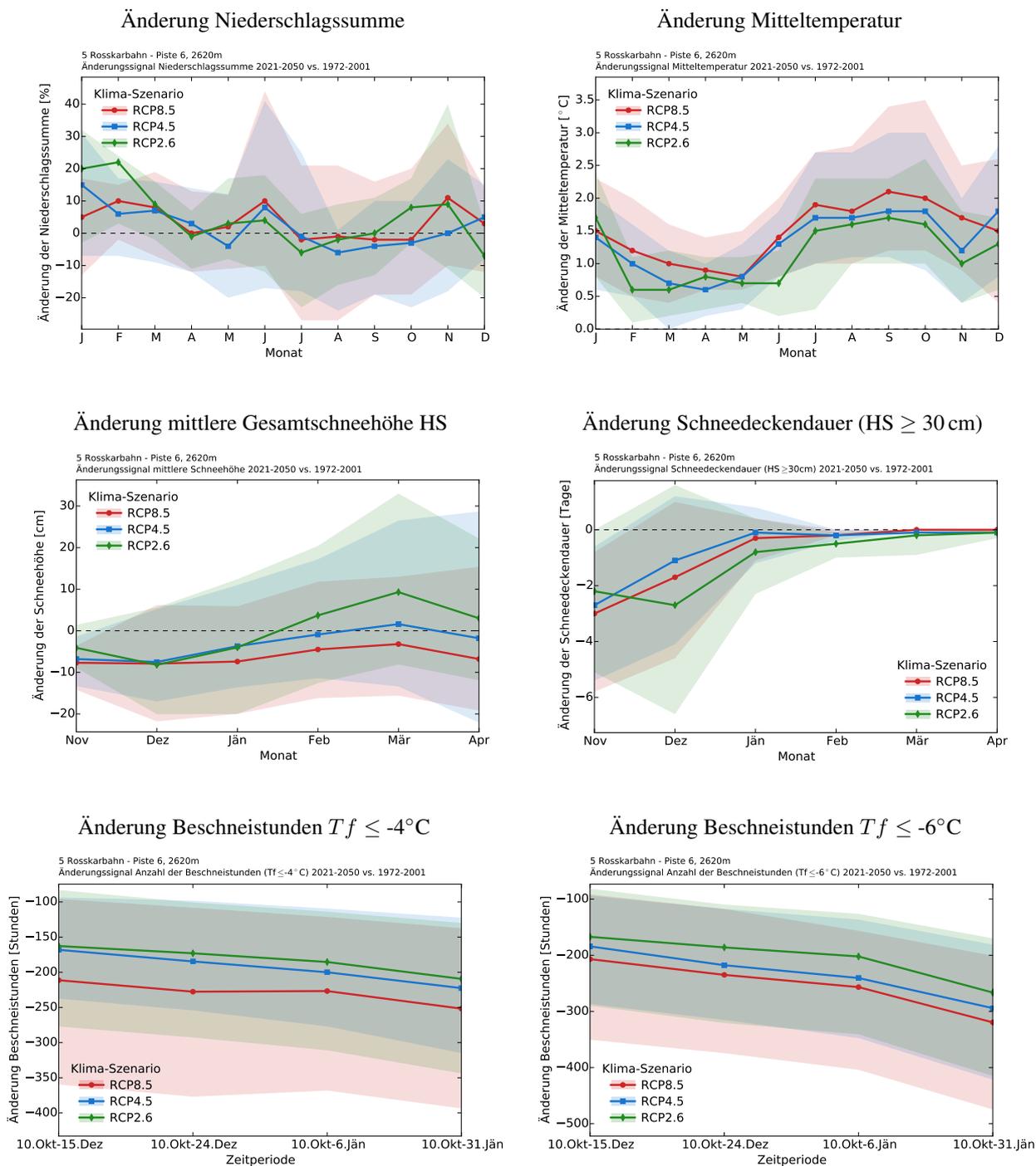


Abbildung 54: Mittlere monatliche Änderung der Niederschlagssumme, Temperatur sowie der Schneeindikatoren (Gesamtschneehöhe HS, Schneedeckendauer $HS \geq 30$ cm, beides Naturschnee) und der Anzahl der Beschneistunden ($Tf \leq -4^\circ\text{C}$ und $Tf \leq -6^\circ\text{C}$), betreffend der Perioden 2021 bis 2050 und 1972 bis 2001, am Punkt 5 Rosskarbahn (2620 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 10. Okt bis 15. Dez, 10. Okt bis 24. Dez, 10. Okt bis 6. Jän und 10. Okt bis 31. Jän.

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

6 Plattachbahn (2800 m)

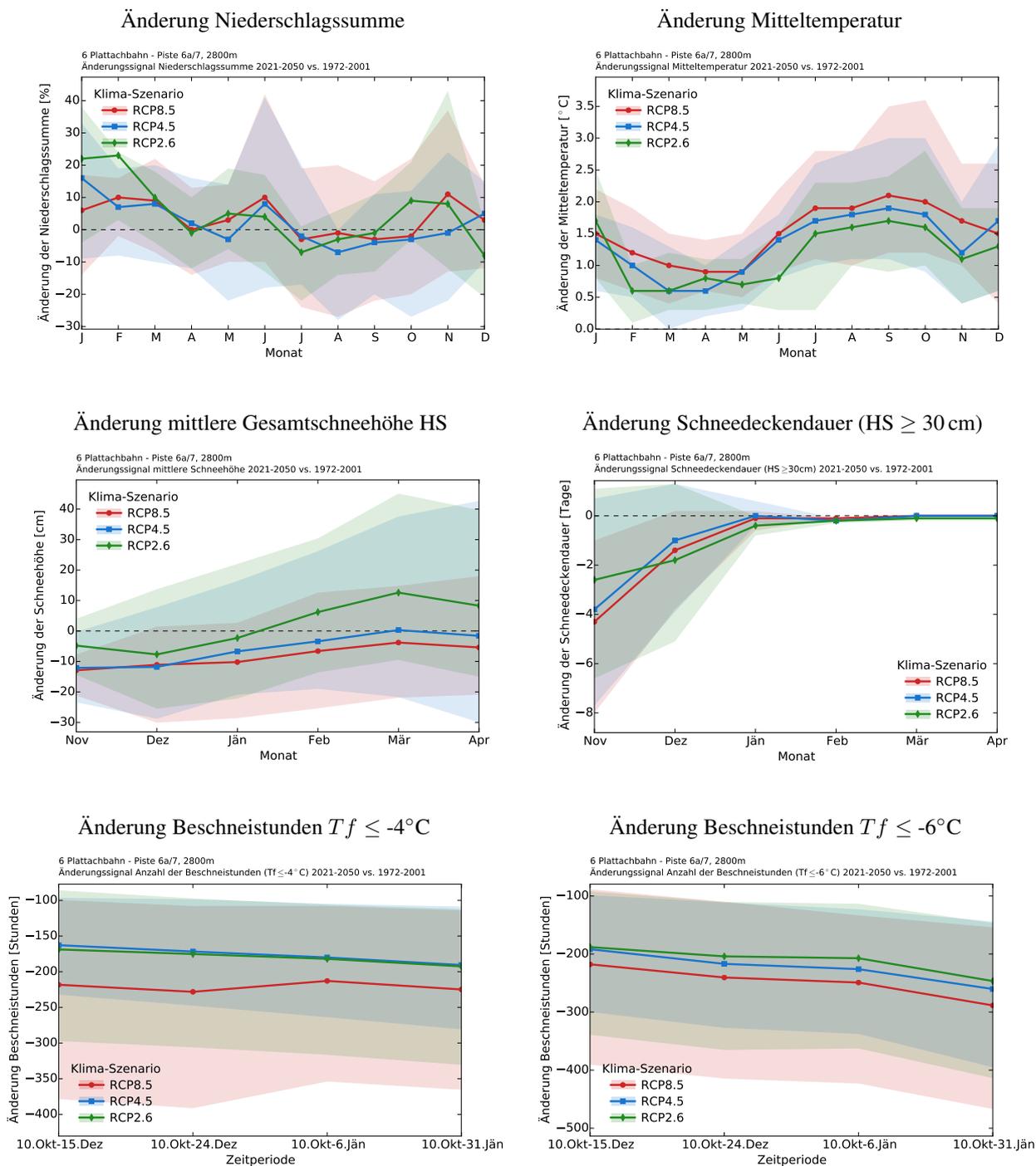


Abbildung 55: Mittlere monatliche Änderung der Niederschlagssumme, Temperatur sowie der Schneeindikatoren (Gesamtschneehöhe HS, Schneedeckendauer $HS \geq 30$ cm, beides Naturschnee) und der Anzahl der Beschneistunden ($Tf \leq -4^{\circ}C$ und $Tf \leq -6^{\circ}C$), betreffend der Perioden 2021 bis 2050 und 1972 bis 2001, am Punkt 6 Plattachbahn (2800 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 10. Okt bis 15. Dez, 10. Okt bis 24. Dez, 10. Okt bis 6. Jän und 10. Okt 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 56 bis 61 sind die mittleren monatlichen Änderungen der Niederschlagssumme, Temperatur, Gesamtschneehöhe und der Schneedeckendauer (beides Naturschnee) an den sechs Punkten im Skigebiet dargestellt. Darüber hinaus ist auch die Änderung der Anzahl der möglichen Beschneistunden als Funktion der Feuchtkugeltemperatur Tf abgebildet. Die Schwellwerte für Tf betragen -4°C und -6°C . Die Änderung der Schneeindikatoren bezieht sich auf die Monate November bis April, die der Beschneistunden auf die Perioden 10. Okt bis 15. Dez, 10. Okt bis 24. Dez, 10. Okt bis 6. Jän und 10. Okt 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 Jänner, Februar und März zunehmen, unabhängig von Klima-Szenario (z.B. mittlere Zunahme von bis zu 20% im Jänner). Hierbei ist die Bandbreite der Änderungen 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. Speziell in den Monaten Juli bis Oktober sind die Änderungen am deutlichsten ausgeprägt. RCP8.5 projiziert z.B. eine mittlere Zunahme von bis zu 5°C im Juli. Im Vergleich dazu fallen die Änderungen in RCP2.6 deutlich geringer aus (ca. 1°C). Innerhalb der erweiterten Wintersaison November bis April sind die Änderungen im Dezember und Jänner am stärksten ausgeprägt, unabhängig von Klima-Szenario und Seehöhe.

Alle drei Klima-Szenarien weisen für Lagen unterhalb von 2400 m Seehöhe (Hohe Mut Bahn I und Steinmannbahn) 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 verbleiben die mittleren Änderungen in den Monaten Jänner bis März auf einem ähnlichen Niveau. Einzig am höchsten Punkt (Plattachbahn, 2800 m) ist eine etwas deutlichere Verringerung der negativen Änderungen im Februar und März erkennbar. Die Spannbreite ist jedoch sehr groß (schattierte Flächen) und somit auch die Unsicherheit in den Ergebnissen. In RCP2.6 bewegen sich die mittleren Änderungen der Gesamtschneehöhe in den mittleren und hohen Lagen im Skigebiet um Null. Anhand der Spannbreite sind positive als auch negative Änderungen möglich. Es ist jedoch eine Tendenz hin zu leicht positiven Änderungen ab Jänner erkennbar. Dies dürfte in Zusammenhang mit der projizierten Niederschlagszunahme in den Monaten Jänner, Februar und März stehen.

In Hinblick auf die monatliche Schneedeckendauer (Anzahl der Tage mit einer Gesamtschneehöhe von mindestens 30 cm) sind ebenfalls höhenabhängige Unterschiede erkennbar. In den tiefen Lagen 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 an den Punkten bis ca. 2200 m Seehöhe im Jänner, Februar und März im Mittel zwischen 15 und 20 Tage. In diesem Klima-Szenario treten in den mittleren Lagen (ca. 2400 m) die größten negativen Änderungen im Dezember und April auf. Der Grund dafür ist die mit RCP8.5 einhergehende markante Temperaturerhöhung. In den höheren Lagen treten die größten monatlichen Abnahmen im November und Dezember auf, unabhängig von Klima-Szenario. Die Temperaturzunahme in diesen Monaten macht sich somit auch in größeren Seehöhen in Form

eines geringeren Schneedeckenzuwachses bemerkbar. In den Monaten Jänner bis April schwächen sich die Abnahmen ab und gehen schließlich gegen Null. Die projizierte winterliche Niederschlagszunahme dürfte hier eine wesentliche Rolle spielen. Darüber hinaus fällt die mittlere Temperaturerhöhung in den Monaten Jänner bis März geringer aus. Grundsätzlich ist der Schneedeckenzuwachs im November und Dezember in tieferen Lagen temperaturbedingt geringer, sodass in der Vorwintersaison Änderungen weniger stark ausgeprägt sind, im Vergleich zu den höher gelegenen Punkten im Skigebiet.

