

Schneehöhenprojektionen für Kompass Schnee

Bettina Richter und Christoph Marty

WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF

17. April 2025

1 Einleitung

Der Wintertourismus ist für viele Bergregionen in der Schweiz wirtschaftlich essenziell, wird jedoch durch den Klimawandel vor große Herausforderungen gestellt. Das Projekt „Kompass Schnee“ soll Bergbahnen, Destinationen und Gemeinden als Orientierungshilfe bei der Anpassung an klimatische Veränderungen dienen. Im Rahmen des Projekts Kompass Schnee wurde das WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF damit beauftragt, regionale Schneehöhenprojektionen zu erstellen. Hierzu wurde der aktuelle und zukünftige saisonale Verlauf der natürlichen Schneedecke für Wintersportregionen der ganzen Schweiz berechnet. Grundlage dafür sind die auf einem 1 km Raster für die ganze Schweiz modellierten täglichen Schneehöhen zwischen 1991-2020. Für die Analyse der aktuellen Schneebedeckung wurden diese Daten so aufbereitet, dass der durchschnittlichen saisonalen Schneehöhenverlauf und die 90% Schwankungsbreite in der Referenzperiode (1991-2020) pro Region und Höhenzone graphisch dargestellt werden kann. Der berücksichtigte Höhenbereich geht von 700 bis 2700 m wobei jedes Höhenband einen Höhenunterschied von 200 m aufweist. Für die Analyse der zukünftigen Schneebedeckung wurden die im ersten Schritt bestimmten täglichen Schneehöhen und deren 90% Variabilität um einen Klima-Faktor reduziert, der vom Temperaturszenario, dem Höhenband und dem Tag im Jahr abhängt und aus bestehender Literatur bestimmt wurde. Die zu berücksichtigten Temperaturszenarien betragen $+1^{\circ}\text{C}$, $+2^{\circ}\text{C}$, $+3^{\circ}\text{C}$ und 4° . Dieser Klima-Faktor hat einen Unsicherheitsbereich, der u.a. durch die Klima-/Schneemodelle bestimmt wird, die auch eine potentielle Niederschlagsänderung berücksichtigen.

2 Methoden und Daten

2.1 SPASS Daten 1991-2020

Um regionale Unterschiede möglichst präzise widerzuspiegeln, werden die Schneeprojektionen auf Basis gegitterter klimatologischer Schneehöhen-Daten erstellt. Diese basieren auf dem SPASS-Datensatz ([Marty et al., 2025](#), SPAtial Snow climatology for Switzerland), der seit 1962 tägliche Schneehöhen mit einer räumlichen Auflösung von $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ bereitstellt.

Mithilfe eines Temperatur-Index-Modells ([Magnusson et al., 2014](#)) wird das Schneewasseräquivalent (snow water equivalent, SWE) aus gegitterten Temperatur- und Niederschlagsdaten berechnet. Dieses wird anschließend mit dem SWE2HS-Modell ([Aschauer et al., 2023](#)) in Schneehöhen umgerechnet. Ab 1999 wurde der Datensatz durch gemessene Schneehöhen von 350 Messstationen mithilfe eines Ensemble-Kalman-Filters (EKF) korrigiert ([Mott et al., 2023](#); [Magnusson et al., 2014](#), OSHD-EKF). Für den Zeitraum von 1962 bis 1999 erfolgte die Korrektur mittels Quantile Mapping ([Michel et al., 2023](#), OSHD-CLQM).

Für die regionalen Schneehöhenprojektionen wurde die aktuellste 30-Jahresperiode von 1991 bis 2020 als Referenzzeitraum gewählt. Wie in [Marty et al. \(2025\)](#) empfohlen, wurde zur Erstellung eines optimalen klimatologischen Datensatzes eine Kombination aus den zwei Datensätzen verwendet:

- 1991 - 1998: OSHD-CLQM
- 1999 - 2020: OSHD-EKF

2.1.1 Regionen und Höhenstufen

Der klimatologische, gegitterte Datensatz für Schneehöhen unterschätzt teilweise die räumliche Variabilität, insbesondere in Kältebecken in Tälern ([Marty et al., 2025](#)). Um diese Einschränkung zu umgehen, wurde die Schweiz in 23 Regionen (siehe [Abbildung 1](#)) aufgeteilt, um die Schneehöhen für die einzelnen Regionen zu aggregieren:

1. Nordbünden
2. Surselva
3. Hinterrhein

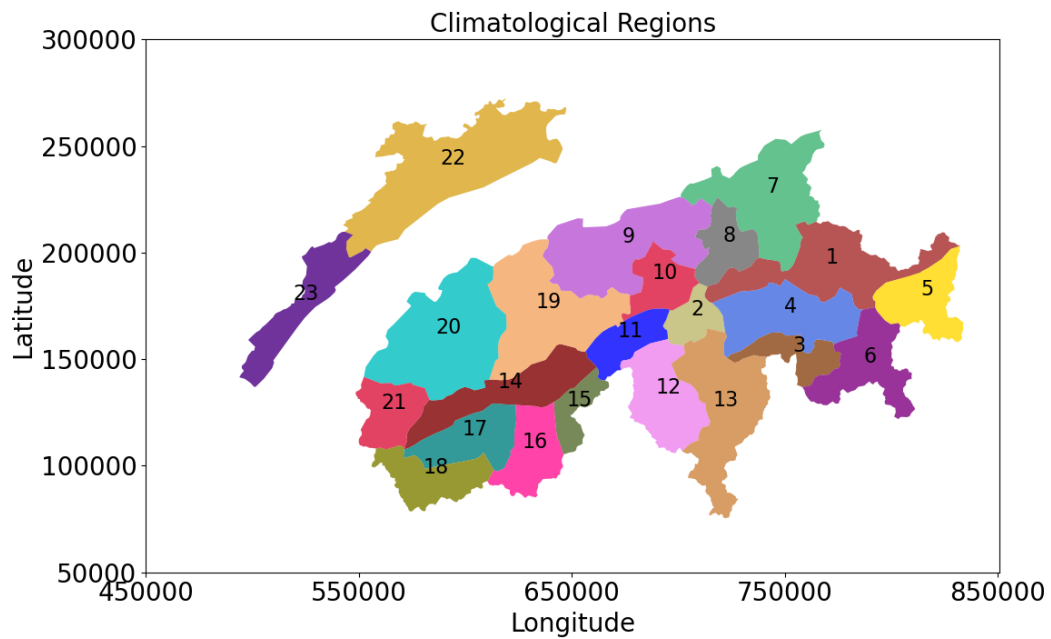


Abbildung 1: Überblick der Regionen.

4. Mittelbünden
5. Unterengadin & Münstertal
6. Oberengadin & Puschlav
7. St. Galler & Appenzeller Alpen
8. Glarner Alpen
9. Nördliche Zentralschweiz
10. Urner Alpen
11. Gotthard & Obergoms
12. Nordwestliches Tessin
13. Östliches Tessin & Misox
14. Nördlich Rhone
15. Simplon & Binntal
16. Vispertäler
17. Zentral Wallis
18. Südliches Wallis
19. Östliches Berner Oberland
20. Westliches BeO & Freiburger Alpen
21. Waadtländer Alpen & Chablais

22. Östlicher Jura

23. Westlicher Jura

Zusätzlich wurde jede Region in 200 m Höhenbänder unterteilt, wobei nur Höhen oberhalb 700 und unterhalb 2700 m berücksichtigt wurden. Unterhalb 700 m ist nicht relevant für Kompass Schnee und oberhalb 2700 m wird die Unsicherheit zu gross, weil keine Stationen für den EKF-Filter zur Verfügung stehen.

- 800 m ü.M.: 700 m ü.M.–900 m ü.M.
- 1000 m ü.M.: 900 m ü.M.–1100 m ü.M.
- 1200 m ü.M.: 1100 m ü.M.–1300 m ü.M.
- 1400 m ü.M.: 1300 m ü.M.–1500 m ü.M.
- 1600 m ü.M.: 1500 m ü.M.–1700 m ü.M.
- 1800 m ü.M.: 1700 m ü.M.–1900 m ü.M.
- 2000 m ü.M.: 1900 m ü.M.–2100 m ü.M.
- 2200 m ü.M.: 2100 m ü.M.–2300 m ü.M.
- 2400 m ü.M.: 2300 m ü.M.–2500 m ü.M.
- 2600 m ü.M.: 2500 m ü.M.–2700 m ü.M.

2.1.2 Schneehöhenklimatologie: 30-Jahres Mittel

Für jede Region und Höhenstufe wurde zunächst für jeden Tag eine mittlere Schneehöhe berechnet, sofern die Region aus mindestens 5 Gitterpunkten, bzw. mindestens 5 km^2 besteht. Anschließend wurden für die Referenzperiode (1991–2020) der 30-Jahres-Median sowie das 5. und 95. Perzentil bestimmt.

Abbildung 2 zeigt die Entwicklung der Schneehöhen während der Referenzperiode. Daraus lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Am 1. Januar liegen in der Hälfte aller Winter während der Referenzperiode mindestens 68 cm Schnee.
- In 5% der Winter lagen an diesem Tag weniger als 16 cm Schnee.
- In 95% der Winter lagen bis zu 102 cm Schnee (d.h. in 5% der Winter lagen mehr als 102 cm Schnee).
- Im Mittel gab es an 173 Tagen im Jahr (30. Nov. bis 19. Mai) mehr als 30 cm Schnee.

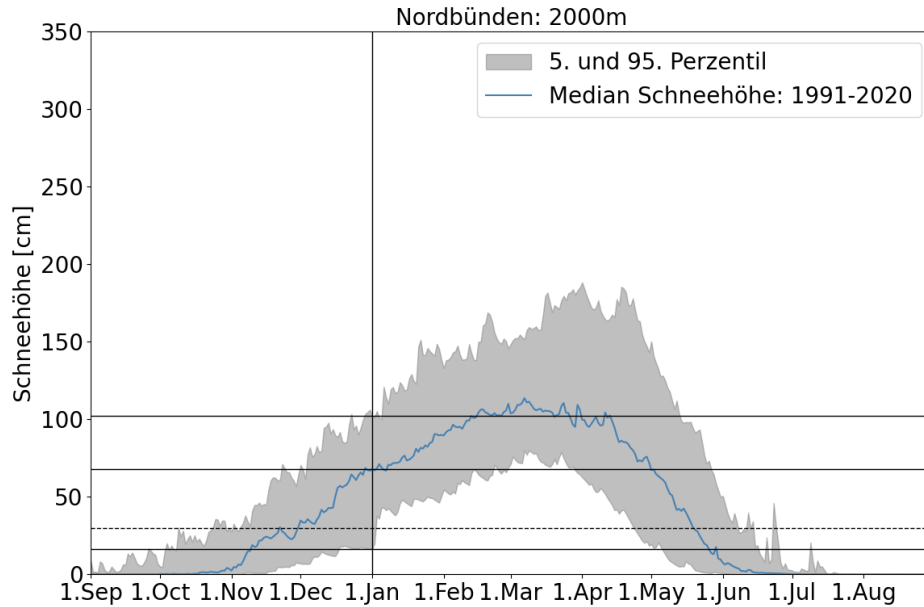


Abbildung 2: Schneehöhenentwicklung für die Region 1, Nordbünden auf 2000 m ü.M. für die Referenzperiode 1991-2020. Durchgezogene Linien heben die Schneehöhen (Median, 5. und 95. Perzentil; horizontale Linien) am 1. Januar (vertikale Linie) hervor. Die gestrichelte Linie deutet die 30 cm Schneehöhe an.