Die Anzahl der möglichen Beschneisstunden in den Teilperioden an den sechs Punkten im Skigebiet wird in allen Höhenlagen abnehmen, unabhängig von Klima-Szenario (siehe Abbildungen 56 bis 61, unterste Reihe). Dies lässt den Schluss zu, dass speziell in den tiefen und mittleren Lagen die Zeitfenster für die Beschneigung im Mittel kürzer werden. In den höheren Lagen sollten die Abnahmen aufgrund der vorherrschenden niedrigen Wintertemperaturen zu keiner drastischen Verschlechterung der Rahmenbedingungen für die Beschneigung führen.

Speziell in den tieferen Lagen im Skigebiet wird die Temperaturzunahme ungünstige Auswirkungen auf die mittlere Gesamtschneehöhe, Schneedeckendauer und Beschneigung mit sich bringen. Die Temperaturzunahme wirkt sich in den höheren Lagen geringer aus, die Niederschlagssumme gewinnt an Bedeutung. Es zeigt sich aber auch, 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 Hohe Mut Bahn I (1920 m)

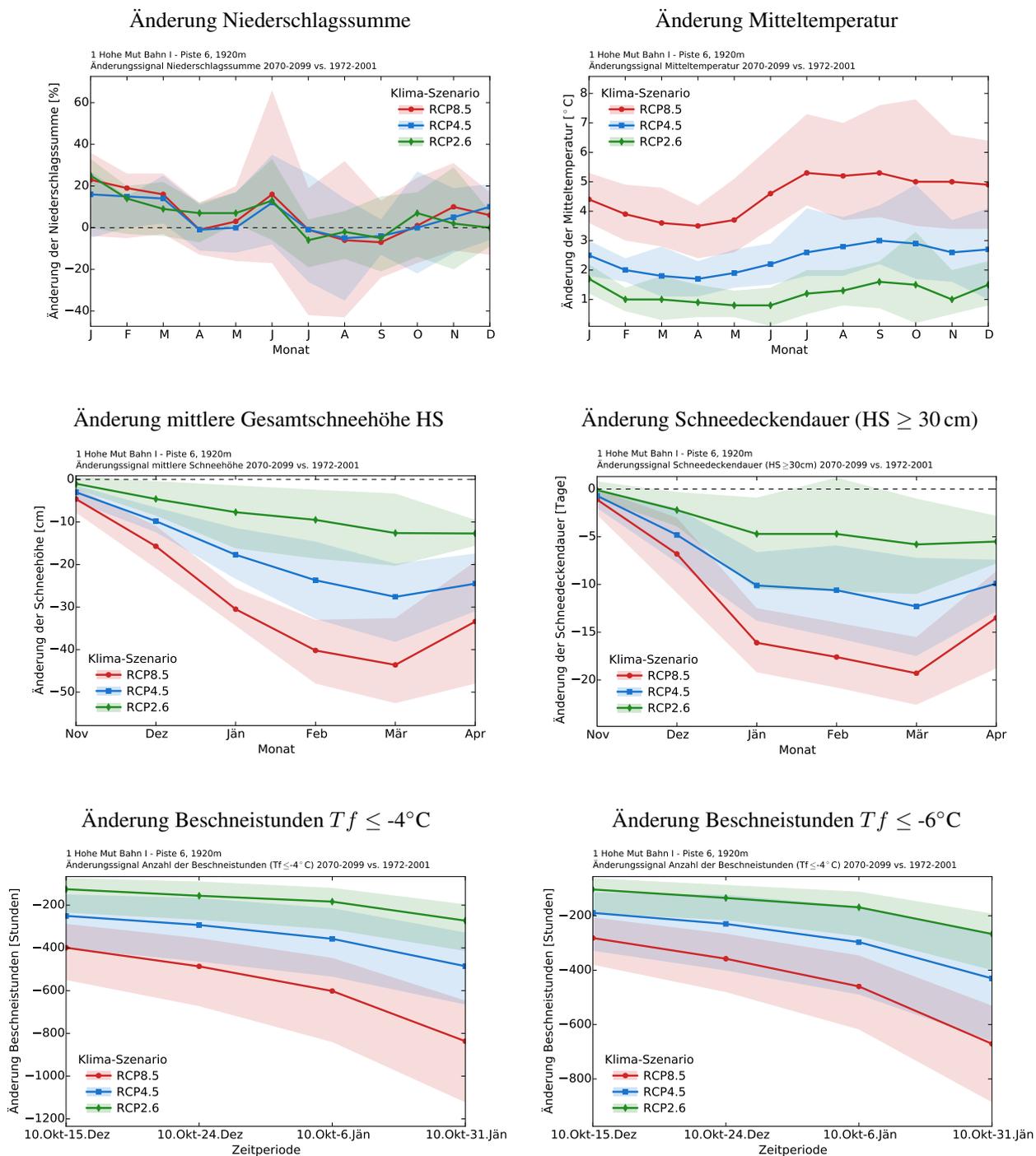


Abbildung 56: Mittlere monatliche Änderung der Niederschlagssumme, Temperatur sowie der Schneeindikatoren (Gesamtschneehöhe HS, Schneedeckendauer $HS \geq 30$ cm, beides Naturschnee) und der Anzahl der Beschneistunden ($Tf \leq -4^{\circ}C$ und $Tf \leq -6^{\circ}C$), betreffend der Perioden 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001, am Punkt 1 Hohe Mut Bahn I (1920 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 10. Okt bis 15. Dez, 10. Okt bis 24. Dez, 10. Okt bis 6. Jän und 10. Okt bis 31. Jän.

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

2 Steinmannbahn (2170 m)

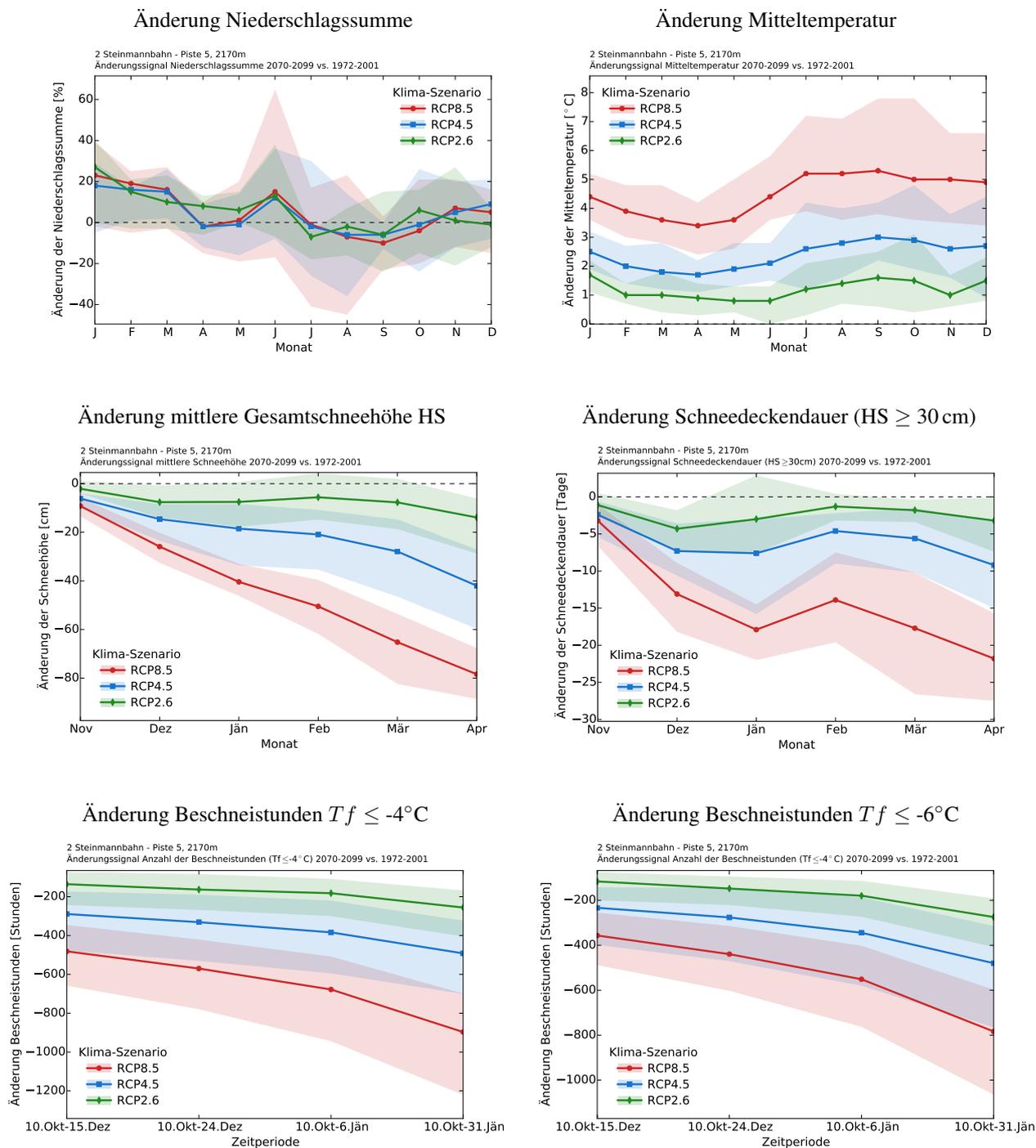


Abbildung 57: Mittlere monatliche Änderung der Niederschlagssumme, Temperatur sowie der Schneeindikatoren (Gesamtschneehöhe HS, Schneedeckendauer $HS \geq 30$ cm, beides Naturschnee) und der Anzahl der Beschneistunden ($Tf \leq -4^\circ\text{C}$ und $Tf \leq -6^\circ\text{C}$), betreffend der Perioden 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001, am Punkt 2 Steinmannbahn (2170 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 10. Okt bis 15. Dez, 10. Okt bis 24. Dez, 10. Okt bis 6. Jän und 10. Okt bis 31. Jän.

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

3 Hohe Mut Bahn II (2500 m)

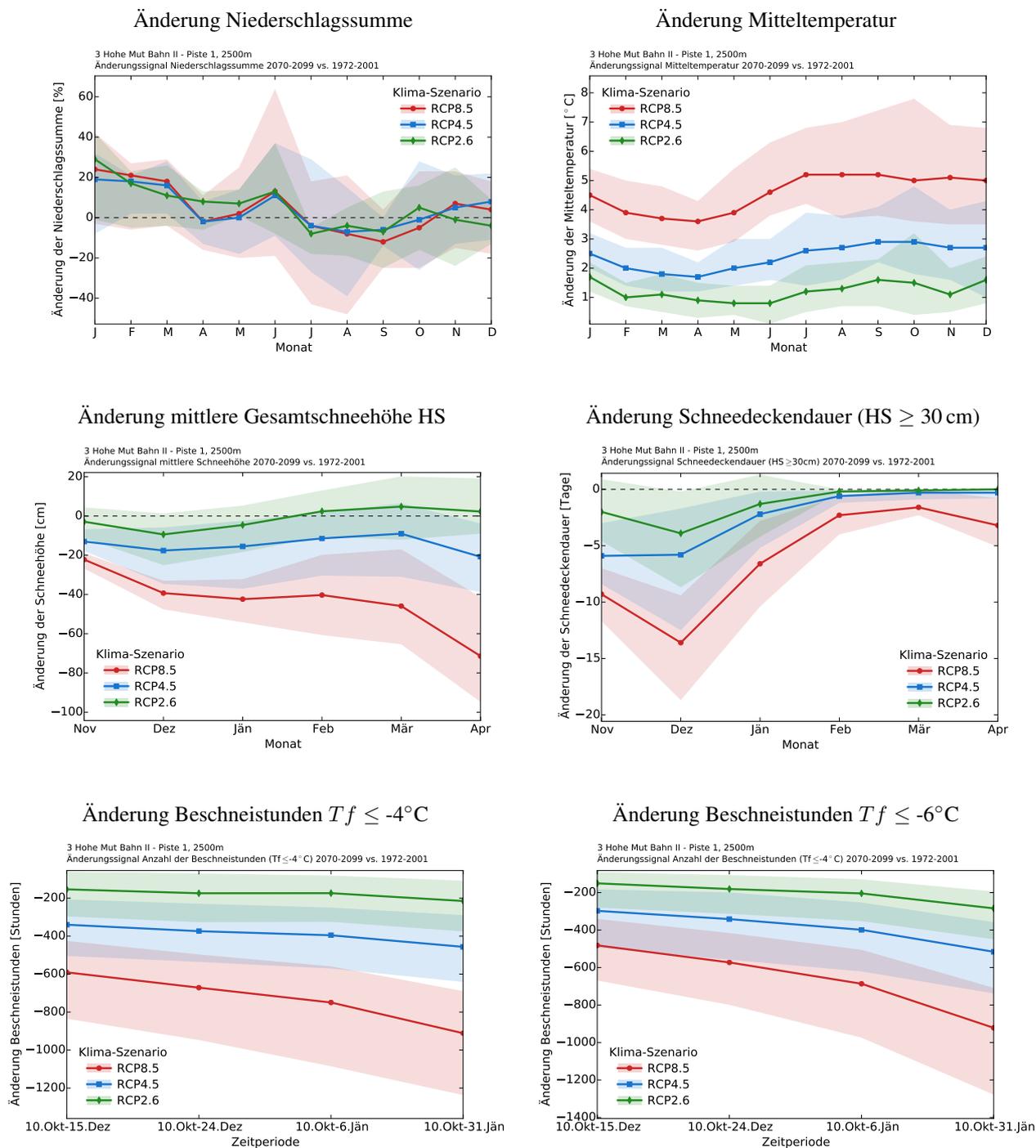


Abbildung 58: Mittlere monatliche Änderung der Niederschlagssumme, Temperatur sowie der Schneeindikatoren (Gesamtschneehöhe HS, Schneedeckendauer $HS \geq 30$ cm, beides Naturschnee) und der Anzahl der Beschneistunden ($Tf \leq -4^{\circ}\text{C}$ und $Tf \leq -6^{\circ}\text{C}$), betreffend der Perioden 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001, am Punkt 3 Hohe Mut Bahn II (2500 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 10. Okt bis 15. Dez, 10. Okt bis 24. Dez, 10. Okt bis 6. Jän und 10. Okt bis 31. Jän.

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

4 Rosskarbahn (2400 m)

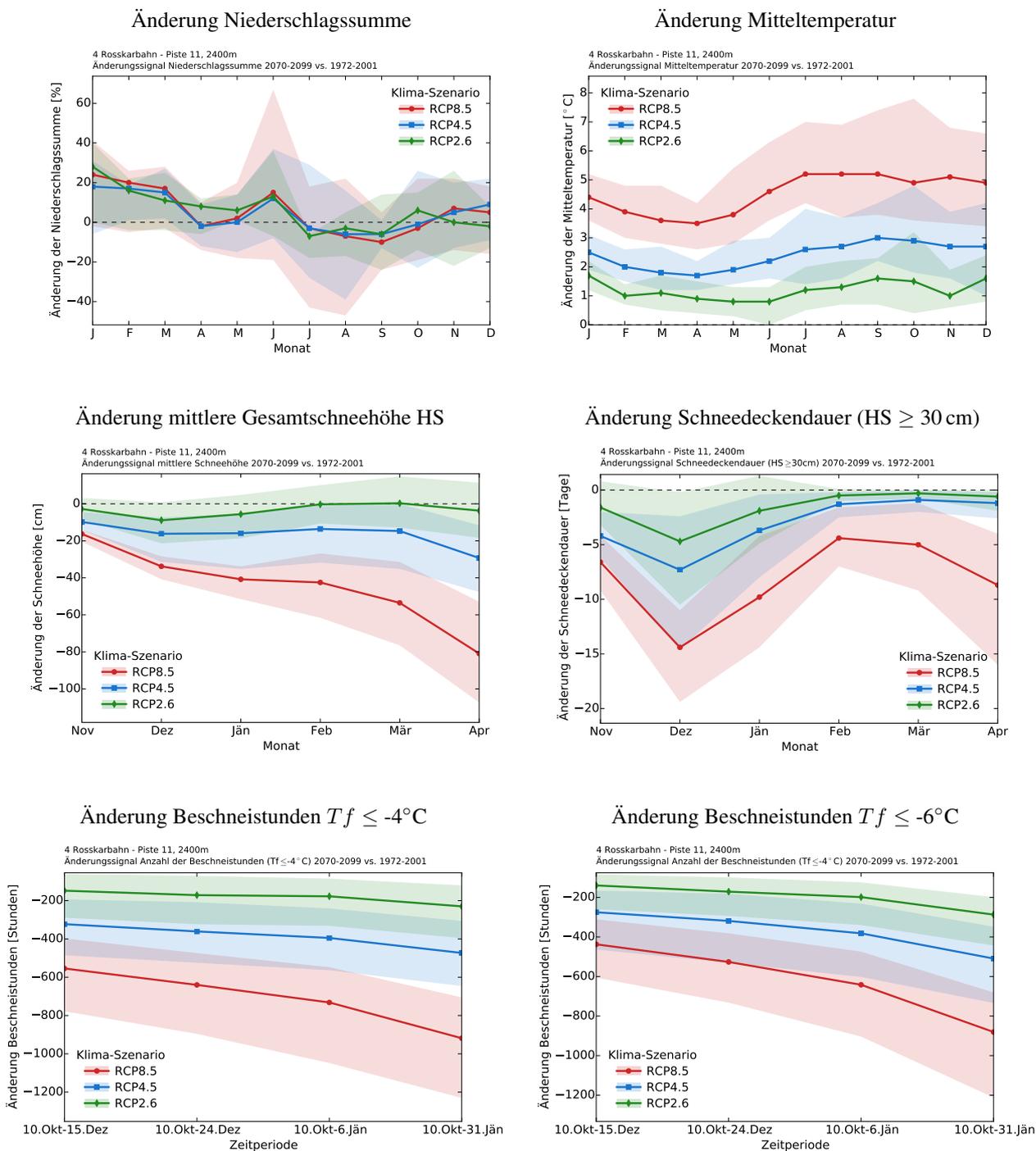


Abbildung 59: Mittlere monatliche Änderung der Niederschlagssumme, Temperatur sowie der Schneeindikatoren (Gesamtschneehöhe HS, Schneedeckendauer HS \geq 30 cm, beides Naturschnee) und der Anzahl der Beschneistunden ($Tf \leq -4^{\circ}\text{C}$ und $Tf \leq -6^{\circ}\text{C}$), betreffend der Perioden 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001, am Punkt 4 Rosskarbahn (2400 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 10. Okt bis 15. Dez, 10. Okt bis 24. Dez, 10. Okt bis 6. Jän und 10. Okt bis 31. Jän.

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

5 Rosskarbahn (2620 m)

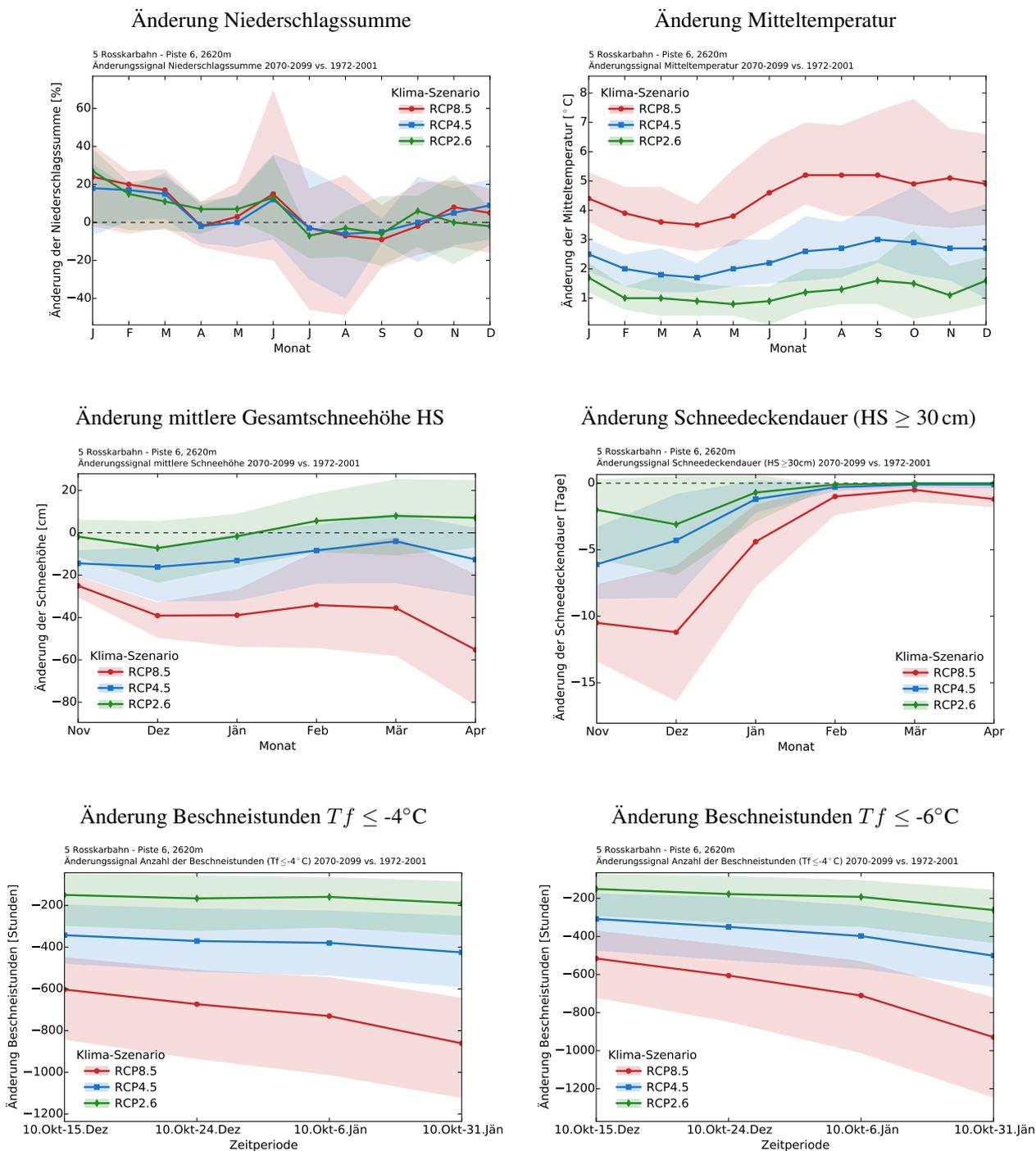


Abbildung 60: Mittlere monatliche Änderung der Niederschlagssumme, Temperatur sowie der Schneeindikatoren (Gesamtschneehöhe HS, Schneedeckendauer $HS \geq 30$ cm, beides Naturschnee) und der Anzahl der Beschneistunden ($Tf \leq -4^\circ\text{C}$ und $Tf \leq -6^\circ\text{C}$), betreffend der Perioden 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001, am Punkt 5 Rosskarbahn (2620 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 10. Okt bis 15. Dez, 10. Okt bis 24. Dez, 10. Okt bis 6. Jän und 10. Okt bis 31. Jän.