2.2 Literaturrecherche

Verschiedene Studien haben untersucht, wie sich die Schneehöhen und das SWE in der Schweiz und im Alpenraum unter verschiedenen Klimaszenarien entwickeln. Tabellen 1 und 2 geben einen Überblick über die analysierten Studien sowie die dazugehörigen Regionen und Höhenlagen. Die meisten Studien haben die Schneehöhenabnahmen untersucht, die Studien, die SWE untersuchten, wurden mit einem * markiert. Laut [Schmucki et al. \(2015\)](#) und [Verfaillie et al. \(2018\)](#) sind die relativen Abnahmen von SWE mit den Abnahmen der Schneehöhen vergleichbar. Für Visualisierungszwecke wurden die SWE-Werte unter der Annahme einer mittleren Schneedichte von 250 kg m^{-3} in Schneehöhen umgerechnet.

Da die Studien unterschiedliche Klimaszenarien und Referenzperioden analysieren, haben wir mithilfe der Berichte CH2011 und CH2018 ([CH2018, 2018](#); [CH2011, 2011](#)) für jedes Klimaszenario das entsprechende Temperaturszenario bestimmt (siehe Tabelle 3).

Die Studien geben Schneehöhenreduktionen für verschiedene Zeiträume an (siehe Tabelle 2.2). Diese reichen von der kürzesten Periode, Dezember bis Februar (DJF, drei Monate), bis zur längsten Periode, September bis August (SONDJFMAMJJA, zwölf Monate). Um die Reduktionswerte verschiedener Zeiträume vergleichbar zu machen, wurden

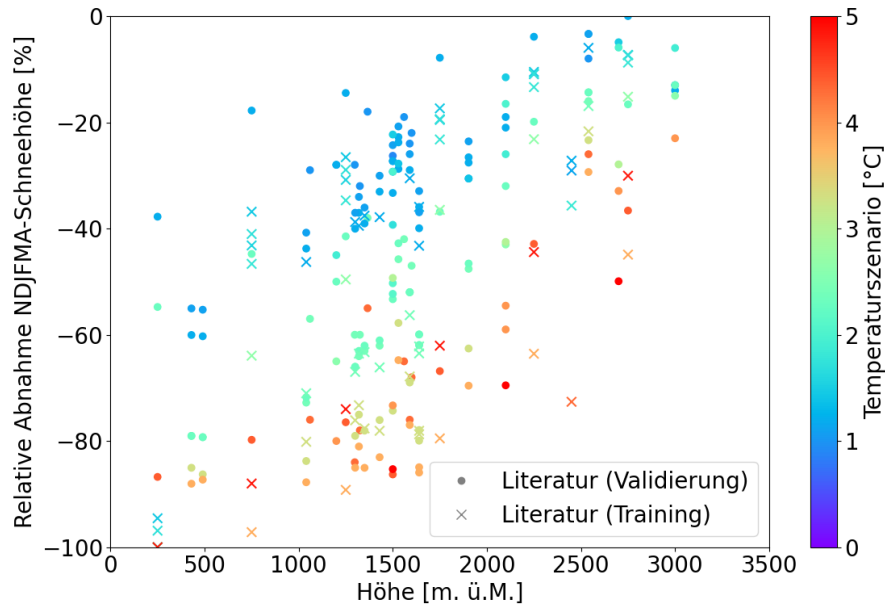


Abbildung 3: Überblick der Literaturwerte der relativen NDJFMA Abnahmen für die verschiedenen Temperaturszenarien (Farben) der Studien und Höhenlagen. Zur Vergleichbarkeit wurden alle Literaturwerte in NDJFMA umgerechnet. Die verschiedenen Symbole deuten an, welche Datenpunkte für das Training der Reduktionsfaktoren in Kapitel 2.4 und 2.5 und welche Datenpunkte für die Validierung in Kapitel 4 genutzt wurde (siehe auch Tabellen 1 und 2 unter Bemerkung).

sie auf NDJFMA-Reduktionswerte (November bis April) umgerechnet.

Weiterhin wurden zur Vergleichbarkeit der Studien alle Reduktionswerte auf eine Abnahme für den Zeitraum November-April (NDJFMA, total 6 Monate) umgerechnet. Hierzu wurden mithilfe von Studien, die monatliche oder tägliche Reduktionswerte veröffentlicht haben, zunächst die Unterschiede der Reduktionsfaktoren zwischen den betrachteten Zeiträumen berechnet. Je nach Zeitraum und Höhenlage ergaben sich Unterschiede von $\pm 10\%$. Diese Abweichungen wurden für jeden Zeitraum linear in Abhängigkeit von der Höhe interpoliert und die Reduktionsfaktoren entsprechend angepasst.

Abbildung 3 zeigt die NDJFMA-Reduktionswerte aus den verschiedenen Studien. Daraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Je stärker die Temperaturerwärmung, desto größer der Rückgang der Schneehöhen.
- Der relative Rückgang ist ausgeprägter in tieferen Höhenlagen.

Literatur	Bericht Referenz	Szenario	Periode	Höhe ü.M. [m]	Ort	Bemerkung Training
Bülow et al. (2025)*	CH2018 1971-2000	RCP26 RCP45 RCP85	2021-2050 2069-2098	0-500 500-1000 1000-1500 1500-2000 2000-2500 2500-3000	Alpen	monatl. Red. Training
Marty et al. (2017)	CH2011 1980-2009	A2	2071-2100	0-500 500-1000 1000-1500 1500-2000 2000-2500 2500-3000	Region Aare	monatl. Red. Training
Schmucki et al. (2017) Schmucki (2015)	CH2011 1984-2010	A1B	2020-2049 2045-2074 2070-2099	2540 1640 1640 1590 1430 1350 1320 1300 1040	Weissfluhjoch San Bernardino Zermatt Davos Montana Ulrichen Adelboden Scuol Engelberg	tägliche Red. Training
Fiddes et al. (2022)	CH2018 1981-2010	RCP2.6 RCP8.5	2031-2060 2070-2099	2450 m	IMIS	tägliche Red. Training
Willibald et al. (2020)	CH2018 1980-2009	RCP8.5	2010-2039 2040-2069 2070-2099	2540 1640 1590 1430 1350 1320 1300 1040	Weissfluhjoch Zermatt Davos Montana Ulrichen Adelboden Scuol Engelberg	Nov-Apr Validierung
Willibald et al. (2021)	CH2018 1980-2009	RCP8.5	2010-2039 2040-2069 2070-2099	2540 1590 1040	Weissfluhjoch Davos Engelberg	Saisonlänge HS>30cm Validierung
Verfaillie et al. (2018)	CH2018 1986-2005	RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5	2022-2038 2042-2058 2062-2078 2082-2098	1500	Chatreuse	Dez-Apr Saisonlänge HS>50 cm Validierung

Tabelle 1: Überblick über die Literatur, die für das Training (erste vier Studien in Tabelle 1) und die Validierung genutzt wurden. Falls das snow water equivalent (SWE) untersucht wurde, wurde die Literatur mit * markiert, sonst wurden Schneehöhenabnahmen untersucht. (Teil 1, Fortsetzung siehe Tabelle 2)

Literatur	Bericht Referenz	Szenario	Periode	Höhe ü.M. [m]	Region/Station	Bemerkung Training
Schmucki et al. (2015)	CH2011 1984-2010	A1B A2	2020-2049 2045-2074 2070-2099	2540 1640 1640 1590 1430 1350 1320 1300 1040	Weissfluhjoch San Bernardino Zermatt Davos Montana Ulrichen Adelboden Scuol Engelberg	Dez-Feb Saisonlänge HS>30 cm Validierung
Kotlarski et al. (2022)*	CH2018 1981-2010	RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5	2070-2099	0-500 500-1000 1000-1500 1500-2000 2000-2500 2500-3000	Alpen	Sep-Mai Validierung
Kotlarski et al. (2022)	CH2018 1981-2010	RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5	2021-2094	1200 2100 3000	Mont-Blanc	Nov-Apr Validierung
Kotlarski et al. (2022)	CH2018 1971-2000	RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5	2021-2050 2070-2099	1920 2500 3000	Ötztaler Alpen	Saisonlänge HS>30cm Validierung
Marty et al. (2017)	CH2011 1999-2012	A1B A2 RCP3PD	2020-2049 2045-2074 2070-2099	1530 1903	Aare Graubünden	Sep-Aug Validierung
Marty et al. (2017)	CH2011 1999-2012	A2	2020-2049 2045-2074 2070-2099	540 1030 1650	Bern Grindelwald Mürren	Saisonlänge HS>5cm
Marty et al. (2017)	CH2011 1999-2012	A2	2020-2049 2045-2074 2070-2099	3000	Aare	Saisonlänge HS>30cm
Morin et al. (2018)	IPCC2013 1986-2005	RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5	+1.5°C +2°C +3°C +4°C +5°C	1500 2100 2700	Mont-Blanc	Dez-Apr Validierung
Morin et al. (2018)	IPCC2013 1986-2005	RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5	+1.5°C +2°C +3°C +4°C +5°C	900 1500 2100 2700	Pyrenees	Saisonlänge HS>5cm Validierung

Tabelle 2: Überblick über die Literatur, die für das Training (erste vier Studien in Tabelle 1) und die Validierung genutzt wurden. Falls das snow water equivalent (SWE) untersucht wurde, wurde die Literatur mit * markiert, sonst wurden Schneehöhenabnahmen untersucht. (Teil 2, Teil 1 siehe Tabelle 1)

Bericht	Szenario	Referenzperiode	Klimaperiode	ΔT [°C]	
CH2011	A1B	1984-2010 1999-2012	2020-2049	+1.2	
			2045-2074	+2.4	
			2070-2099	+3.3	
	A2	1984-2010 1999-2012	2020-2049	+1.1	
			2045-2074	+2.3	
			2070-2099	+3.8	
	RCP3PD	1980-2009	2071-2100	+3.8	
			1999-2012	2020-2049	+1.2
				2045-2074	+1.2
2070-2099	+2.4				
CH2018	RCP2.6	1971-2000	2021-2050	+1.5	
			2069-2098	+1.6	
		1981-2010	2031-2060	+1.1	
			2070-2099	+1.2	
			1986-2005	2024-2037	+0.5
		2044-2057		+0.8	
		2064-2077		+0.9	
		2084-2097		+0.8	
		RCP4.5	1971-2000	2021-2050	+1.7
	2069-2098			+2.7	
	1986-2005		2024-2037	+0.8	
			2044-2057	+1.4	
			2064-2077	+1.8	
			2084-2097	+1.9	
	RCP8.5	1971-2000	2021-2050	+1.8	
			2069-2098	+4.8	
		1981-2010	2031-2060	+1.9	
			2070-2099	+4.4	
			1980-2009	2010-2039	+1.0
		2040-2069		+2.4	
		2070-2099		+4.3	
		1986-2005	2024-2037	+0.8	
			2044-2057	+1.7	
			2064-2077	+3.0	
2084-2097	+4.1				

Tabelle 3: Link zwischen Klimaszenario und Temperaturszenario in Abhängigkeit von der Referenzperiode und der Klimaperiode.

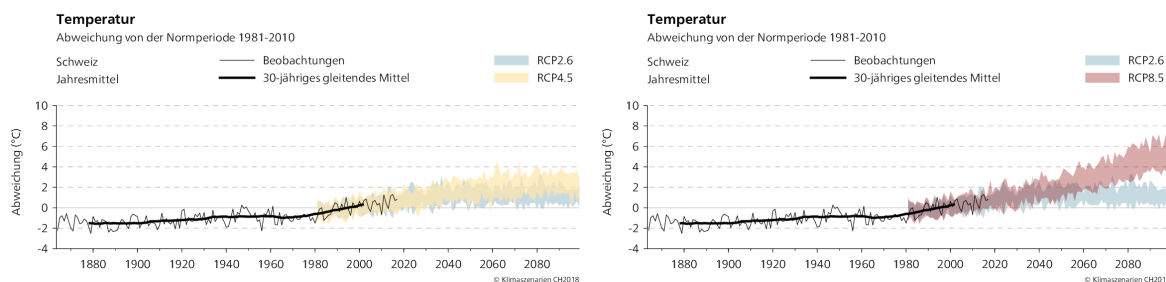


Abbildung 4: CH2018: Temperaturszenarien oder Änderung der mittleren Jahrestemperatur der Schweiz für verschiedene Emmissionsszenarien. Graphiken aus <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/ch2018-webatlas/zeitreihen.html>.

2.3 Temperaturszenarien für Projektionen

Für die Schneehöhenprojektionen wurden die Temperaturszenarien $+1^{\circ}\text{C}$, $+2^{\circ}\text{C}$, $+3^{\circ}\text{C}$ und $+4^{\circ}\text{C}$ gewählt, die sich auf die Änderung der mittleren Jahrestemperatur der Schweiz im Vergleich zur Referenzperiode 1991–2020 beziehen.

Um diese Szenarien im Kontext der Klimaszenarien aus CH2018 (Abbildung 4) zu setzen, ist zu beachten, dass CH2018 auf der Referenzperiode 1981–2010 basiert. Da diese Referenzperiode zeitlich weiter zurückliegt, haben wir uns für die „neue“ Referenzperiode 1991–2020 entschieden. Diese Periode wird auch im zukünftigen Bericht CH2025 als Standard verwendet. MeteoSchweiz hat dazu einen internen Bericht erstellt (Senoner et al., 2023), der zeigt, dass die mittlere Jahrestemperatur der Schweiz in der Periode 1991–2020 um $+0.5^{\circ}\text{C}$ höher liegt als in der Referenzperiode 1981–2010.

Dementsprechend wurden die in Abbildung 4 dargestellten Temperaturänderungen um 0.5°C korrigiert. In Tabelle 4 sind die angepassten Temperaturszenarien sowie die entsprechenden Zeiträume für verschiedene RCP-Szenarien aufgeführt.

Beispielsweise wird im Szenario RCP 2.6 eine Erwärmung der mittleren Jahrestemperatur der Schweiz um $+1.2^{\circ}\text{C}$ bis zum Ende des Jahrhunderts im Vergleich zur alten Referenzperiode 1981–2010 projiziert. Bezogen auf die neue Referenzperiode 1991–2020 entspricht dies jedoch nur einer Erwärmung von $+0.7^{\circ}\text{C}$, sodass das Temperaturszenario $+1^{\circ}\text{C}$ in diesem Szenario knapp nicht erreicht wird. Das Szenario $+2^{\circ}\text{C}$ wird im RCP 4.5 etwa gegen Ende des Jahrhunderts erreicht, im RCP 8.5 hingegen bereits in der Mitte des Jahrhunderts (2043–2072).

Bericht	ΔT	RCP	Klimaperiode
CH2018	+1°C	RCP 2.6	– (Max +0.7°C)
		RCP 4.5	2027 – 2056
		RCP 8.5	2023 – 2052
	+2°C	RCP 2.6	–
		RCP 4.5	– (Max +1.8°C)
		RCP 8.5	2043 – 2072
	+3°C	RCP 2.6	–
		RCP 4.5	–
		RCP 8.5	2058 – 2087
	+4°C	RCP 2.6	–
		RCP 4.5	–
		RCP 8.5	– (Max +3.9°C)

Tabelle 4: Link zwischen Temperaturszenario der hier vorgestellten Projektionen und der erwarteten Klimaperiode aus CH2018 für die verschiedenen RCP Szenarien. Das Temperaturszenario bezieht sich auf die Abweichung der mittleren CH-Jahrestemperatur gegenüber der "neuen" Referenzperiode 1991-2020. Die erwarteten Klimaperioden wurden aus der Abbildung 4 entnommen und dafür das Temperaturszenario um 0.5°C für die "neue" Referenzperiode korrigiert.

2.4 Fit für tägliche Abnahmen

Um die Schneehöhenprojektionen zu erstellen, wurden für jedes Temperaturszenario, jede Höhenstufe und jeden Tag im Jahr spezifische Reduktionsfaktoren ermittelt. Zur mathematischen Beschreibung der saisonalen Abhängigkeit wurden Studien herangezogen, die monatliche oder tägliche Daten bereitstellen (siehe Tabelle 1 unter Bemerkung). Andere Studien, die nicht über die erforderlichen Daten verfügen, wurden ausschließlich zur Validierung der regionalen Projektionen verwendet.

Abbildung 5 zeigt ein Beispiel mit Daten aus einer Studie von (Schmucki, 2015, +2.4°C, 1350 m ü.M.). Die obere Grafik illustriert die aktuellen und zukünftigen Schneehöhen, während die untere Grafik die monatlichen Schneehöhenabnahmen darstellt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Schneesaison in Zukunft später beginnt und früher endet, wobei die relative Abnahme während dieser Zeiträume sehr hoch ist (bis zu -100%). Im Gegensatz dazu ist die relative Abnahme während des Schneehöhenmaximums am geringsten (ca. -20%, siehe Abb. 5). Diese Trends wurden in allen untersuchten Studien festgestellt und mithilfe einer quadratischen Funktion gefittet. Dadurch konnten tägliche relative Abnahmen sowie zukünftige relative Schneehöhen (100% - relative Abnahme) berechnet werden. Im Vergleich zu einer Gaußschen Glockenkurve ermöglicht die quadra-

tische Funktion auch Aussagen über die Dauer der Schneesaison.

Die quadratische Funktion $f(x)$ für die zukünftigen relativen Schneehöhen wird wie folgt definiert:

$$f(x) = a - \frac{a}{c^2} \cdot (-b + x)^2, \text{ wobei } f(x) \geq 0 \quad (1)$$

Für die zukünftige relative Abnahme ergibt sich entsprechend:

$$f(x) = 100 - a - \frac{a}{c^2} \cdot (-b + x)^2, \text{ wobei } f(x) \geq -100 \quad (2)$$

Hierbei ist x der Tag des hydrologischen Jahres (*day of water year*, DOWY), beginnend ab 1. September mit einem Bereich von $[1,366]$, um Schaltjahre zu berücksichtigen. Die Funktion $f(x)$ beschreibt die relative zukünftige Schneehöhe und wird durch drei Fitparameter definiert:

- a : Das Maximum der Funktion $f(x)$, entsprechend der höchsten zukünftigen relativen Schneehöhe oder der geringsten relativen Abnahme.
- b : Der Tag im DOWY an dem $f(x)$ das Maximum erreicht.
- c : Die Breite der Funktion, definiert als die Anzahl der Tage vor und nach dem Wert b , an denen noch Schnee liegt (Schneehöhe >0 cm).

Im Beispiel (siehe Abbildung 5) beträgt die zukünftige Schneehöhe im Mittel am 23. Januar (DOWY = 145) noch 47% der heutigen mittleren Schneehöhe an diesen Tag, was einer relativen Abnahme von -63% ($47\% - 100\%$) entspricht. In Zukunft gibt es im Mittel noch 198 Tage ($2 \cdot c$), mit Schnee (zwischen 17. Oktober und 30. April).

2.5 Abhängigkeit der Fitparameter mit Temperaturszenario und Höhenlage

Zur Bestimmung der Fitparameter a , b und c für die verschiedenen Temperaturszenarien (Kapitel 2.3) wurde ein Regressionsmodell trainiert. Um Überfittung (Overfitting) zu vermeiden, wurden für die Eingangsvariablen lediglich lineare Terme der Höhe, der Temperatur sowie ihrer Interaktion (Höhe \times Temperatur) zugelassen. Die Eingangsvariablen wurden skaliert, und eine lineare Regression wurde verwendet, um die Variablen a und zunächst die Parameter Δb und Δc zu berechnen, die anschließend in die endgültigen Werte für b und c umgerechnet wurden.

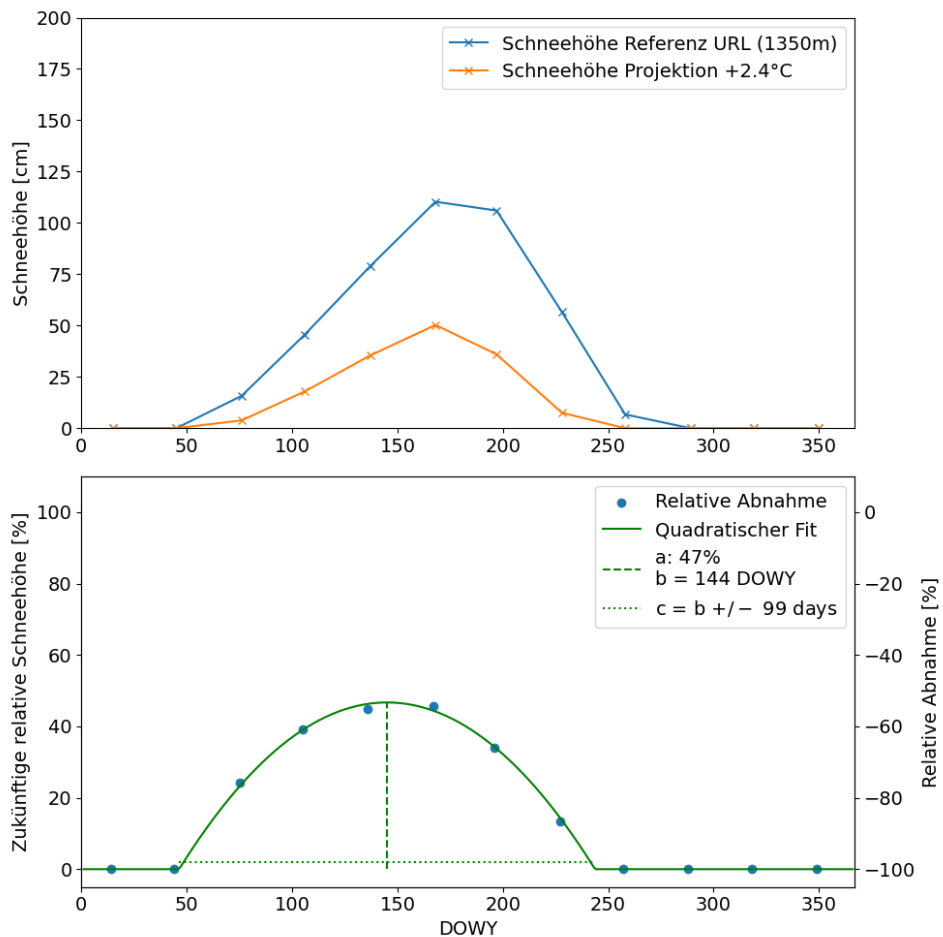


Abbildung 5: (Oben) Heutige und zukünftige Schneehöhe am Beispiel von [Schmucki \(2015\)](#) (Temperaturszenario: +2.7°C, Höhe: 1350 m ü.M) basierend auf Monatswerte und (unten) dazugehörige relative Schneehöhenabnahmen oder zukünftige relative Schneehöhe. Grüne Linie zeigt den quadratische Fit der Reduktionswerte (tägliche Werte). x-Achse beschreibt den Tag des hydrologischen Jahres (*Day of water year, DOWY*) beginnend ab dem 1. September.