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

6 Plattachbahn (2800 m)

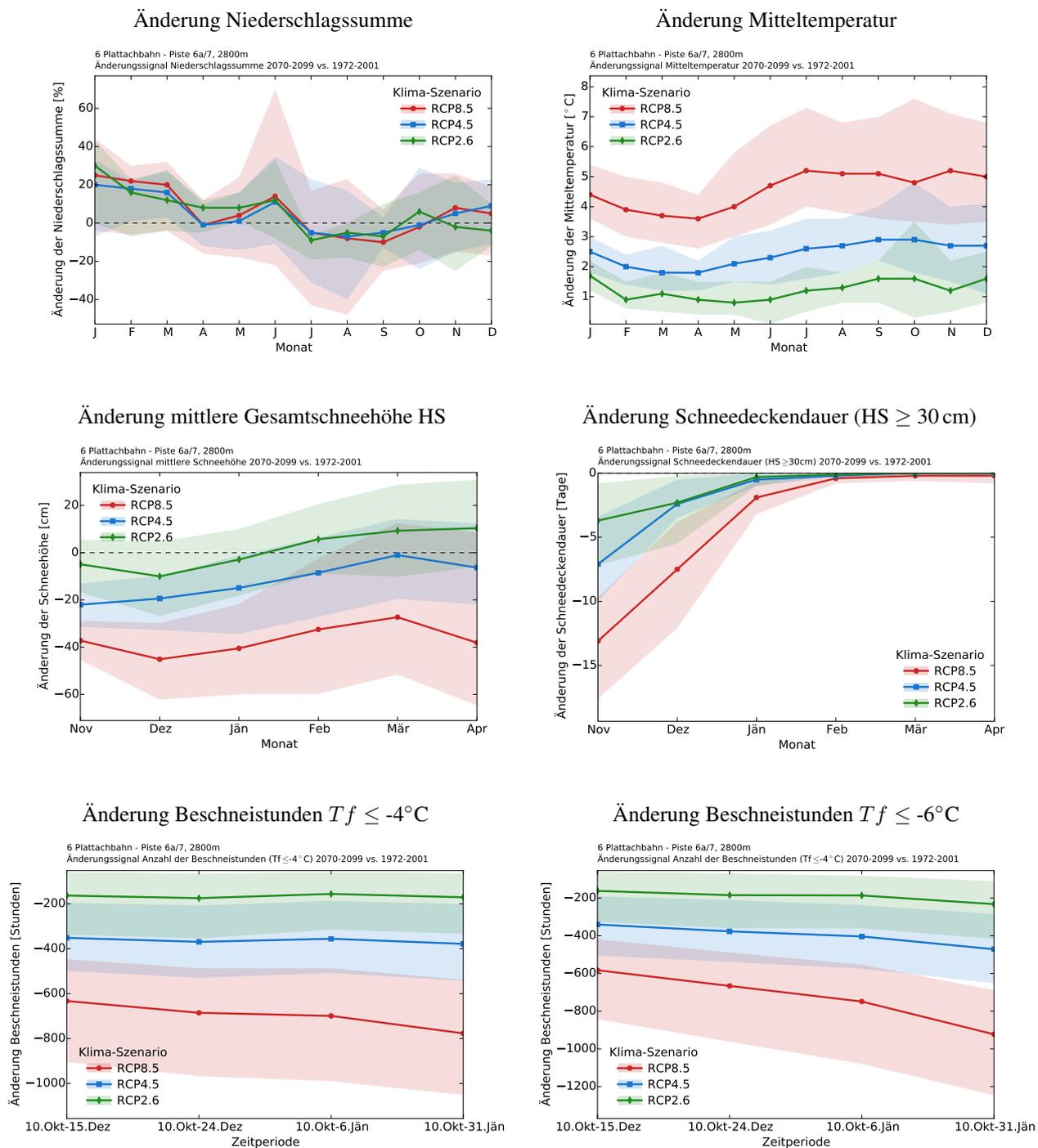


Abbildung 61: Mittlere monatliche Änderung der Niederschlagssumme, Temperatur sowie der Schneeindikatoren (Gesamtschneehöhe HS, Schneedeckendauer $HS \geq 30$ cm, beides Naturschnee) und der Anzahl der Beschneistunden ($Tf \leq -4^\circ\text{C}$ und $Tf \leq -6^\circ\text{C}$), betreffend der Perioden 2070 bis 2099 und 1972 bis 2001, am Punkt 6 Plattachbahn (2800 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 10. Okt bis 15. Dez, 10. Okt bis 24. Dez, 10. Okt bis 6. Jän und 10. Okt 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 62 zeigt die Anzahl der Tage mit Schneeproduktion sowie die Anzahl der Schneeproduktionsstunden für Punkt 1 Hohe Mut Bahn I (1920 m) und Punkt 5 Rosskarbahn (2620 m) für die Teilperioden 10. Oktober bis 31. Oktober, 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 Oktober die täglichen Produktionsstunden sowie die Produktionstage tendenziell ab (Abbildung 62, oben). Ab 2050 geht die Schneeproduktion gegen Null. Im November ist ab 2050 eine deutliche Verschiebung hin zu einer geringeren Produktion ersichtlich. Im Vergleich dazu nehmen die Produktionsstunden und Tage mit Schneeproduktion im Dezember und Jänner zu. Die Abnahme der Produktionsstunden im Oktober und November 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 Dezember und Jänner nimmt die Beschneigung zu, um die erforderliche Mindestschneehöhe halten zu können. Darüber hinaus ist im Dezember und 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 auch am höher gelegenen Punkt Rosskarbahn (2620 m) im Oktober ab, wenn gleich in abgeschwächter Form (Abbildung 62, unten). Im November steigt die Produktion bis Mitte des Jahrhunderts an, um anschließend wieder abzunehmen. Dieser abnehmende Verlauf ab ca. 2070 kann mit der Temperaturzunahme und der damit einhergehenden Verschlechterung der Rahmenbedingungen für die Beschneigung erklärt werden. Ab 2070 müssen die Schneeerzeuger vor allem im Dezember zusätzliche Betriebsstunden leisten.

Die mittleren monatlichen Schneeproduktionsstunden in den drei klimatologischen Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099 sind in Abbildung 63 für RCP8.5 und RCP2.6 gegenübergestellt. In der vergangenen Periode 1972 bis 2001 nehmen die Produktionsstunden im Oktober mit zunehmender Seehöhe zu, im November ab. Wird die zukünftige Periode 2070 bis 2099 betrachtet, so gehen die Produktionsstunden in RCP8.5 am tiefstgelegenen Punkt Hohe Mut Bahn I im Oktober gegen Null (vgl. Abbildung 62). Die Temperaturzunahme verhindert die Beschneigung. Im November 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 November ungünstiger werden. Der Schwellwert der Feuchtkugeltemperatur wird weniger oft erreicht. Im Dezember und Jänner nehmen die Produktionsstunden im Mittel zu. In diesen Monaten können zusätzliche Zeitfenster für die Beschneigung genutzt werden, um die Mindestschneehöhe halten zu können. In den höheren Lagen nehmen in der Periode 2070 bis 2099 im Oktober die Produktionsstunden ab, um im November und Dezember wieder zu steigen. Auch in diesen Lagen werden die Zeitpunkte der Schneeproduktion nach hinten verschoben.

Der Vergleich mit RCP2.6 zeigt, dass auch im Oktober in allen Höhenlagen die Produktionsstunden abnehmen, wobei die Änderungen im Mittel deutlich geringer ausfallen als in RCP8.5. In den tiefen Lagen bleiben die Produktionsstunden im November gleich, im Dezember ist eine Zunahme erkennbar. In den höheren Lagen werden im November die Produktionsstunden ansteigen.

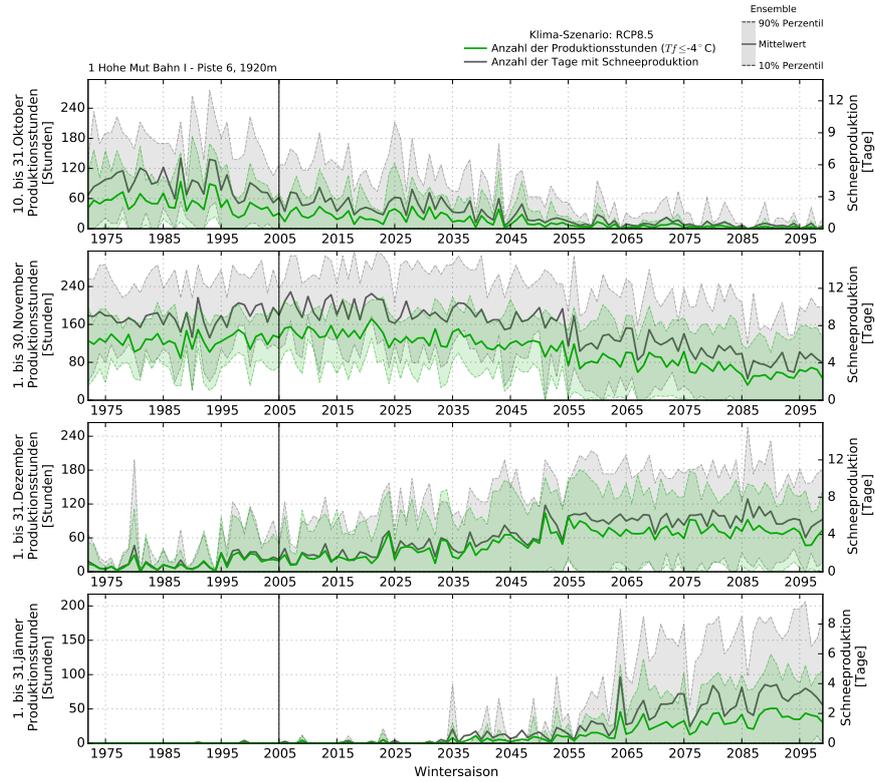
Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass in ferner Zukunft die Anzahl der Schneeproduktionsstunden in den tiefe-

ren Lagen im Oktober und November stark abnehmen wird. Die Zeitfenster zur Beschneigung werden kürzer. Im Dezember und Jänner müssen die Schneeerzeuger öfters aktiviert werden, um die Mindestschneehöhe halten zu können. Der Beginn der ersten Beschneigung wird sich in den tiefer gelegenen Lagen im Mittel nach hinten verschieben. In den höheren Lagen werden die Schneeerzeuger vor allem im November zusätzliche Betriebsstunden leisten. 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 und der Seehöhe abhängig ist. Deutlich wird auch, dass die Bandbreite der möglichen Zustände in der Periode 2070 bis 2099 sehr hoch ist, speziell in den tieferen Lagen.

Anzahl der Schneeproduktionsstunden und Tage mit Schneeproduktion RCP8.5

1 Hohe Mut Bahn I (1920 m)



5 Rosskarbahn (2620 m)

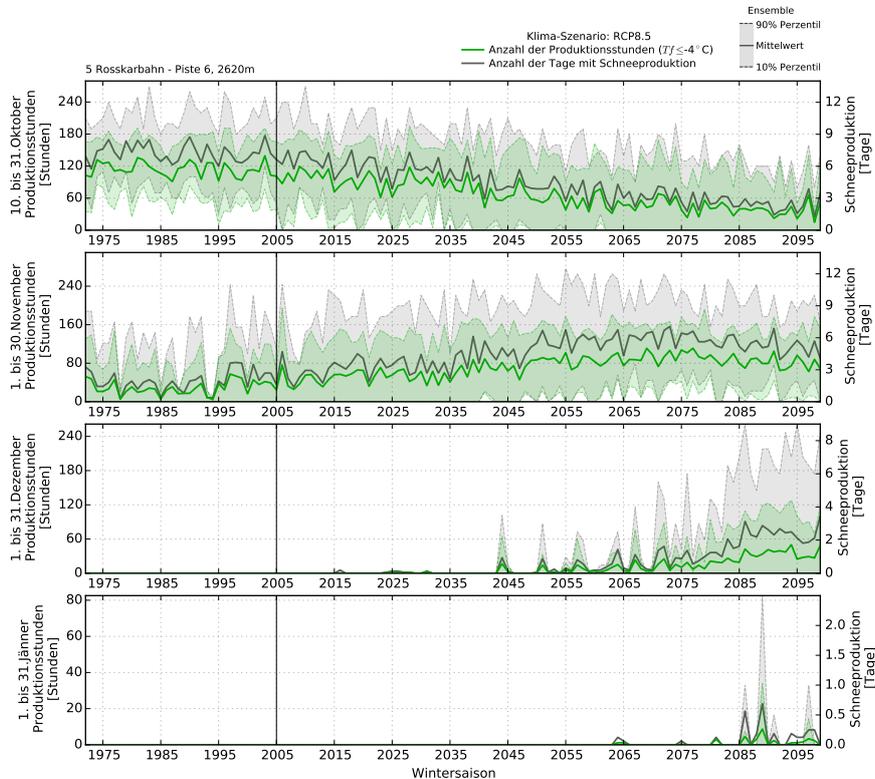
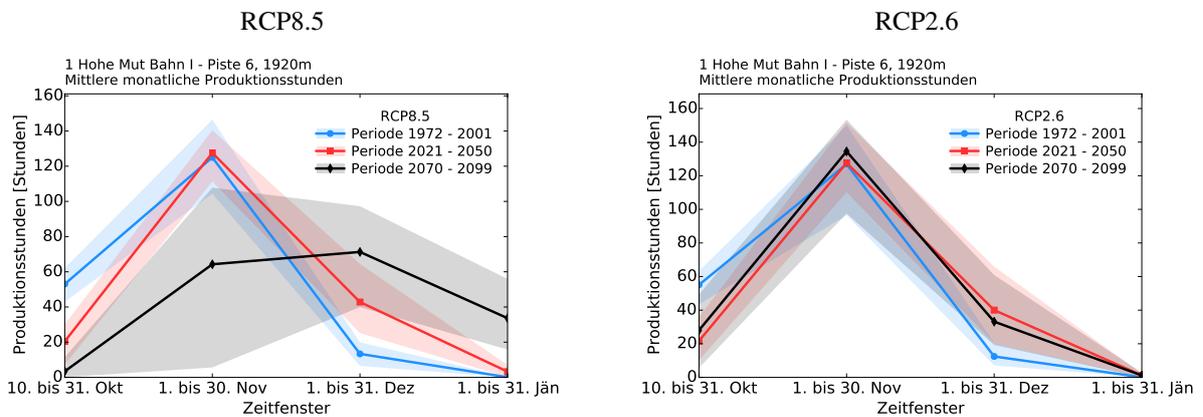


Abbildung 62: Klima-Szenario RCP8.5: Anzahl der Schneeproduktionsstunden (grün) und Tage mit Schneeproduktion (grau) an den Punkten Hohe Mut Bahn I (1920 m) und Rosskarbahn (2620 m) bis in die ferne Zukunft 2099 für unterschiedliche Teilperioden in der Wintersaison. Die dicken Linien stellen den Ensemble-Mittelwert dar. Schattierte Flächen umfassen das 10- und 90% Perzentil des Modell-Ensembles.