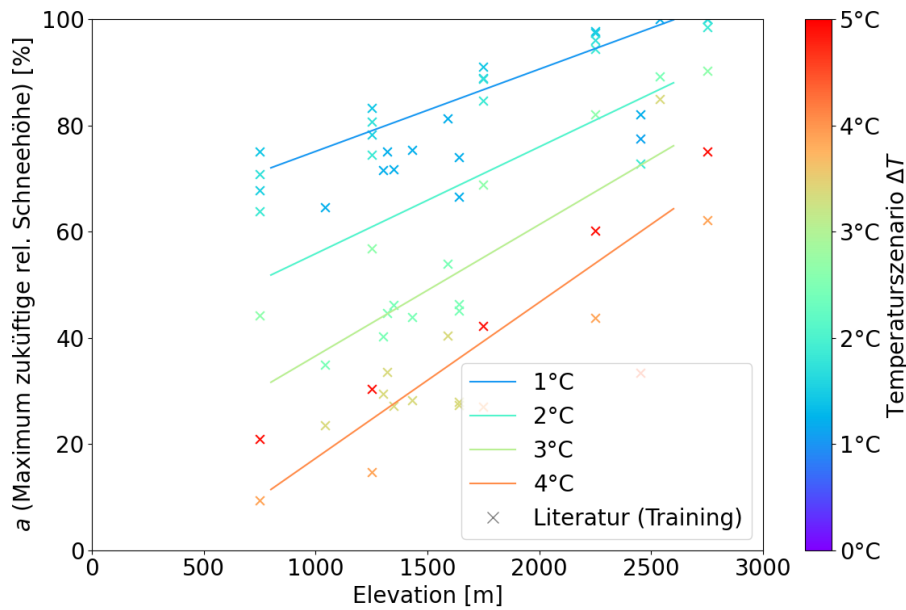


Abbildung 6: Abhängigkeit des Parameters a (Maximum der zukünftigen relativen Schneehöhe oder relativen Abnahme) mit Höhe und für verschiedene Temperaturszenarien. Punkte zeigen den Fitparameter für die Literaturwerte, Linien die mathematische Abhängigkeit mit Temperatur und Höhenlage.

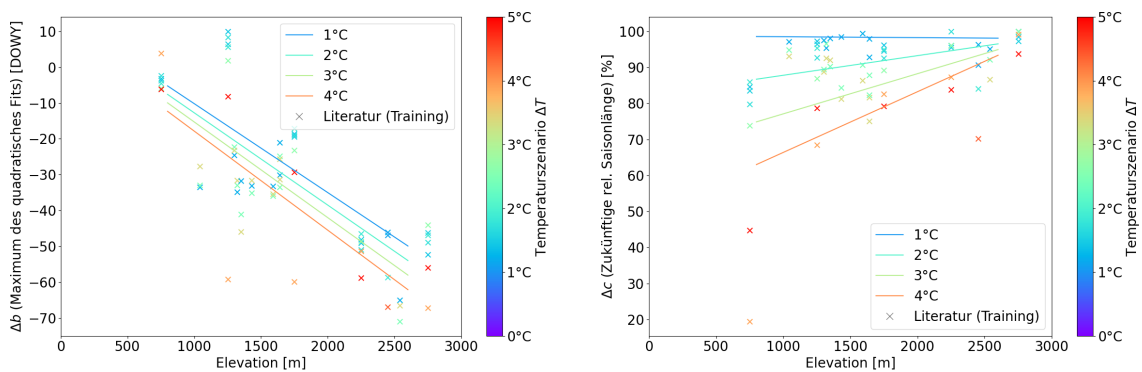


Abbildung 7: Abhängigkeit der Parameter Δb (links) und Δc (rechts) mit Höhe und für verschiedene Temperaturszenarien. Punkte zeigen den Fitparameter für die Literaturwerte, Linien die mathematische Abhängigkeit mit Temperatur und Höhenlage.

Trends für a

Wie schon Abbildung 3 zeigt Abbildung 6 ein ähnliches Muster. Der Parameter a (Maximum der zukünftigen relativen Schneehöhe) nimmt mit steigender Temperatur ab, in anderen Worten ist die Abnahme der Schneedecke grösser, je wärmer es wird. Weiterhin nimmt a mit der Höhe zu, d.h. die Abnahme der Schneedecke ist kleiner, je höher die Region ist.

Fit-Parameter b und Δb

Für b selbst konnte keine Systematik unter den Studien beobachtet werden, jedoch für die Variable Δb . Der Parameter Δb beschreibt die zeitliche Verschiebung zwischen dem Schneehöhenmaximum der Referenzperiode und dem Maximum der Fitfunktion in Abbildung 5. In Abbildung 5 erreicht beispielsweise die Schneehöhe der Referenzperiode ihr Maximum am Tag $\text{DOWY} = 210$, während die relative Abnahme ihr Maximum am Tag $b = \text{DOWY} = 178$ erreicht ($\Delta b = -32$ Tage). Monatliche Werte für Schneehöhen der Referenzperiode wurden dafür zu täglichen Werten linear interpoliert.

Trends für Δb

- In höheren Regionen tritt das Maximum der relativen Abnahme früher im Vergleich zum Schneehöhenmaximum auf.
- Bei höheren Temperaturen verschiebt sich das Maximum der relativen Abnahme ebenfalls nach vorne.

Fit-Parameter c und Δc

Anstatt den Parameter c selbst zu fitten, also die zukünftige absolute Anzahl der Tage mit Schnee (Schneehöhe >0 cm), haben wir den Parameter Δc gefittet. Δc beschreibt die zukünftige relative Anzahl der Tage mit Schnee im Vergleich zur Referenzperiode. Δc lieferte bessere Ergebnisse, da der klimatologischen Datensatz eine grosse Variabilität zwischen den Regionen aufweist.

Trends für Δc

- Mit zunehmender Erwärmung nimmt die relative Anzahl der Tage mit Schnee ab, d.h. je wärmer es ist desto weniger Tage im Jahr wird es geben, an denen Schnee liegt.
- Die relative Anzahl der Tage mit Schnee nimmt mit der Höhe zu (d.h. der Rückgang ist kleiner), d.h. umgekehrt, dass der Rückgang in tiefen Lagen am grössten ist.

Symmetrie der quadratischen Funktion

Zusätzlich wurde untersucht, ob die quadratische Funktion asymmetrisch ist, d.h., ob die relative Abnahme während der Akkumulations- oder der Schmelzphase stärker ausgeprägt ist. Hier konnten jedoch keine systematischen Muster festgestellt werden.

2.6 Erstellung der regionalen Schneehöhenprojektionen

Für jede Region und Höhenstufe wurden die Schneehöhenprojektionen aus den klimatologischen Daten (Kapitel 2.1) sowie der quadratischen Fitfunktion der Schneehöhenreduktion (Gleichung (1)) berechnet. Diese Fitfunktion basiert auf den Parametern a , Δb und Δc , die für das jeweilige Temperaturszenario ermittelt wurden. Die Funktion liefert für jeden Tag im Jahr einen spezifischen Reduktionsfaktor.

Um den Fit präzise anzuwenden, wurden zusätzlich die folgenden Schritte durchgeführt:

Bestimmung von b

Der Parameter b wird für jede Region und Höhenstufe separat bestimmt aus Δb und dem Tag, an dem die klimatologische Schneehöhe der Region ihr Maximum ($\text{DOWY}_{max,ref}$) erreicht. Dieser Tag wird durch die Anwendung eines gleitenden Mittels über 30 Tage auf die Schneehöhenzeitreihe ermittelt, um kurzfristige Variabilität auszugleichen. Nun kann b berechnet werden als: $b = \text{DOWY}_{max,ref} + \Delta b$.

Bestimmung von c

Um nun für die regionalen Projektionen den regional abhängigen Parameter c (Anzahl der Tage mit Schnee) aus Δc zu bestimmen wurde zunächst für jede Region und Höhenstufe

die Anzahl der Tage mit Schnee während der Referenzperiode c_{ref} bestimmt und dann c berechnet als $c = c_{ref} \times \Delta c$.

Unsicherheitsbetrachtungen und Auswahl der Temperaturszenarien

Die mittlere Jahrestemperatur zeigt zwischen den Jahren 2000 und 2100 eine Variabilität von etwa $+/- 1^\circ\text{C}$ für jedes RCP-Szenario (Abbildung 4). Um diese Unsicherheiten in den Temperaturszenarien zu berücksichtigen, wurden für die Schneeprojektionen folgende Szenarien gewählt:

- **Medianprognosen:** Der regionalen Schneehöhen wurden auf Basis der jeweiligen Temperaturszenarien ΔT berechnet.
- **5. Perzentil (stärkere Erwärmung):** Für eine pessimistischere Prognose wurde eine Temperaturerhöhung von $\Delta T + 1^\circ\text{C}$ angenommen.
- **95. Perzentil (schwächere Erwärmung):** Für eine optimistischere Prognose wurde eine Temperaturerhöhung von $\Delta T - 1^\circ\text{C}$ verwendet.

3 Projektionen

Um eine Vorstellung von den Projektionen zu geben, wird hier die heutige und zukünftige Schneedeckenentwicklung an einer Auswahl von Beispielen vorgestellt. Abbildung 8 zeigt die Schneehöhenentwicklung für die Region 1, Surselva auf einer Höhe von 1600 m ü.M. für die Referenzperiode und bei einem Temperaturszenario von $+1^\circ\text{C}$. Analog zu Abbildung 2 zeigt die Grafik den Median des Schneehöhenverlaufs über 30 Jahre, also den Wert, bei dem in 50% der Winter die Schneehöhe darüber und in 50% darunter liegt. Weiterhin zeigt sie das 5. Perzentil (in 5% der Winter liegt weniger Schnee) und das 95. Perzentil (in 95% der Winter liegt weniger, bzw. in 5% mehr Schnee). Am 1. Januar beträgt die Schneehöhe in dieser Region und Höhenlage im Median 40 cm während der Referenzperiode, bei $+1^\circ\text{C}$ liegen im Median nur noch 32 cm. Weiterhin kann man sagen, dass im Zeitraum zwischen dem 16. Dezember und dem 16. April die Schneehöhe im Median durchgehend über 30 cm liegt. Bei einem Temperaturszenario von $+1^\circ\text{C}$ verkürzt sich dieser Zeitraum von 28. Dezember bis 23. März.

Wichtig zu beachten ist jedoch, dass diese Grafik den Median über 30 Jahre darstellt. Das bedeutet, dass sie keine Auskunft darüber gibt, ob an einem einzelnen Winter durch-

gängig zwischen dem 28. Dezember und dem 23. März mindestens 30 cm Schnee bei $+1^{\circ}\text{C}$ liegen werden. Einzelne Winter können deutlich von diesem mittleren Verlauf abweichen und in manchen Jahren kann die Schneehöhe in diesem Zeitraum auch zeitweise unter 30 cm fallen.

Um Aussagen über Schneesicherheit treffen zu können, kann analog dazu das 5. Perzentil betrachtet werden. Dieses zeigt beispielsweise, dass am 1. Januar in 95% der Winter mindestens 6 cm Schnee bei $+1^{\circ}\text{C}$ Erwärmung liegen werden. Hierbei möchten wir auch betonen, dass dieser Datensatz nicht dazu geeignet ist, Aussage über Extremwerte zu treffen. In einzelnen Winter kann auch weniger Schnee liegen oder im Extremfall auch gar kein Schnee vorhanden sein.

Den Einfluss der Höhe einer einzelnen Regionen zeigt Abbildung 9 für die Region 12, Nordwestliches Tessin bei $+2^{\circ}\text{C}$. Hohe Regionen weisen deutlich mehr Schnee auf als tiefe. Während der Referenzperiode zeigen die Daten im Median erst ab einer Höhe von 1200 m ü.M. an wenigen Tagen (in höheren Lagen mehr) mehr als 30 cm Schnee. Bei einer Erwärmung von $+2^{\circ}\text{C}$ werden erst ab einer Höhe von 1400 m ü.M. im Median mehr als 30 cm Schnee liegen.

Die regionalen Unterschiede werden in Abbildung 10 besonders deutlich. Diese zeigt die Schneeentwicklung für alle Regionen auf 1400 m ü.M. für die Referenzperiode und einem Temperaturszenario von $+3^{\circ}\text{C}$. Während in Regionen wie den Glarneralpen auch beim diesem Temperaturszenario auf 1400 m ü.M. noch gute 30 cm Schnee im Mittel akkumuliert werden, sieht es in Regionen wie den Vispertälern deutlich dünner aus.

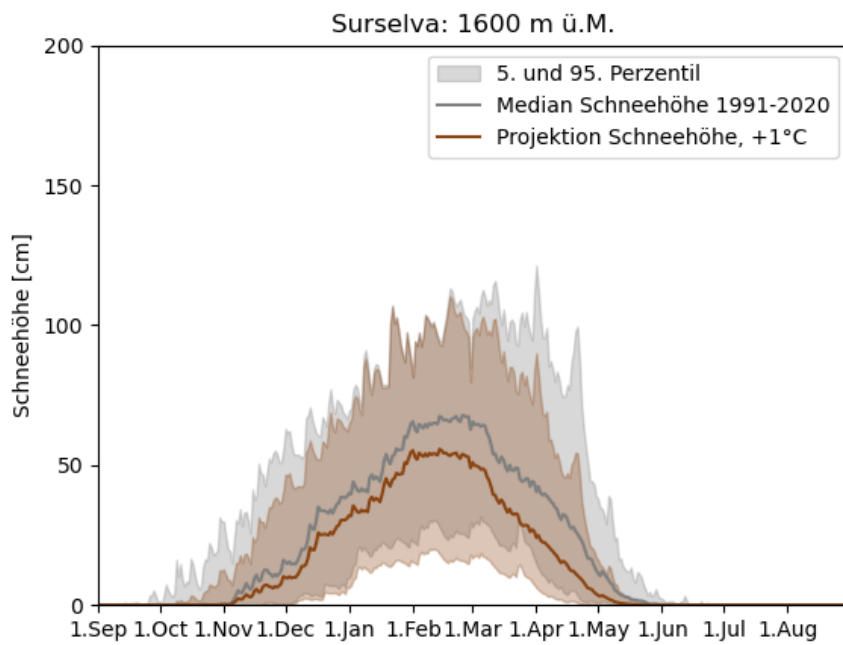


Abbildung 8: Schneehöhenentwicklung für die Region 1, Surselva auf 1600 m ü.M. für die Referenzperiode 1991-2020, sowie Projektion bei +2°C.

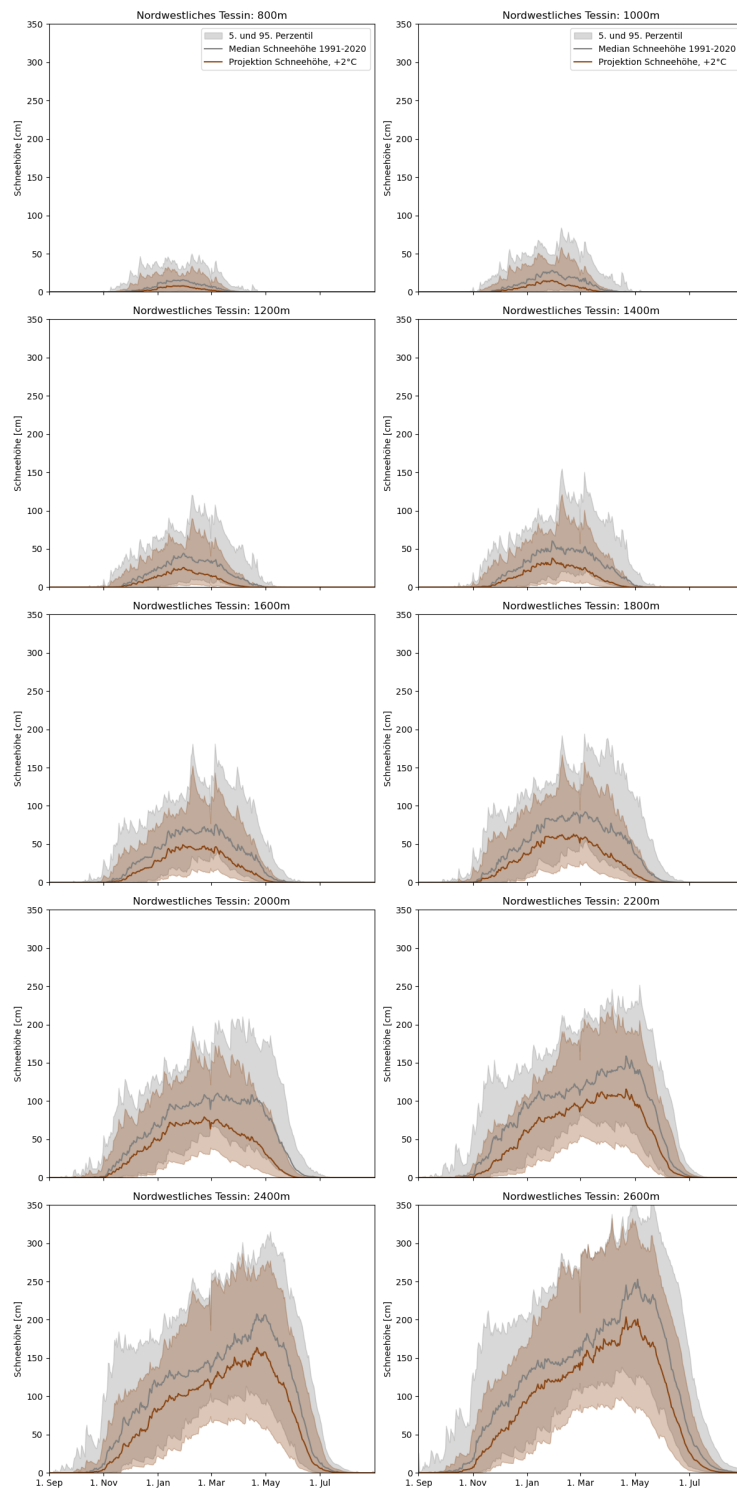


Abbildung 9: Schneehöhenentwicklung für die Region 12, Nordwestliches Tessin für alle Höhenstufen für die Referenzperiode 1991-2020, sowie Projektion bei +2°C.

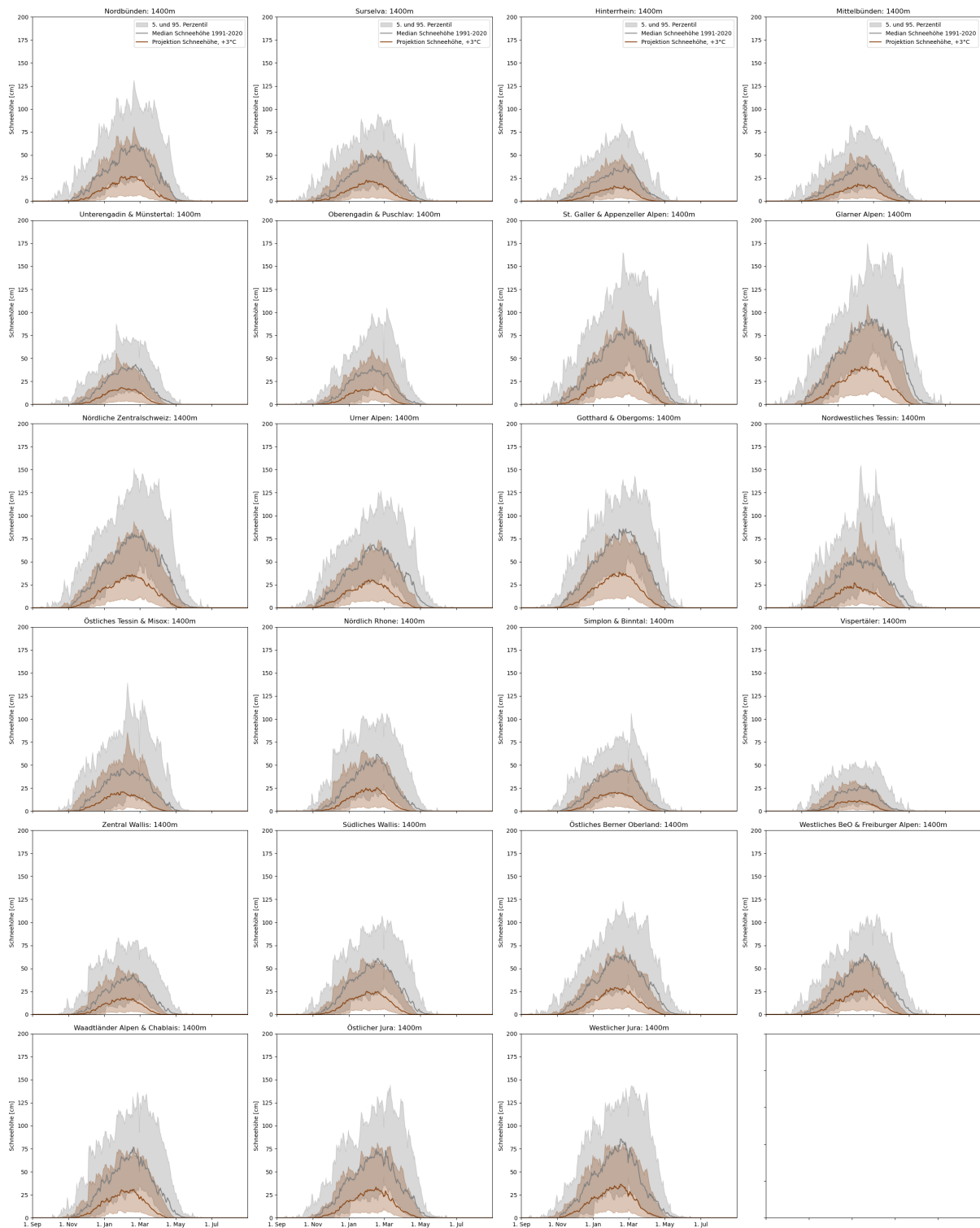


Abbildung 10: Schneehöhenentwicklung für alle Regionen auf 1400 m ü.M. für die Referenzperiode 1991-2020, sowie Projektion bei +3°C.