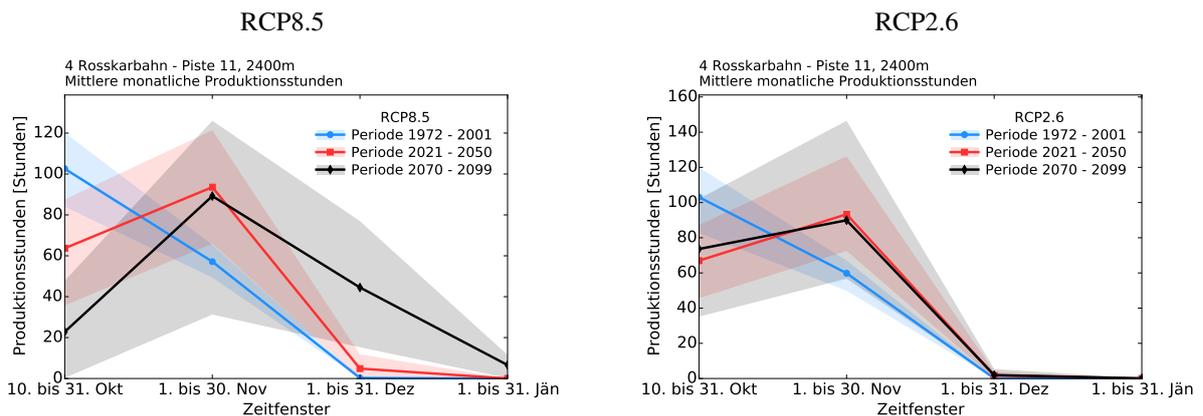
Mittlere monatliche Schneeproduktionsstunden RCP8.5 vs. RCP2.6

Perioden 1972 bis 2001, 2021 bis 2050 und 2070 bis 2099

1 Hohe Mut Bahn I (1920 m)



4 Rosskarbahn (2400 m)



5 Rosskarbahn (2620 m)

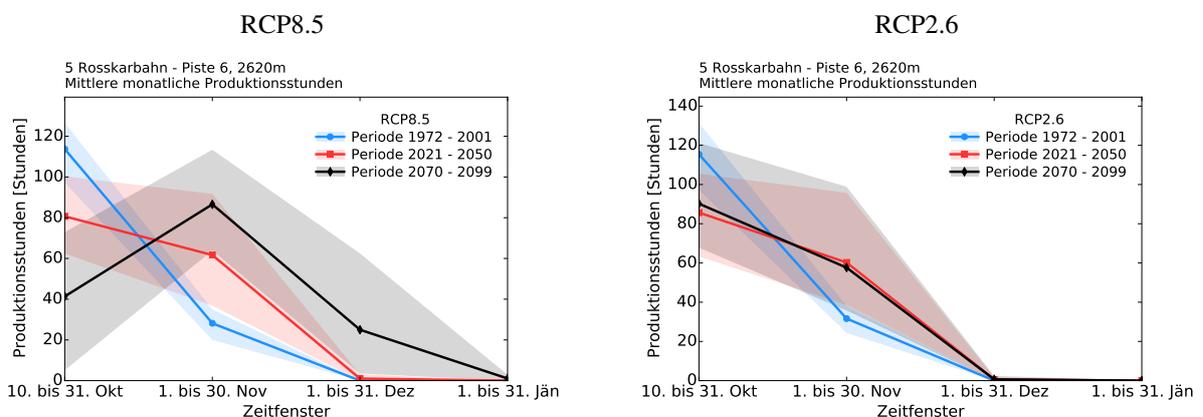


Abbildung 63: RCP8.5 vs. RCP2.6: Mittlere monatliche Schneeproduktionsstunden in den drei Perioden 1972 bis 2001 (blau), 2021 bis 2050 (rot) und 2070 bis 2099 (schwarz) für die Punkte Hohe Mut Bahn I (1920 m) sowie Rosskarbahn in 2400 m und 2620 m Seehöhe. Schattierte Flächen umfassen das 10- und 90% 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 SPARTACUS-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 SPARTACUS, 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 SPARTACUS, 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 SPARTACUS-Beobachtungsdatensatz, angegeben.

Die Niederschlagssumme innerhalb der Wintersaison NDJFMA wird im Skigebiet bis in die nahe Zukunft um bis zu 7% 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. 1,5°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 NDJFMA. Die Änderungen bewegen sich hierbei zwischen -5% und -34%, wobei die prozentualen Änderungen in tiefen und mittleren Lagen am größten sind. Im Allgemeinen ist das Änderungssignal oberhalb von 2200 m Seehöhe statistisch nicht signifikant. In den tieferen Lagen ist das Änderungssignal nicht eindeutig bzw. nicht robust. Der Grund dafür ist, dass die Abweichungen der regionalen Klimamodelle zur Beobachtung (SPARTACUS) meist zu groß sind (Modellfehler).

Auch für die Schneedeckendauer (Naturschnee) zeigt das Klimaänderungssignal in Richtung einer Abnahme, unabhängig von Seehöhe und Exposition. Das Klimaänderungssignal ist bis auf Hohe Mut Bahn I statistisch nicht signifikant. Die Erklärung ist die gleiche wie bei der Gesamtschneehöhe. An den Punkten oberhalb von 2200 m Seehöhe beträgt die Abnahme bis zu 7%. Das entspricht zwischen 5 und 10 Tage weniger. Im Gegensatz dazu betragen die Abnahmen in den tieferen Lagen zwischen 15 und 38% (19 bis 32 Tage weniger). 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 zwischen -1 und -11%. Dies entspricht einer Abnahme zwischen 2 bis 18 Tage, wobei die größte Abnahme mit 18 Tagen am tiefstgelegenen Punkt Hohe Mut Bahn I zu verzeichnen ist. Darüber hinaus ist ersichtlich, dass die Spannbreite (Unsicherheit) der Änderungen deutlich geringer ist, im Vergleich zum Änderungssignal der Schneedeckendauer ohne Berücksichtigung der technischen Schneeproduktion.

Der Beginn der Skisaison (Naturschnee) wird im Skigebiet um bis zu 10 Tage nach hinten verschoben, wobei das Änderungssignal nicht signifikant ist. Im Gegensatz dazu ist das Änderungssignal bezüglich Ende der Skisaison signifikant. Hierbei wird das Ende im Mittel zwischen 15 und 20 Tage früher eintreten. Trotz dieser Abnahmen wird das Ende der Skisaison in den mittleren und hohen Lagen im Mittel nicht vor Ende April eintreten (Tabelle 22). Mit Hilfe der technischen Beschneigung kann der Saisonstart in den höheren Lagen Ende Oktober/Anfang November erfolgen, darunter im Laufe des Novembers. Bis auf den tiefstgelegenen Punkt Hohe Mut Bahn I wird das Ende der Skisaison im Mittel nicht vor Ende April eintreten (Tabelle 23).

Das Klimaänderungssignal der Anzahl der möglichen Beschneistunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ$) ist für die Perioden 10. Oktober bis 15. Dezember, 10. Oktober bis 6. Jänner als auch für 10. Oktober bis 31. Jänner statistisch signifikant, unabhängig von der Seehöhe (Tabelle 24). In diesen Zeitfenstern beträgt die Abnahme meist zwischen 10 und 31%, 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: NDJFMA. 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]
Plattachbahn	6	2800	NW	20	424,5	426,9	457,3	30,4	7	-19,4	72,0	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	406,9	409,9	438,8	28,9	7	-9,7	67,6	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	381,4	384,5	411,2	26,7	7	-10,7	64,0	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	396,4	399,5	426,9	27,4	7	-14,0	65,3	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	363,5	367,6	392,7	25,1	7	-5,8	63,8	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	361,3	365,0	390,9	25,9	7	-1,2	62,6	

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]	
Plattachbahn	6	2800	NW	20	-8,5	-8,7	-7,2	1,4	0,8	2,5	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	-7,1	-7,2	-5,8	1,5	0,8	2,4	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	-5,5	-5,7	-4,2	1,5	0,8	2,4	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	-6,3	-6,5	-5,0	1,5	0,9	2,4	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	-4,0	-4,2	-2,7	1,5	0,9	2,4	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	-2,4	-2,5	-1,1	1,4	0,9	2,3	

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 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; Saison: NDJFMA. 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]		
Plattachbahn	6	2800	NW	20	171,1	156,0	147,6	-8,4	-5	-32,6	31,0	Grün	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	127,3	124,8	118,5	-6,2	-5	-29,5	21,1	Grün	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	94,9	93,2	83,5	-9,7	-10	-29,7	6,7	Grün	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	114,9	110,4	101,7	-8,7	-8	-31,0	10,7	Grün	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	78,8	63,4	50,5	-12,9	-20	-26,2	-2,1	Gelb	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	48,1	34,0	22,4	-11,6	-34	-18,5	-4,6	Gelb	

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]		
Plattachbahn	6	2800	NW	20	174,3	170,4	164,6	-5,9	-3	-15,8	0,8	Grün	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	165,4	161,3	156,2	-5,1	-3	-16,6	1,8	Grün	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	156,7	149,3	139,3	-10,0	-7	-23,9	-1,1	Grün	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	161,1	156,5	148,7	-7,8	-5	-22,8	0,3	Grün	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	148,5	129,1	109,9	-19,2	-15	-39,7	4,8	Gelb	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	119,8	84,4	52,7	-31,7	-38	-49,8	-12,8	Gelb	

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]		
Plattachbahn	6	2800	NW	20	181,2	181,0	179,2	-1,8	-1	-4,9	-0,2	Grün	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	180,5	180,3	177,2	-3,1	-2	-6,9	-0,9	Grün	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	178,9	178,2	173,5	-4,6	-3	-11,3	-0,6	Grün	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	179,6	179,4	175,4	-4,0	-2	-9,7	-0,7	Grün	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	175,3	174,6	166,5	-8,2	-5	-17,3	-2,0	Grün	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	169,7	167,4	149,1	-18,2	-11	-39,5	-5,1	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 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.

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

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ [Tage]	Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	1972-2001	2021-2050	Min [Tage]		Max [Tage]		
Plattachbahn	6	2800	NW	20	29. Okt	08. Nov	16. Nov	8	-2,7	20,5	Grün	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	13. Nov	20. Nov	26. Nov	6	-2,6	18,2		
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	24. Nov	04. Dez	13. Dez	9	-1,8	21,2		
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	18. Nov	26. Nov	04. Dez	8	-3,7	23,9		
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	04. Dez	22. Dez	01. Jan	10	-3,2	29,3		
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	20. Dez	11. Jan	17. Jan	6	-9,1	24,8		

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

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ [Tage]	Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	1972-2001	2021-2050	Min [Tage]		Max [Tage]		
Plattachbahn	6	2800	NW	20	28. Aug	24. Aug	09. Aug	-15	-25,9	-9,1	Rot	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	30. Jul	30. Jul	12. Jul	-18	-26,6	-10,5		
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	26. Jun	25. Jun	09. Jun	-16	-21,5	-9,9		
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	15. Jul	13. Jul	26. Jun	-17	-22,8	-9,9		
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	31. Mai	21. Mai	02. Mai	-19	-29,9	-8,6		
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	19. Apr	10. Apr	21. Mär	-20	-40,2	-9,1		

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 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.

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

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ [Tage]	Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	1972-2001	2021-2050	Min [Tage]		Max [Tage]		
Plattachbahn	6	2800	NW	20	15. Okt	19. Okt	26. Okt	7	0,5	15,8		
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	20. Okt	24. Okt	31. Okt	7	-0,6	15,6		
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	27. Okt	30. Okt	06. Nov	7	0,3	15,9		
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	24. Okt	27. Okt	03. Nov	7	-1,9	16,3		
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	03. Nov	06. Nov	14. Nov	8	2,2	18,1		
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	11. Nov	12. Nov	24. Nov	12	4,8	23,7		

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

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ [Tage]	Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	1972-2001	2021-2050	Min [Tage]		Max [Tage]		
Plattachbahn	6	2800	NW	20	31. Aug	28. Aug	17. Aug	-11	-20,3	-4,2		
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	11. Aug	12. Aug	25. Jul	-18	-24,5	-11,2		
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	09. Jul	11. Jul	26. Jun	-15	-24,0	-8,2		
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	28. Jul	28. Jul	10. Jul	-18	-25,4	-10,3		
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	16. Jun	12. Jun	28. Mai	-15	-22,7	-8,5		
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	19. Mai	14. Mai	26. Apr	-18	-27,1	-9,7		

Tabelle 24: Klima-Szenario RCP8.5: Zukünftiges Klimaänderungssignal der Anzahl der möglichen Beschneistunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$), 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 10. Okt 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.]
Plattachbahn	6	2800	NW	20	1272,4	1245,3	1027,0	-218,3	-18	-420,5	-90,8	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	1092,0	1069,8	858,5	-211,3	-20	-388,4	-87,6	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	903,9	887,8	678,1	-209,7	-24	-384,6	-80,4	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	997,2	979,0	763,2	-215,8	-22	-393,0	-85,9	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	732,7	722,9	525,0	-198,0	-27	-385,0	-69,4	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	573,7	566,0	391,3	-174,8	-31	-334,6	-55,7	

Anzahl der möglichen Beschneistunden 10. Okt 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.]
Plattachbahn	6	2800	NW	20	1708,3	1706,8	1493,9	-212,9	-12	-405,2	-101,2	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	1531,3	1534,4	1307,6	-226,7	-15	-427,4	-103,3	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	1325,6	1336,1	1088,5	-247,6	-19	-483,9	-107,3	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	1430,7	1438,4	1195,6	-242,8	-17	-467,3	-105,9	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	1120,2	1136,5	884,9	-251,6	-22	-532,5	-97,7	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	910,7	933,1	696,8	-236,3	-25	-503,0	-85,0	

Anzahl der möglichen Beschneistunden 10. Okt 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.]
Plattachbahn	6	2800	NW	20	2295,8	2297,8	2072,9	-224,9	-10	-420,2	-107,3	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	2105,0	2114,3	1862,5	-251,7	-12	-458,8	-114,6	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	1870,0	1889,7	1596,5	-293,3	-16	-543,9	-130,5	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	1991,6	2007,5	1729,9	-277,6	-14	-512,2	-122,4	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	1614,8	1646,8	1328,0	-318,8	-19	-628,8	-136,4	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	1342,1	1385,2	1067,5	-317,7	-23	-624,7	-138,8	

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 NDJFMA wird im Skigebiet bis in die ferne Zukunft um bis zu 13% 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. 4°C zunehmen, unabhängig von der Seehöhe (Tabelle 25).

RCP8.5 projiziert für die ferne Zukunft in allen Seehöhen und Expositionen eine deutliche Abnahme der Gesamtschneehöhe (Naturschnee) innerhalb der Wintersaison NDJFMA (Tabelle 26). Die negativen Änderungen bewegen sich hierbei zwischen -24% und -82%, wobei die prozentualen Änderungen in tiefen und mittleren Lagen am größten sind. Im Allgemeinen ist das Änderungssignal statistisch signifikant.

Auch für die Schneedeckendauer (Naturschnee) zeigt das Klimaänderungssignal in Richtung einer Abnahme, unabhängig von Seehöhe und Exposition. 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 in den tieferen Lagen im Mittel zwischen 74 und 88 Tagen ab. Die Abnahmen werden mit zunehmender Höhe geringer. Die Änderungen betragen oberhalb von 2400 m dennoch zwischen -23 und -48 Tage. Auch ist die Spannbreite der möglichen Änderungen sehr hoch. Mit Hilfe der technischen Schneeproduktion fallen die negativen Änderungen deutlich geringer aus, sind aber dennoch statistisch signifikant. Die Abnahmen betragen in Lagen oberhalb von ca. 2200 m Seehöhe im Mittel zwischen 11 und 28 Tage, darunter bis zu 85 Tage.

Der Beginn der Skisaison (Naturschnee) wird im Skigebiet um bis zu 37 Tage nach hinten verschoben, wobei das Änderungssignal bis auf Hohe Mut Bahn I statistisch signifikant ist. Die Änderung für Hohe Mut Bahn I ist hierbei unklar. Die Spannbreite der Änderung beträgt zwischen -18 und 40 Tagen. Das Änderungssignal bezüglich Ende der Skisaison ist für alle Höhenlagen signifikant. Das Ende wird im Mittel zwischen 52 und 64 Tage früher eintreten (Tabelle 27). Oberhalb von ca. 2400 m führen die Änderungen im Mittel jedoch zu keiner vorzeitigen Beendigung der Skisaison. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Spannbreite der möglichen Änderungen teilweise recht hoch ist. Die technische Beschneigung führt zu einer markanten Verlängerung der Skisaison. Der Beginn wird dennoch in den hohen Lagen von Oktober hin zu November verschoben, in den mittleren und tiefen Lagen von November hin zu Dezember. Einzig in den tiefen Lagen wird das Ende der Skisaison im Mittel vor Ende April eintreten (Tabelle 28).

Das Klimaänderungssignal der Anzahl der möglichen Beschneistunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$) ist für die Perioden 10. Oktober bis 15. Dezember, 10. Oktober bis 6. Jänner als auch für 10. Oktober bis 31. Jänner statistisch signifikant, unabhängig von der Seehöhe. Hierbei zeigt das Änderungssignal im Mittel eine Halbierung der möglichen Beschneistunden (Tabelle 29).

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: NDJFMA. 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]	2070-2099 [mm]	Δ [mm]	Δ [%]	Min [mm]		Max [mm]
Plattachbahn	6	2800	NW	20	424,5	426,9	481,4	54,6	13	-47,8	144,4	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	406,9	409,9	459,7	49,8	12	-29,9	123,1	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	381,4	384,5	429,0	44,5	12	-28,2	113,0	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	396,4	399,5	445,1	45,6	11	-35,6	121,6	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	363,5	367,6	407,9	40,3	11	-18,3	99,5	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	361,3	365,0	408,2	43,1	12	-10,6	97,8	

Temperatur

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannweite		Sig
					1972-2001 [°C]	1972-2001 [°C]	2070-2099 [°C]	Δ [°C]	Min [°C]	Max [°C]	
Plattachbahn	6	2800	NW	20	-8,5	-8,7	-4,4	4,3	3,3	6,6	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	-7,1	-7,2	-3,0	4,2	3,2	6,4	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	-5,5	-5,7	-1,4	4,2	3,2	6,2	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	-6,3	-6,5	-2,2	4,3	3,3	6,4	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	-4,0	-4,2	0,1	4,2	3,1	6,1	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	-2,4	-2,5	1,7	4,2	3,1	6,2	

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 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; Saison: NDJFMA. 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]
Plattachbahn	6	2800	NW	20	171,1	156,0	119,2	-36,8	-24	-65,0	-5,8	Rot
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	127,3	124,8	86,8	-38,0	-30	-58,8	-9,3	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	94,9	93,2	48,5	-44,6	-48	-63,4	-19,4	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	114,9	110,4	66,8	-43,6	-39	-67,5	-14,5	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	78,8	63,4	18,5	-44,9	-71	-55,4	-36,5	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	48,1	34,0	6,0	-27,9	-82	-35,8	-18,2	Gelb

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]
Plattachbahn	6	2800	NW	20	174,3	170,4	147,3	-23,1	-14	-43,1	-14,4	Rot
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	165,4	161,3	132,5	-28,8	-18	-53,4	-15,5	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	156,7	149,3	100,5	-48,8	-33	-95,0	-20,8	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	161,1	156,5	119,9	-36,7	-23	-77,0	-17,0	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	148,5	129,1	41,6	-87,5	-68	-112,8	-57,6	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	119,8	84,4	10,1	-74,3	-88	-96,0	-51,2	Rot

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]
Plattachbahn	6	2800	NW	20	181,2	181,0	170,0	-11,0	-6	-33,5	-2,3	Rot
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	180,5	180,3	162,9	-17,4	-10	-48,4	-6,6	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	178,9	178,2	150,3	-27,9	-16	-88,5	-10,1	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	179,6	179,4	156,9	-22,5	-13	-66,6	-9,1	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	175,3	174,6	123,4	-51,2	-29	-133,3	-18,3	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	169,7	167,4	81,9	-85,4	-51	-158,7	-49,2	

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 dem Beobachtungsdatensatz SPARTACUS. 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		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannbreite			Sig
					1972-2001	1972-2001	2070-2099	Δ [Tage]	Min [Tage]	Max [Tage]		
Plattachbahn	6	2800	NW	20	29. Okt	08. Nov	06. Dez	28	17,4	47,5		
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	13. Nov	20. Nov	19. Dez	29	15,2	46,5		
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	24. Nov	04. Dez	07. Jan	34	13,8	51,4		
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	18. Nov	26. Nov	29. Dez	33	14,7	60,3		
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	04. Dez	22. Dez	28. Jan	37	24,3	59,4		
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	20. Dez	11. Jan	28. Jan	17	-17,7	39,6		

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

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannbreite			Sig
					1972-2001	1972-2001	2070-2099	Δ [Tage]	Min [Tage]	Max [Tage]		
Plattachbahn	6	2800	NW	20	28. Aug	24. Aug	03. Jul	-52	-75,4	-38,8		
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	30. Jul	30. Jul	06. Jun	-54	-70,5	-39,9		
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	26. Jun	25. Jun	30. Apr	-56	-78,3	-37,7		
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	15. Jul	13. Jul	21. Mai	-53	-68,0	-39,0		
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	31. Mai	21. Mai	18. Mär	-64	-95,7	-47,7		
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	19. Apr	10. Apr	15. Feb	-54	-101,1	-26,3		

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 dem Beobachtungsdatensatz SPARTACUS. 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		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannbreite		
					1972-2001	1972-2001	2070-2099	Δ [Tage]	Min [Tage]	Max [Tage]	Sig
Plattachbahn	6	2800	NW	20	15. Okt	19. Okt	09. Nov	21	10,3	46,7	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	20. Okt	24. Okt	18. Nov	25	11,2	56,2	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	27. Okt	30. Okt	29. Nov	30	11,0	68,1	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	24. Okt	27. Okt	24. Nov	28	10,6	64,5	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	03. Nov	06. Nov	10. Dez	34	14,0	74,1	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	11. Nov	12. Nov	21. Dez	39	22,9	77,8	

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

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannbreite		
					1972-2001	1972-2001	2070-2099	Δ [Tage]	Min [Tage]	Max [Tage]	Sig
Plattachbahn	6	2800	NW	20	31. Aug	28. Aug	13. Jul	-46	-72,6	-27,6	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	11. Aug	12. Aug	20. Jun	-53	-75,3	-41,8	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	09. Jul	11. Jul	22. Mai	-50	-73,4	-35,6	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	28. Jul	28. Jul	06. Jun	-52	-75,0	-38,5	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	16. Jun	12. Jun	18. Apr	-55	-78,4	-37,4	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	19. Mai	14. Mai	17. Mär	-58	-73,2	-41,9	

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 10. Okt bis 15. Dez

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannweite		Sig	
					1972-2001 [Std.]	1972-2001 [Std.]	2070-2099 [Std.]	Δ [Std.]	Δ [%]	Min [Std.]		Max [Std.]
Plattachbahn	6	2800	NW	20	1272,4	1245,3	612,4	-632,9	-51	-1035,6	-325,5	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	1092,0	1069,8	466,7	-603,2	-56	-923,8	-341,7	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	903,9	887,8	333,5	-554,3	-62	-837,3	-340,5	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	997,2	979,0	388,3	-590,8	-60	-902,0	-354,9	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	732,7	722,9	241,5	-481,4	-67	-726,6	-305,3	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	573,7	566,0	166,8	-399,2	-71	-573,0	-263,2	

Anzahl der möglichen Beschneistunden 10. Okt bis 06. Jän

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannweite		Sig	
					1972-2001 [Std.]	1972-2001 [Std.]	2070-2099 [Std.]	Δ [Std.]	Δ [%]	Min [Std.]		Max [Std.]
Plattachbahn	6	2800	NW	20	1708,3	1706,8	1007,6	-699,2	-41	-1228,3	-354,3	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	1531,3	1534,4	804,0	-730,4	-48	-1192,3	-427,3	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	1325,6	1336,1	604,4	-731,7	-55	-1135,5	-471,2	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	1430,7	1438,4	688,9	-749,5	-52	-1175,4	-465,1	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	1120,2	1136,5	458,6	-677,8	-60	-1057,0	-454,9	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	910,7	933,1	331,2	-601,9	-65	-883,5	-418,0	

Anzahl der möglichen Beschneistunden 10. Okt bis 31. Jän

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP8.5 ENS-Mittel		Δ Spannweite		Sig	
					1972-2001 [Std.]	1972-2001 [Std.]	2070-2099 [Std.]	Δ [Std.]	Δ [%]	Min [Std.]		Max [Std.]
Plattachbahn	6	2800	NW	20	2295,8	2297,8	1520,8	-777,0	-34	-1448,1	-395,2	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	2105,0	2114,3	1253,0	-861,2	-41	-1496,1	-515,8	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	1870,0	1889,7	971,3	-918,4	-49	-1510,4	-614,8	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	1991,6	2007,5	1096,1	-911,4	-45	-1531,7	-585,5	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	1614,8	1646,8	749,9	-896,9	-54	-1387,0	-629,0	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	1342,1	1385,2	548,5	-836,7	-60	-1266,8	-602,3	

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 NDJFMA wird im Skigebiet bis in die ferne Zukunft um 10% 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. 1,2°C zunehmen, unabhängig von der Seehöhe (Tabelle 30).