4 Validierung

Für die Projektionen wurden alle Datenpunkte mit der Bemerkung Training in Tabelle 1 genutzt. Zur Validierung wurden sowohl unabhängige Studien (siehe Tabelle 1 und 2, Bemerkung: Validierung) als auch unabhängige Schnee-Variablen herangezogen. Diese sind folgende:

- NDJFMA-Abnahme der Schneehöhen
- Mittlere Saisonlänge (Anzahl Tage mit einer Schneehöhe >30 cm für das gesamte hydrologische Jahr)

Abbildung 11 zeigt die NDJFMA-Abnahme der Projektionen im Vergleich zu den Literaturwerte. Hierfür stehen deutlich mehr Punkte für die Validierung zur Verfügung, als für das Training genutzt wurden. Die Literaturwerte liegen in einem Bereich von $\Delta T + / - 1^\circ\text{C}$ um das hier betrachtete Temperaturszenario $\Delta T = +2^\circ\text{C}$.

Für die Projektionen wird dabei das regionale Mittel des Medians gezeigt. Um die Unsicherheiten der Projektionen in Abbildung 11 darzustellen, wurden die NDJFMA-Abnahmen des 5. und 95. Perzentsils aufgetragen.

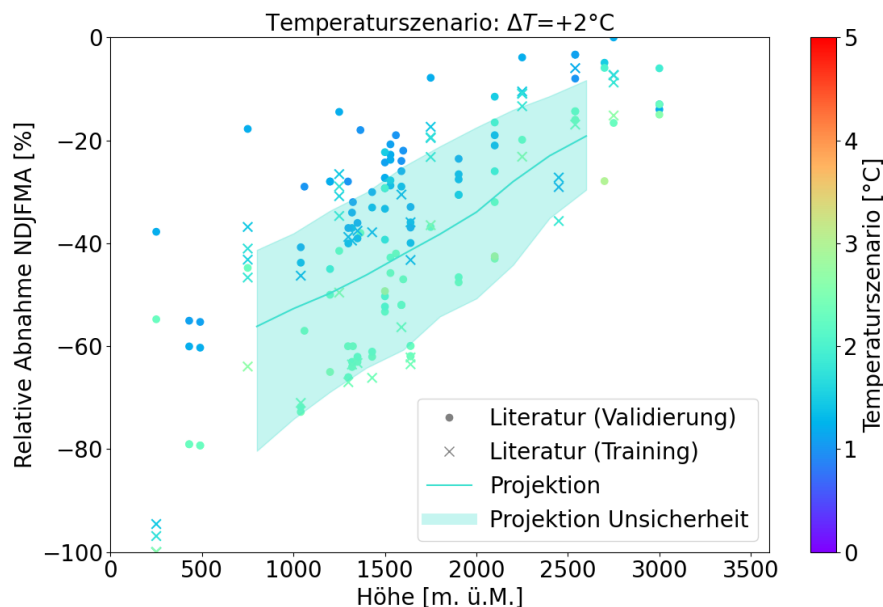


Abbildung 11: Relative Abnahme der NDJFMA-Schneehöhe bei $+2^\circ\text{C}$ für Literaturwerte und Projektion.

Analog zeigt Abbildung 12 die Saisondauer (Schneehöhe >30 cm). Wir wollen darauf

hinweisen, dass hier die Saisondauer nicht das gleiche ist wie c , die Anzahl der Tage mit Schnee (Schneehöhe >0 cm).

Diese Variable zeigt grössere Schwankungen für die Projektionen auf, da diese Variable durch einen Schwellwert bestimmt ist, was mathematisch immer grössere Variabilitäten verursachen kann. Zudem weist der klimatologische Datensatz in der Referenzperiode sehr variable Saisonlängen für die verschiedenen Regionen auf.

Wir wollen auch darauf aufmerksam machen dass die mathematisch bestimmten Reduktionsfaktoren vor allem in den Randmonaten eine grosse Unsicherheit haben. Deswegen sind diese Projektionen nicht geeignet dafür, um zuverlässig die Anzahl der Tage mit Schwellwerten kleiner als 30 cm Schnee zu bestimmen.

Zusammenfassend zeigt die Validierung, dass unsere Schneeprojektionen mit den Ergebnissen aus unabhängigen Studien und deren Unsicherheitsbereich übereinstimmen. Die generellen Abnahmen der Projektionen (z.B. NDJFMA-Abnahme der Schneehöhen) zeigen plausible Werte. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass insbesondere in Randmonaten und an Tagen mit geringen Schneehöhen, die Unsicherheit steigt, sowohl in unabhängigen Studien sowie auch in unseren Projektionen, was die Zuverlässigkeit für die Bestimmung von Tagen mit geringeren Schneehöhen einschränkt.

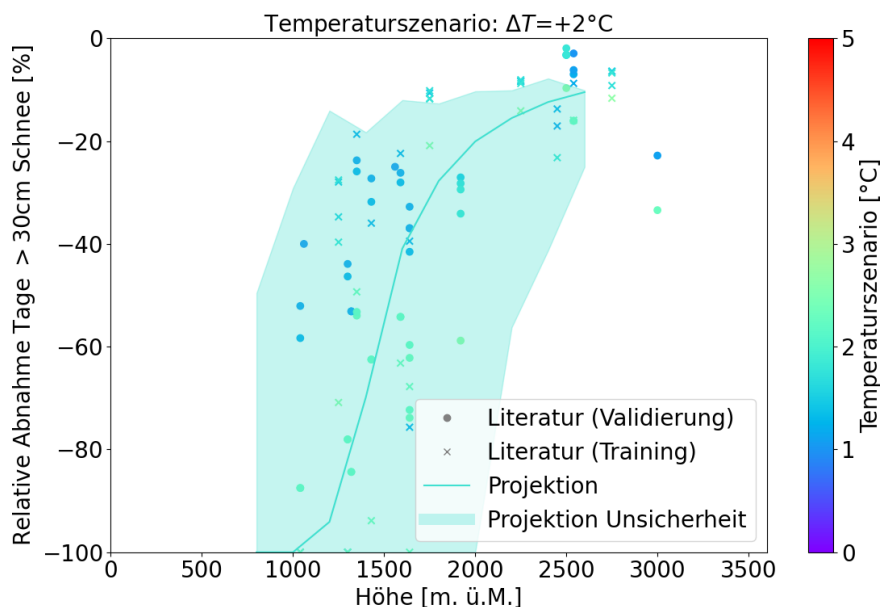


Abbildung 12: Relative Abnahme der mittleren Saisonlänge (Schneehöhe mindestens 30 cm) bei $+2^\circ\text{C}$ für Literaturwerte und Projektion bezogen auf das gesamte Kalenderjahr.

5 Nord- und Südexpositionen

Um die Schneehöhe auf Nord- und Südhänge zu projizieren haben wir eine Hangneigung von $15^\circ + / - 5^\circ$ gewählt, da diese Hangneigung der Steilheit der blauen und roten Pisten entspricht ([Kommission Rechtsfragen Schneesportanlagen, 2024](#)). Allerdings erwies sich der SPASS-Datensatz [2.1](#) als ungeeignet, um Aussagen über Schneehöhen in Abhängigkeit von Expositionen zu treffen, da er nicht auf einem Energiebilanzmodell basiert und eine Auflösung von 1 km hat. Stattdessen nutzten wir einen alternativen Datensatz, der auf einem vollständigen Energiebilanzmodell beruht. Dieser Datensatz reicht zwar zeitlich nur bis zur Wintersaison 2017 zurück, bietet jedoch eine räumliche Auflösung von 250 m.

Im Folgenden wird in Kapitel [5.1](#) der verwendete Datensatz beschrieben. Kapitel [5.2](#) erläutert die Methodik zur Bestimmung des expositionsabhängigen Reduktionsfaktors für Schneehöhen, und Kapitel [5.4](#) beschreibt die Projektion der Schneehöhen für Nord- und Südhänge mithilfe des zuvor berechneten Faktors.

5.1 Daten: OSHD-FSM

Das physikalische Energiebilanzmodell FSM2oshd des Operationellen Schnee-Hydrologischen Dienstes (OSHD) simuliert hochaufgelöste Schneehöhen in der Schweiz ([Mott et al., 2023](#)). Mit einer räumlichen Auflösung von 250 m berücksichtigt das Modell sowohl offenes Gelände als auch bewaldete Gebiete. Für unsere Analyse, die auf Schneehöhen im Kontext des Skibetriebs fokussiert ist, haben wir einen Datensatz verwendet, der ausschließlich offenes Gelände umfasst und bis zur Wintersaison 2017 zurückreicht. FSM2oshd umfasst die vollständige Massen- und Energiebilanz der Schneedecke unter Verwendung stündlicher meteorologischer Daten und der Assimilation von Messdaten. Saisonale Muster auf unterschiedlichen Expositionen werden detailliert erfasst, da das Modell mikroklimatische Effekte wie Abschattung und Windeinflüsse simulieren kann, die von Temperatur-Index-Modellen (Kapitel [2.1](#)) nicht erfasst werden. Für die Berechnung der kurzwelligen Strahlung wird ein dynamisches Downscaling angewendet, das die Abschattung durch das Gelände berücksichtigt ([Jonas et al., 2020](#)). Darüber hinaus simuliert FSM2oshd auch die kleinräumige Schneeverteilung mit einer Korrektur des Schneeniederschlags, der aus hochaufgelöste Schneehöhenmessungen abgeleitet wurde ([Mott et al., 2023](#)).

	Hangneigung α	Exposition β
Flach	$\alpha < 5^\circ$	
Nord	$10^\circ < \alpha < 20^\circ$	$315^\circ < \beta < 45^\circ$
Süd	$10^\circ < \alpha < 20^\circ$	$135^\circ < \beta < 225^\circ$

Tabelle 5: Hangneigung und Expositionen der Gitterpunkte für die drei Expositionen Flach, Nord und Süd.

Höhenstufe	# Flach	# Nord	# Süd
800	30'969	7'732	7'654
1000	14'204	7'593	6'922
1200	5'993	5'376	5'029
1400	2'287	4'050	3'769
1600	1'046	3'241	2'871
1800	1'106	3'016	2'500
2000	875	2'980	2'488
2200	716	2'776	2'458
2400	758	2'589	2'399
2600	539	2'292	2'075

Tabelle 6: Anzahl Gitterpunkte, die pro Höhenstufe und Exposition für die Analyse zur Verfügung stehen.

5.2 Methodik zur Bestimmung expositionsabhängiger Faktoren

Für die Untersuchung wurde angenommen, dass die Neuschneemengen im Mittel über alle Expositionen gleich sind, jedoch Setzung und Schmelze durch kurzweilige Strahlung expositionsabhängige Unterschiede aufweisen. Der Änderungsfaktor wurde anhand täglicher Schneehöhendaten aus acht Wintern (2017–2024) mit einer räumlichen Auflösung von 250 m bestimmt.