In RCP2.6 fallen die projizierten Änderungen, betreffend der Schneindikatoren, deutlich schwächer aus, im Vergleich zu RCP8.5. Das zukünftige Klimaänderungssignal der mittleren Gesamtschneehöhe (Naturschnee, Tabelle 31) zeigt für die Punkte unterhalb von 2600 m eine gewisse Abnahme, darüber eine schwache Zunahme innerhalb der Wintersaison NDJFMA. Im Allgemeinen ist das Änderungssignal statistisch nicht signifikant. Die Änderungen in Lagen oberhalb von 2200 m Seehöhe bewegen sich im niedrigen einstelligen Prozentbereich (Änderungen von -4 bis 1%). In den tiefen Lagen beträgt die Änderung im Mittel bis zu -24% (entspricht einer Abnahme von 8 cm).

Die Änderung der Schneedeckendauer (Naturschnee) beträgt in Lagen oberhalb von 2200 m Seehöhe im Mittel zwischen -6 und -10 Tagen, darunter zwischen -15 und -23 Tagen. Das Änderungssignal ist am tiefstgelegenen Punkt Hohe Mut Bahn I nicht eindeutig (gleich wie bei der Gesamtschneehöhe), sonst statistisch nicht signifikant. Unter Berücksichtigung von technischer Schneeproduktion fallen die negativen Änderungen geringer aus. Am Punkt Hohe Mut Bahn I ist die negative Änderung statistisch signifikant und beträgt im Mittel -12 Tage, sonst zwischen -1 und -5 Tage. Auch ist an diesem Punkt die Spannbreite deutlich höher (größere Unsicherheit der Änderung). So können die Änderungen zwischen -26 und -3 Tagen liegen. Mit Hilfe der Beschneigung werden in der Periode 2070 bis 2099 im Mittel ähnliche Verhältnisse herrschen, wie in der Vergleichsperiode 1972 bis 2001.

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 5 und 9 Tage nach hinten verschoben, das Ende zwischen 7 und 17 Tage früher eintreten. Die technische Beschneigung führt erwartungsgemäß zu einem früheren Saisonstart. In den hohen Lagen ist der Beginn der Skisaison im Mittel Ende Oktober, darunter im Laufe des Novembers. Darüber hinaus tritt das Saisonende in allen Höhenlagen im Mittel nicht vor Ende April ein (Tabelle 33).

Das Klimaänderungssignal der Anzahl der möglichen Beschneistunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$) ist für die Perioden 10. Oktober bis 15. Dezember, 10. Oktober bis 6. Jänner als auch für 10. Oktober bis 31. Jänner statistisch signifikant, unabhängig von der Seehöhe. In diesen Zeitfenstern beträgt die Abnahme meist zwischen 7 und 22%, wobei mit zunehmender Seehöhe die negativen Änderungen schwächer werden (Tabelle 34).

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: NDJFMA. 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]
Plattachbahn	6	2800	NW	20	424,5	422,6	466,1	43,5	10	-13,8	100,0	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	406,9	406,2	448,1	41,9	10	-10,6	83,3	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	381,4	381,3	421,1	39,8	10	-9,6	76,8	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	396,4	396,1	437,3	41,2	10	-9,6	87,3	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	363,5	365,8	404,4	38,6	11	-10,9	69,5	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	361,3	361,9	398,6	36,7	10	-11,6	72,8	

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]	
Plattachbahn	6	2800	NW	20	-8,5	-8,7	-7,4	1,3	0,9	2,3	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	-7,1	-7,2	-6,0	1,3	0,9	2,2	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	-5,5	-5,7	-4,4	1,2	0,9	2,1	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	-6,3	-6,5	-5,2	1,2	0,9	2,1	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	-4,0	-4,2	-2,9	1,2	0,9	2,0	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	-2,4	-2,5	-1,3	1,2	0,9	2,2	

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 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; Saison: NDJFMA. 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]
Plattachbahn	6	2800	NW	20	171,1	152,2	153,4	1,2	1	-17,4	16,5	Grün
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	127,3	122,0	123,6	1,6	1	-17,5	15,5	Grün
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	94,9	91,8	88,3	-3,5	-4	-19,5	8,7	Grün
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	114,9	108,7	107,4	-1,3	-1	-21,3	10,8	Grün
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	78,8	62,9	55,5	-7,4	-12	-17,3	0,5	Grün
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	48,1	34,0	26,0	-8,0	-24	-15,1	-2,7	Gelb

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]
Plattachbahn	6	2800	NW	20	174,3	170,0	163,7	-6,4	-4	-21,4	0,9	Grün
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	165,4	160,1	154,2	-5,9	-4	-19,9	0,3	Grün
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	156,7	148,2	138,6	-9,6	-6	-26,4	0,7	Grün
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	161,1	155,5	148,2	-7,4	-5	-22,1	0,4	Grün
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	148,5	130,1	115,4	-14,8	-11	-44,3	-0,1	Grün
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	119,8	84,2	61,2	-23,0	-27	-45,3	-3,8	Gelb

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]
Plattachbahn	6	2800	NW	20	181,2	180,9	180,0	-0,9	0	-3,0	-0,1	Grün
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	180,5	180,3	178,1	-2,2	-1	-6,7	-0,3	Grün
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	178,9	178,1	174,8	-3,3	-2	-9,2	-1,0	Grün
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	179,6	179,3	176,6	-2,7	-2	-7,3	-0,8	Grün
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	175,3	174,7	170,0	-4,6	-3	-12,1	-1,9	Grün
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	169,7	167,3	155,8	-11,5	-7	-25,6	-3,0	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 dem Beobachtungsdatensatz SPARTACUS. 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 [Tage]	Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	1972-2001	2070-2099	Min [Tage]		Max [Tage]		
Plattachbahn	6	2800	NW	20	29. Okt	08. Nov	16. Nov	8	-0,1	26,0		
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	13. Nov	21. Nov	28. Nov	7	-0,4	20,6		
Rosskarbahn I	4	2400	NW	25	24. Nov	05. Dez	14. Dez	9	-2,6	23,1		
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	18. Nov	27. Nov	05. Dez	8	0,4	21,2		
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	04. Dez	22. Dez	31. Dez	9	-2,4	23,9		
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	20. Dez	12. Jan	17. Jan	5	-10,7	21,8		

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

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP2.6 ENS-Mittel		Δ [Tage]	Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	1972-2001	2070-2099	Min [Tage]		Max [Tage]		
Plattachbahn	6	2800	NW	20	28. Aug	24. Aug	17. Aug	-7	-17,6	-0,2		
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	30. Jul	30. Jul	21. Jul	-9	-20,3	1,4		
Rosskarbahn I	4	2400	NW	25	26. Jun	25. Jun	17. Jun	-8	-19,7	1,9		
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	15. Jul	13. Jul	05. Jul	-8	-19,8	0,4		
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	31. Mai	21. Mai	10. Mai	-11	-20,2	-2,4		
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	19. Apr	10. Apr	24. Mär	-17	-27,4	-5,6		

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 dem Beobachtungsdatensatz SPARTACUS. 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		RCP2.6 ENS-Mittel		Δ [Tage]	Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	1972-2001	2070-2099	Min [Tage]		Max [Tage]		
Plattachbahn	6	2800	NW	20	15. Okt	19. Okt	24. Okt	5	-1,0	13,5	Grün	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	20. Okt	24. Okt	29. Okt	5	0,8	13,6	Grün	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	27. Okt	30. Okt	04. Nov	5	0,9	13,8	Grün	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	24. Okt	27. Okt	01. Nov	5	0,9	13,3	Grün	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	03. Nov	05. Nov	11. Nov	6	1,9	12,5	Grün	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	11. Nov	12. Nov	20. Nov	8	4,6	14,6	Grün	

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

Name	ID	Höhe [m]	Exp. [-]	Neig. [°]	OBS-Mittel		RCP2.6 ENS-Mittel		Δ [Tage]	Δ Spannbreite		Sig
					1972-2001	1972-2001	2070-2099	Min [Tage]		Max [Tage]		
Plattachbahn	6	2800	NW	20	31. Aug	28. Aug	23. Aug	-5	-12,9	0,1	Grün	
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	11. Aug	12. Aug	04. Aug	-8	-19,2	-0,4	Grün	
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	09. Jul	11. Jul	03. Jul	-8	-19,1	3,3	Grün	
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	28. Jul	28. Jul	20. Jul	-8	-21,0	0,6	Grün	
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	16. Jun	12. Jun	03. Jun	-9	-16,8	-1,8	Rot	
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	19. Mai	15. Mai	02. Mai	-13	-21,6	-5,4	Rot	

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 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 10. Okt 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.]		
Plattachbahn	6	2800	NW	20	1272,4	1251,2	1087,8	-163,4	-13	-430,2	-34,6		
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	1092,0	1075,2	925,2	-150,0	-14	-363,9	-25,4		
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	903,9	891,8	743,7	-148,1	-17	-310,6	-35,8		
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	997,2	984,5	830,7	-153,8	-16	-333,6	-25,7		
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	732,7	724,5	588,9	-135,6	-19	-265,3	-35,4		
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	573,7	565,3	439,8	-125,5	-22	-251,7	-43,1		

Anzahl der möglichen Beschneistunden 10. Okt 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.]		
Plattachbahn	6	2800	NW	20	1708,3	1709,3	1553,1	-156,2	-9	-404,9	-46,0		
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	1531,3	1537,8	1378,5	-159,3	-10	-379,3	-40,1		
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	1325,6	1338,2	1160,7	-177,5	-13	-359,1	-56,3		
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	1430,7	1441,9	1268,0	-173,9	-12	-367,6	-44,1		
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	1120,2	1136,1	954,2	-181,9	-16	-328,4	-66,7		
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	910,7	931,0	747,3	-183,7	-20	-318,1	-89,0		

Anzahl der möglichen Beschneistunden 10. Okt 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.]		
Plattachbahn	6	2800	NW	20	2295,8	2300,1	2129,1	-171,1	-7	-438,1	-56,2		
Rosskarbahn	5	2620	NW	20	2105,0	2117,6	1927,6	-190,0	-9	-439,0	-63,0		
Rosskarbahn	4	2400	NW	25	1870,0	1891,6	1661,7	-229,9	-12	-452,4	-94,8		
Hohe Mut Bahn II	3	2500	NW	20	1991,6	2010,9	1795,8	-215,1	-11	-443,5	-72,3		
Steinmannbahn	2	2170	NW	20	1614,8	1645,0	1389,2	-255,8	-16	-411,0	-126,3		
Hohe Mut Bahn I	1	1920	NW	15	1342,1	1380,6	1108,0	-272,6	-20	-472,3	-172,8		

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 deutet darauf hin, dass sich ab Mitte/Ende der 1980er Jahre die winterlichen Bedingungen im Skigebiet Obergurgl geändert haben. Die Ergebnisse der SNOWGRID-CL Schneedeckenmodellierung für die Vergangenheit zeigen, dass die saisonale Gesamtschneehöhe und Schneedeckendauer seit Ende der 1980er Jahre in Lagen unterhalb von 2000 m bis 2400 m Seehöhe tendenziell abgenommen hat, wobei die Abnahmen in den tiefen Lagen am stärksten sind. An den höher gelegenen Punkten ist dies nicht beobachtbar. Im Zeitraum Mitte der 1990er bis 2005 sowie zwischen 2010 und heute gab es oberhalb von ca. 2200 m Seehöhe vermehrt Wintersaisonen mit einer höheren Schneehöhe. Die Schneedeckendauer hat sich in den höheren Lagen kaum verändert. Ein Grund für die höhenabhängigen Unterschiede ist, dass in mittleren und höheren Lagen im Skigebiet der Einfluss der Temperatur abnimmt und somit auch Temperaturänderungen geringere Auswirkungen auf die Schneehöhe haben, als in tiefen Lagen. Darüber hinaus nimmt im Allgemeinen die Bedeutung der Niederschlagsverteilung mit zunehmender Seehöhe zu. 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.