Zunächst wurden flache, nord- und südausgerichtete Gitterpunkte aus verschiedenen Höhenbändern über die ganze Schweiz ausgewählt, wobei dieselben Höhenbänder wie in Kapitel 2.1.1 verwendet wurden. Tabelle 5 zeigt die Definitionen für Flachfelder, Nord- und Südhänge; Tabelle 6 listet die Anzahl der Gitterpunkte, die pro Exposition und Höhenstufe zwischen 500 und 30.000 variiert.

Für jeden Gitterpunkt wurde täglich die relative Änderung der Schneehöhe ($\Delta_{rel}HS(t_2)$) berechnet:

$$\Delta_{rel}HS(t_2) = \frac{HS(t_2) - HS(t_1)}{HS(t_1)} \quad (3)$$

Diese relative Änderung umfasst Schneefälle (positive Werte), Setzung und Schnee-

schmelze (im Folgenden "Setzung" genannt, negative Werte). Um die Setzungsrate zu bestimmen, wurde ein 30-Tage-Medianfilter auf jeden Punkt angewendet, der Schneefälle ignoriert, da nur die längerfristige Setzung expositionsabhängig ist. Die mittlere Setzungsrate ($\overline{\Delta_{rel}HS}$) wurde für jeden Tag im Jahr bestimmt, in dem über alle Punkte über acht Jahre gemittelt und erneut geglättet wurde. Abbildung 13 illustriert diese Kurven am Beispiel von 1400 m Höhe.

In den Randmonaten ist $\overline{\Delta_{rel}HS}$ am größten, während in den Wintermonaten Dezember bis Februar (DOWY \sim 90-180) die geringsten Änderungen zu beobachten sind. Zudem zeigt sich, dass die Abnahme an Südhängen stärker und an Nordhängen schwächer ausgeprägt ist.

5.3 Berechnung expositionsabhängiger Setzungsfaktoren

Anhand der Setzungsrate werden nun Setzungsfaktoren für Nord- (fac_N) und Südhänge (fac_S) im Vergleich zum Flachfeld wurden wie folgt berechnet:

$$fac_N = \overline{\Delta_{rel}HS}_{Nord} / \overline{\Delta_{rel}HS}_{Flach} \quad (4)$$

$$fac_S = \overline{\Delta_{rel}HS}_{Süd} / \overline{\Delta_{rel}HS}_{Flach} \quad (5)$$

Da keine klare saisonale Systematik erkennbar war (siehe Abbildung 14), wurde ein mittlerer Setzungsfaktor für Nord- und Südhänge für das Winterhalbjahr (November bis April) berechnet. Sowohl der Mittelwert als auch der Median über das ganze Jahr lieferte schlechtere Ergebnisse (nicht gezeigt). Abbildung 15 zeigt, dass der Setzungsfaktor für Nordhänge kleiner als 1 ist und mit der Höhenlage gegen 1 ansteigt. Werte unter 1 bedeuten, dass die Schneedecke an Nordhängen langsamer schmilzt oder sich setzt, wodurch dort mehr Schnee liegt. Für Südhänge liegt der Setzungsfaktor stets über 1 und erreicht bei 1600 m ein Maximum von mehr als 1.5. Mit zunehmender Höhe sinkt der Faktor wieder ab.

5.4 Projektion der Schneehöhen an Nord- und Südhängen

Die Schneehöhen auf Nord- und Südhängen wurden für alle Regionen, Höhenstufen, Temperaturszenarien sowie Median-, 5. und 95. Perzentil der Schneehöhen berechnet. Dabei

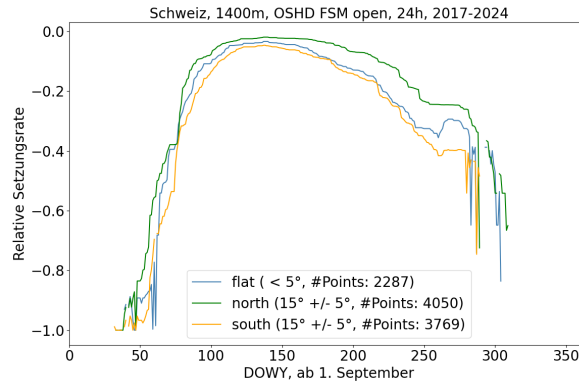


Abbildung 13: Mittlere Setzungsrate auf 1400 m $\overline{\Delta HS}$ für Flachfelder, Nord- und Südhänge aus dem 30-Tage Medianwerten der relativen Änderung der Schneehöhe bestimmt (über alle Punkte und 8 Jahre gemittelt).

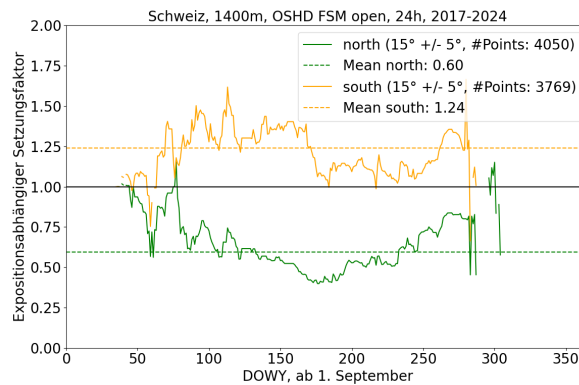


Abbildung 14: Expositionsabhängige Setzungsfaktoren auf 1400 m im Vergleich zum Flachfeld, berechnet aus den Linien in Abbildung 13. Um die Schneehöhen an Nord- und Südhängen zu bestimmen wurde der mittlere Setzungsfaktor (Mittelwert November-April, gestrichelten Linie) genutzt.

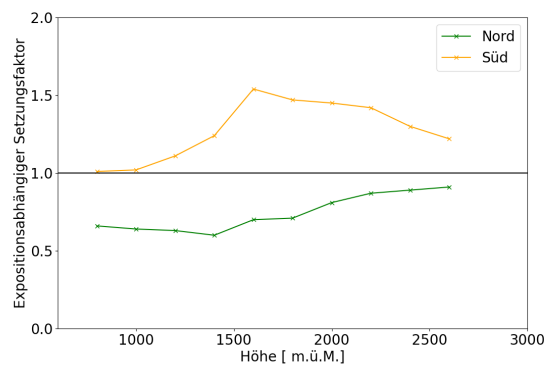


Abbildung 15: Höhenabhängigkeit der expositionsabhängigen Setzungsfaktoren im Vergleich zum Flachfeld (gestrichelte Linie in Abbildung 14).

haben wir folgende Schritte durchgeführt:

1. Berechnung der Änderungen im Flachfeld:
 - Absolute Änderung ($\Delta_{abs}HS_{Flach}$)
 - Relative Änderung ($\Delta_{rel}HS_{Flach}$)
2. Anpassung der Setzungsrates an die Exposition:

$$\Delta_{rel}HS_{Expo} = \Delta_{rel}HS_{Flach} \cdot fac_{Expo}$$

3. Generierung der Schneehöhen (Start ab 1. September):
 - Zunahmen: Änderungen des Flachfelds werden zur Schneehöhe des Vortags addiert.
 - Abnahmen/Setzung: Die Abnahmen werden durch $\Delta_{rel}HS_{Expo} \cdot HS_{Expo}$ berechnet und abgezogen.
 - Schneehöhen kleiner 3 cm werden auf 0 gesetzt, wenn im Flachfeld schon am Vortag kein Schnee mehr lag.

Dieses Verfahren berücksichtigt, dass Südhänge schneller schneefrei werden, während an Nordhängen länger Schnee liegt, wie in [Abbildung 16](#) zu sehen ist.

5.5 Validierung Expositionen

Für alle Schneehöhenprojektionen (alle Regionen, Temperaturszenarien, Median, Schneehöhe und 9. und 95. Perzentil) haben wir jeweils die mittleren monatlichen Schneehöhen zwischen November und April berechnet und den Faktor zwischen monatlichen Schneehöhen auf Nord- und Südhängen und den Schneehöhen im Flachfeld berechnet. Diese Werte haben wir in [Abbildung 17](#) verglichen mit den Literaturangaben für die Höhenlagen 1300 m und 1800 m ([Urs Witmer unter Mitarbeit von Paul Filliger, Stephan Kunz und Peter Küng, Geographisches Institut der Universität Bern, 1986](#)). Die Projektion stimmt sehr gut mit den Literaturwerten überein. Für Nordhänge nimmt der Faktor mit dem Saisonverlauf zu, für Südhänge ab. Weiterhin sind höhere Lagen an beiden Expositionen dem Flachfeld ähnlicher (Faktor liegt näher bei 1). Nur für Südhänge auf 1300 m sind die Faktoren der Projektionen deutlich kleiner als die Literaturwerte. Ein möglicher Grund ist, dass die Literaturwerte in den 80er Jahren gemessen wurden und vor allem

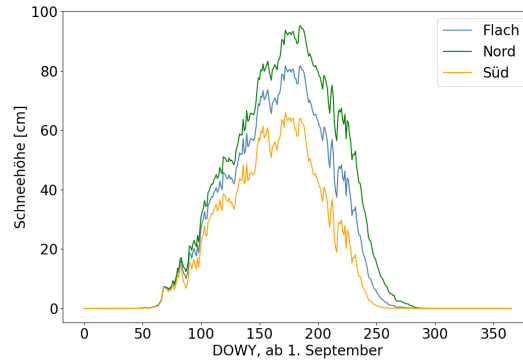


Abbildung 16: Schneehöhe im Flachem und an Nord- und Südhängen für die Region Nordbünden, 1600 m, 1991-2020.

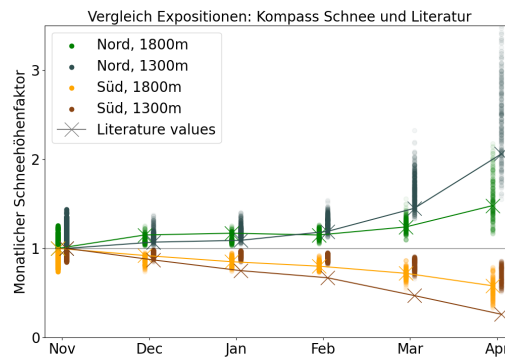


Abbildung 17: Vergleich monatlichen Schneehöhenfaktoren an Nord- und Südhängen im Vergleich zum Flachfeld von den Projektionen (alle Regionen, Temperaturszenarien, Median, Schneehöhe und 9. und 95. Perzentil) und den Literaturwerten für 1300 m und 1800 m.

in der Höhenlage 1300 m hat sich die Schneedecke am stärksten verändert. Ein Vergleich der Literaturwerte auf 1300 m mit den Projektionen auf 1600 m stimmen deutlich besser überein (nicht gezeigt).