Die Niederschlagssumme innerhalb der einzelnen Wintersaisonen ist von Jahr zu Jahr sehr variabel und weist seit 1962 keinen erkennbaren Trend auf. Viel mehr wechseln sich trockene und feuchte Perioden ab. Dennoch lässt sich sagen, dass ab den 1990er Jahren die Niederschlagssumme im Oktober und November vermehrt überdurchschnittlich war. Diese niederschlagsreicheren Monate führten augenscheinlich zu den größeren saisonalen Gesamtschneehöhen in Lagen oberhalb von 2200 m Seehöhe. 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 Schneeindikatoren deutlich abgeschwächt werden können (positiver Effekt der technischen Schneeproduktion). Die technische Schneeproduktion führt meist zu einer Stabilisierung der Schneehöhe 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 November bis April schwach zugenommen hat (2%). Im Gegensatz dazu hat im Skigebiet die winterliche Temperatur im Mittel um bis zu 1,1°C zugenommen. Die Änderungen der Niederschlagssumme und der Temperatur sind in allen Seehöhen feststellbar.

Die saisonale Gesamtschneehöhe HS (Naturschnee) hat in Lagen oberhalb von 2400 m Seehöhe um 4 bis 10% zugenommen, darunter um bis zu 12% abgenommen. Auch 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 2 Tage). Im Gegensatz dazu beträgt die Abnahme in den tiefer gelegenen Regionen im Skigebiet zwischen 4 und 20 Tagen.

Die Anzahl der möglichen Beschneistunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$) hat in allen Höhenlagen abgenommen. 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.

Die Ergebnisse für die Vergangenheit zeigen, dass die zeitliche Änderung der Schneeindikatoren keinen linearen Verlauf einnimmt. Die beobachtete Änderung ähnelt vielmehr dem Verlauf einer Treppenfunktion. Vor allem an den Punkten in den tiefer gelegenen Lagen im Skigebiet Obergurgl ist in den 1980er Jahren eine stufenartige Änderung zu erkennen. In der Fachliteratur wird diese Form der Änderung als Regime Shift bezeichnet (Marty, 2008 und 2017; Reid et al., 2016). Hierbei handelt es sich um eine mehr oder weniger abrupte Änderung eines quasistationären klimatologischen Zustandes in einen anderen quasistationären Zustand mit geänderten klimatologischen Eigenschaften. Auf der Nordhalbkugel wurden in den letzten Dekaden mehrere Regime Shifts detektiert. Der Verschiebung ab den 1980er Jahren kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu, da diese den gesamten Alpenraum nachträglich beeinflusst hat. Bis in die 1980er Jahre war das jährliche Temperaturniveau allgemein niedriger als heute. Es wird angenommen, dass schwefelige Aerosole in der Atmosphäre (durch Verbrennung von Kohle, usw.) sowie auch natürliche Schwankungen im Klimasystem für diese tieferen Temperaturen gesorgt haben, wobei der Effekt des anthropogenen Treibhausgasausstoßes unabhängig davon im Hintergrund weiterlief.

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. CO_2) 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 und Expositionen eine Temperaturzunahme in den Wintermonaten projiziert. Das Klimaänderungssignal zeigt für die Periode 2021 bis 2050 eine mittlere Zunahme der winterlichen Temperatur (NDJFMA) um $1,5^\circ\text{C}$ im Vergleich zur Periode 1972 bis 2001. Die maximale Bandbreite der Zunahme reicht von $0,8$ bis $2,5^\circ\text{C}$. 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 7% , ist jedoch statistisch nicht signifikant und unterliegt somit zufälligen Schwankungen.

Aufgrund der zu erwartenden Temperaturzunahme wird innerhalb der Wintersaison NDJFMA 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 -5 und -34% (entspricht zwischen -8 und -13 cm). In Lagen unterhalb von ca. 2200 m Seehöhe beträgt die Abnahme der Schneedeckendauer ($\text{HS} \geq 30$ cm, Naturschnee) zwischen 19 und 32 Tage, darüber bis zu 10 Tage. Die Änderungen sind meist statistisch nicht signifikant.

Das Klimaänderungssignal der Anzahl der möglichen Beschneistunden (Feuchtkugeltemperatur $T_f \leq -4^\circ$) ist statistisch signifikant. Die Abnahme beträgt zwischen 10 und 31% , wobei mit abnehmender Seehöhe die negativen Änderungen stärker werden.

Mit Hilfe der technischen Beschneigung wird die saisonale Gesamtschneehöhe 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 stärker von der zu erwartenden Temperaturerhö-

hung betroffen sein. Der Skigebietsbetrieb wird bis in die nahe Zukunft 2050 weiterhin uneingeschränkt möglich sein. In mittleren und hohen Lagen ohne markante Änderung zu heute. Unterhalb von ca. 2200 m Seehöhe wird der technische Aufwand leicht zunehmen.

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 (NDJFMA) Niederschlagssumme von bis zu 13% projiziert, im Vergleich zur vergangenen Periode 1972 bis 2001. Es liegt keine statistische Signifikanz vor. 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 im Mittel um 4°C zunehmen, unabhängig von der Seehöhe. Die maximale Bandbreite an möglichen Änderungen spannt einen Bereich von 3,1 bis 6,6°C auf. Im Vergleich dazu wird im klimafreundlichen Szenario RCP2.6 eine gedämpfte Temperaturzunahme von bis zu 1,2°C projiziert (0,9 bis 2,3°C). In diesem Szenario ist die Entwicklung der winterlichen Niederschlagssumme ebenfalls unklar (Zunahme von 11%). Der Niederschlag wird somit auch zukünftig der Parameter mit der größten Variabilität sein.

RCP8.5 projiziert für die ferne Zukunft in allen Seehöhen und Expositionen eine deutliche Abnahme der Gesamtschneehöhe (Naturschnee) innerhalb der Wintersaison NDJFMA. Die mittleren Änderungen bewegen sich hierbei zwischen -24% und -82%, wobei die prozentualen Änderungen in tiefen und mittleren Lagen am größten sind. Im Allgemeinen ist das Änderungssignal statistisch signifikant. Auch für die Schneedeckendauer (Naturschnee) zeigt das worst-case Klimaänderungssignal in Richtung einer markanten Abnahme, unabhängig von Seehöhe und Exposition. Die Anzahl der Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 cm nimmt zwischen 1. November und 30. April in den tieferen Lagen im Mittel zwischen 74 und 88 Tagen ab. Die maximale Spannbreite aus den Änderungen reicht von -113 bis -58 Tagen. Die Abnahmen werden mit zunehmender Seehöhe jedoch geringer. Die mittleren Änderungen betragen oberhalb von 2200 m dennoch zwischen -48 und -23 Tage, wobei die Spannbreite von -95 bis -14 Tage reicht. In den höheren Lagen treten aufgrund der zu erwartenden Temperaturzunahme die größten Abnahmen der Schneedeckendauer in den Monaten November und Dezember auf. In den Folgemonaten Jänner bis März dürfte die in diesen Monaten projizierte Niederschlagszunahme für eine mit zunehmender Seehöhe schwächer werdende Abnahme sorgen. Auch wird in diesen Monaten eine geringere Temperaturzunahme projiziert.

Mit Hilfe der technischen Schneeproduktion fallen die negativen saisonalen Änderungen der Schneedeckendauer geringer aus, sind aber trotzdem statistisch signifikant. Die mittleren Abnahmen betragen oberhalb von ca. 2200 m Seehöhe zwischen 11 und 28 Tage, darunter bis zu 85 Tage. Darüber hinaus führt die Beschneigung 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 zwischen 21 und 39 Tagen später stattfinden, das Ende zwischen 46 und 58 Tage früher eintreten. Die in RCP8.5 projizierten Änderungen werden vor allem die tiefen Lagen im Skigebiet treffen. Hier wird die Skisaison im Mittel erst im Dezember starten. Das Ende wird im Laufe des März/April eintreten. In den mittleren und hohen Lagen wird der Beginn ebenfalls im Mittel später stattfinden (Verschiebung von Oktober hin zu November). Die simulierten Ergebnisse für diese Höhenlagen zeigen zwar eine hohe Variabilität, jedoch kann Dank der technischen Beschneigung aus den Schneeerzeugern das Saisonende (z.B. Ende April) durchwegs gehalten werden.

Des Weiteren wird für RCP8.5 eine dramatische Abnahme der Anzahl an möglichen Beschneistunden (Feuchtkugelttemperatur $T_f \leq -4^\circ\text{C}$) projiziert. Die mittlere prozentuale Änderung im Zeitraum von 10. Oktober bis 15. Dezember beträgt zwischen -51 und -71%, im Zeitraum von 10. Oktober bis 31. Jänner zwischen -34 und -60%. Die Stärke der Änderungen nimmt hierbei mit zunehmender Seehöhe ab. Die Anzahl der Schneeproduktionsstunden wird folglich in den tieferen Lagen im Oktober und November stark abnehmen. Die Zeitfenster zur Beschneigung werden kürzer. Der Schwellwert der Feuchtkugelttemperatur wird weniger oft erreicht. Der Beginn der ersten Beschneigung wird im Mittel nach hinten verschoben. In den höheren Lagen werden die Schneeerzeuger vor allem im November und Dezember zusätzliche Betriebsstunden leisten. Die Änderungen werden in den verschiedenen Seehöhen eine unterschiedliche

Bedeutung für die Schneeproduktion haben. Grundsätzlich ist die Entwicklung der Verhältnisse in den tieferen Lagen deutlich unklarer. In diesen Höhenlagen wird der Skibetrieb 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 keine statistische Signifikanz. Das zukünftige Klimaänderungssignal der saisonalen (NDJFMA) mittleren Gesamtschneehöhe (Naturschnee) zeigt für Lagen unterhalb von 2600 m Seehöhe eine Abnahme, darüber eine schwache Zunahme. Die mittleren Änderungen bewegen sich zwischen -24 und 1% (entspricht -8 bis 1 cm). Die Änderungen spannen hierbei einen maximalen Bereich von -21 bis 17 cm auf, wobei die positiven Änderungen in engem Zusammenhang mit der projizierten Niederschlagszunahme im Jänner, Februar und März stehen. Die mittlere Änderung der saisonalen (NDJFMA) Schneedeckendauer (Naturschnee) beträgt in Lagen oberhalb von 2200 m Seehöhe zwischen -6 und -10 Tagen, darunter zwischen -15 und -23 Tagen. Die Spannweite der Änderungen über alle Höhenlagen reicht von 1 bis zu -45 Tagen. Unter Berücksichtigung von technischer Schnee-Produktion beträgt die mittlere Änderung der Schneedeckendauer über alle Höhenlagen zwischen -1 und -12 Tagen. Die Bandbreite an möglichen Änderungen spannt einen Bereich von 0 bis -26 Tagen auf.

Das Klimaänderungssignal der Anzahl der möglichen Beschneistunden ist statistisch signifikant. Die mittlere Abnahme beträgt zwischen 7 und 22%. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich die Rahmenbedingungen für die technische Schnee-Produktion im Skigebiet nicht wesentlich ändern 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 uneingeschränkt erhalten werden kann. In den tiefen Lagen kann der technische Aufwand leicht zunehmen.

Die hohe Lage und nördliche Ausrichtung des Skigebiets Obergurgl im Ötztal garantieren Schneesicherheit bis in die nahe Zukunft. Zum Ende des 21. Jahrhunderts projizieren RCP2.6 und RCP8.5 deutlich unterschiedliche mögliche Zustände für das Skigebiet, wobei die Änderungen stark von der Seehöhe abhängen. Hierbei weisen die simulierten Ergebnisse vor allem in den tieferen Lagen eine große Spannweite 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.

Flocas, H. A., Simmonds, I., Kouroglou, J., Keay, K., Hatzaki, M., Bricolas, V., Asimakopoulos, D., Peßenteiner, 2010. On Cyclonic Tracks over the Eastern Mediterranean, *J. Climate*, 23, pp. 5243–5257, doi: <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3426.1>

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., H  laou  t, 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., St  bi, 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.
- Sch  ner, 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, *  sterr. Beitr. Zu Meteorol. Geophys.*, 37 [online] Available from: <http://www.zamg.ac.at/>

[ps://books.google.at/books?id=VKzXtwAACAAJ](https://books.google.at/books?id=VKzXtwAACAAJ), 2006.

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