6 Bestimmung Beschneigungspotenzial

Zur technischen Beschneigung wird Wasser durch Düsen zerstäubt und die kleinen Wassertropfen gefrieren dabei auf dem Weg zum Boden. Hierbei spielt nicht nur die Lufttemperatur eine Rolle. Bei sehr trockenen Verhältnissen, kann das Wasser dabei gut verdampfen, und die latente Wärme, die dabei der Umgebung entzogen wird, ermöglicht eine Beschneigung im Extremfall auch bei positiven Temperaturen. Um das Beschneigungspotenzial zu bestimmen wird aus diesem Grund die Feuchtkugeltemperatur T_B betrachtet, die sowohl

von der Lufttemperatur, als auch von der relativen Feuchte abhängt. TB wurde im Folgenden wie in [Stull \(2011\)](#) berechnet, wobei in Formel (6) die Lufttemperatur TA in $^{\circ}\text{C}$ und die relative Feuchte RH in % eingesetzt werden müssen:

$$\begin{aligned}
 TB = & TA \cdot \arctan\left(0.151977 \cdot \sqrt{RH + 8.313659}\right) \\
 & + \arctan(TA + RH) - \arctan(RH - 1.676331) \\
 & + 0.00391838 \cdot RH^{1.5} \cdot \arctan(0.023101 \cdot RH) - 4.686035
 \end{aligned} \tag{6}$$

Das theoretische Limit für die technische Beschneigung liegt bei $TB \leq -2.5^{\circ}\text{C}$ (<https://www.technoalpin.com/en/about-us/snowmaking-faqs/>), jedoch steigt die Effizienz der Schneekanonen mit tieferen Temperaturen.

Da für die Schweiz keine langjährig gegitterten Feuchte-Daten zur Verfügung stehen, wurde das zukünftige Beschneigungspotential auf Basis von Messdaten der Wetterstationen bestimmt. Im Gegensatz zu den Projektionen der natürlichen Schneedecke erfolgte dabei keine Aggregation über Regionen und Höhenstufen, um standortspezifische Effekte, wie etwa Kälteseen, zu berücksichtigen.

6.1 Stationsauswahl und Filter

Zunächst wurden alle automatischen Stationen oberhalb von 700 m ausgewählt, die sich in den Datenbanken von SLF und MeteoSchweiz finden liessen. Diese Stationen messen Lufttemperatur und relative Feuchte auf stündlicher Basis. Zur Qualitätssicherung der Daten wurden folgende Filter angewendet:

- Temperaturwerte (TA) unter -40°C oder über 50°C wurden entfernt.
- Werte der relativen Feuchte (RH) unter 0% oder über 120% wurden ebenfalls gelöscht.
- Werte von RH unter 5% wurden auf 5% gesetzt, Werte über 100% auf 100%.

Um die Regionen mit möglichst vielen Stationen gut abzudecken und gleichzeitig eine ausreichende Zeitspanne für klimatische Auswertungen zu gewährleisten, wurden nur jene Stationen berücksichtigt, für die im Zeitraum 2014-2015 bis 2024-2025 mindestens 10 von 11 Jahren Messdaten, ohne grössere Datenlücken vorlagen: Für jedes Jahr wurden

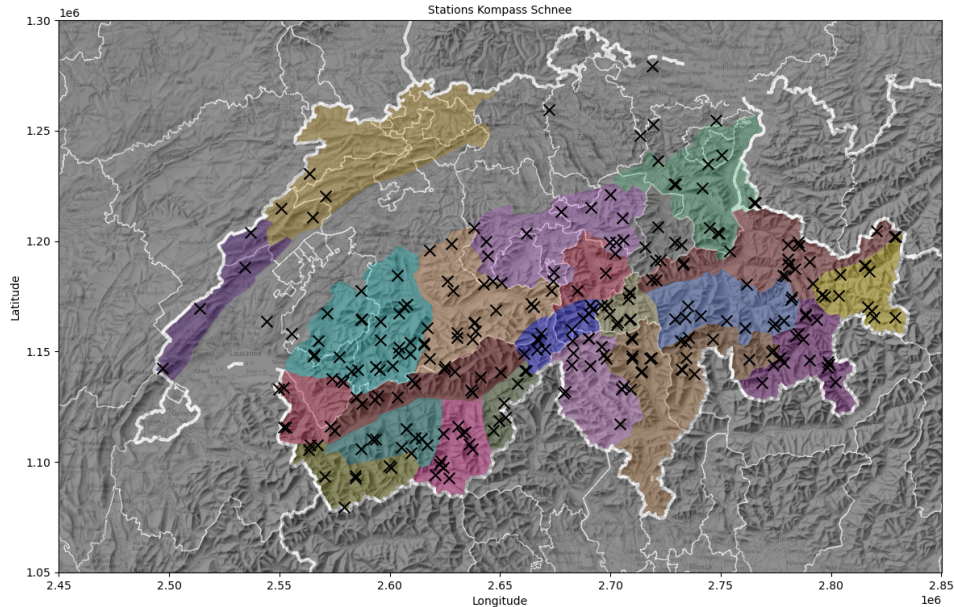


Abbildung 18: Standorte der Messstationen, die für die Bestimmung der zukünftigen Schneistunden zur Verfügung standen (schwarze Kreuze). Farben sind die Kompass Schnee Regionen.

Daten zwischen 1. November und 31. Januar analysiert, wobei in der kritischen Schneiphase zwischen 1. November und 15. Dezember Datenlücken von maximal 10% toleriert wurden. Bei größeren Ausfällen wurde das jeweilige Jahr für die betreffende Station nicht berücksichtigt, um eine systematische Unterschätzung der Schneistunden zu vermeiden.

Nach der Bereinigung der Daten stehen insgesamt 264 Stationen für die Berechnung der Schneistunden zur Verfügung (Abbildung 18).

6.2 Bestimmung: Schneistunden

Die Schneistunden, die der Beschneigung zur Verfügung stehen, hängt in erster Linie stark von dem Zeitraum ab, der betrachtet wird. Um hier die unterschiedlichen Bedürfnisse einzelner Skigebiete zu gewährleisten und weil die technische Schneeproduktion je nach Höhenstufe unterschiedlich früh startet, wurden drei verschiedene Startzeitpunkte in Absprache mit Marc Faas (Leiter technische Beschneigung, Parsenn, Davos), Gernot Nischler (TechnoAlpin) und Markus Pfeifer (TechnoAlpin) gewählt:

- 1. November
- 15. November
- 1. Dezember

Nun wurden für jede Station für jedes Jahr die Stunden gezählt die zwischen dem Startzeitpunkt und einem beliebigen Tag bis zum 31. Januar zur Verfügung gestanden sind.

Weiterhin wurde auch die Effizienz der Schneekanonen berücksichtigt, d.h. grössere Schneeproduktion in gleicher Zeit. In Absprache mit TechnoAlpin haben wir drei Bereiche für die Feuchtkugeltemperatur gewählt, und innerhalb dieser Bereiche die Schneestunden aufsummiert:

- $TB < -2.5^{\circ}\text{C}$
- $TB < -5^{\circ}\text{C}$
- $TB < -7^{\circ}\text{C}$

6.3 Fallbeispiel: Schneestunden bestimmen

Als Beispiel standen für die Station ZNZ2 11 Jahre an Daten zur Verfügung (keine Messausfälle). Für diese Jahre wurden zwischen dem 1.11. und dem 15.12. folgende Anzahl Stunden mit einer Feuchtkugeltemperatur kleiner -2.5°C berechnet:

TB	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3	Jahr 4	Jahr 5	Jahr 6	Jahr 7	Jahr 8	Jahr 9	Jahr 10	Jahr 11
$<-2.5^{\circ}\text{C}$	704	679	836	1009	745	972	852	935	894	953	901
$<-5^{\circ}\text{C}$	368	446	621	805	552	786	587	685	728	799	642

Für die 11 Jahre wurde nun das Minimum (679 h), das Maximum (1009 h), sowie das 20te Perzentil (745 h) der Schneestunden für die verschiedenen Temperaturbereiche der Feuchtkugeltemperatur ($<-2.5^{\circ}\text{C}$) bestimmt. Das 20te Perzentil besagt, dass in 20% aller Winter die Schneestunden unter diesem Wert lagen, d.h. an 80% aller Winter lagen die Schneestunden über diesem Wert. Im folgenden wird dieser Wert 80% aller Winter oder in 8 von 10 Winter genannt. Wir wollen auch darauf aufmerksam machen, dass die Werte für die verschiedenen Temperaturbereiche nicht zwingend aus dem gleichen Jahr kommen müssen, in diesem Beispiel bei $TB < -2.5^{\circ}\text{C}$ wurde das Minimum von 679 h im Jahr 2 gemessen, während das Minimum der Schneestunden bei $TB < -5^{\circ}\text{C}$ im Jahr 1 gemessen wurde.

6.4 Bestimmung des Beschneigungspotenzial für verschiedene Temperaturszenarien

Auch hier wurden die Temperaturszenarien $+1^{\circ}\text{C}$, $+2^{\circ}\text{C}$, $+3^{\circ}\text{C}$ und $+4^{\circ}\text{C}$ auf Basis der Referenzperiode 1991–2020 gewählt. Zur Abschätzung des Beschneigungspotenzials kam ein Delta-Change-Ansatz zum Einsatz: Die jeweilige Temperaturänderung wurde auf die Lufttemperatur aufgeschlagen. Die relative Feuchte blieb dabei unverändert, da basierend auf der Literatur davon ausgegangen wird, dass sie auch künftig primär von der jeweiligen Wettersituation abhängt und keine systematische Veränderung infolge des Klimawandels erfährt (Ruosteenoja and Räisänen, 2013; Gobiet et al., 2014).

Zur Bestimmung der Schneistunden für den Referenzzeitraum 1991–2020 wurde zunächst von den gemessenen Lufttemperaturen im Zeitraum 2014/15 bis 2024/25 ein Korrekturwert von 0.9°C abgezogen, entsprechend der durchschnittlichen Erwärmung in diesem Zeitraum. Für die jeweiligen Temperaturszenarien wurden anschließend die Temperaturänderungen auf die angepassten Lufttemperaturen addiert.

In einem nächsten Schritt wurden – analog zur bisherigen Methodik – zunächst die Feuchtkugeltemperatur berechnet. Darauf aufbauend erfolgte die Bestimmung der Schneistunden für verschiedene Bereiche der Feuchtkugeltemperatur sowie unterschiedliche Start- und Endzeitpunkte.

6.5 Fallbeispiel: Zukünftiges Temperaturszenario

Abbildung 19 zeigt die potentiellen Schneistunden für die Referenzperiode und bei einem Temperaturszenario von $+2^{\circ}\text{C}$ für die Station Vanil des Artses (1989 m). Während die gemessenen Schneistunden zwischen 231 h und 660 h lagen (nicht gezeigt), liegen hier die an die Referenzperiode angepassten Schneistunden mit 324 h bis 745 h deutlich höher, da die Temperaturdaten um den Korrektur von -0.9°C angepasst wurden. Bei einem Temperaturszenario von $+2^{\circ}\text{C}$ reduzieren sich die Stunden auf 78 h bis 371 h. In 8 von 10 Winters werden bei diesem Szenario mindestens 159 h zur Verfügung stehen, während es aktuell noch 454 h sind. Bei einer Feuchtkugeltemperatur von $<-5^{\circ}\text{C}$ verbleiben allerdings nur noch 30 h.

Die Abbildung 20 zeigt die Entwicklung der Schneistunden ab dem 1. November für die Station Col des Mosses (1412 m). Die potentiellen Schneistunden nehmen mit der Zeit stetig zu und die Unsicherheiten werden grösser. Mit Hilfe der Entwicklung kann

Start Schneeproduktion: **01.11.** Saisonstart: **15.12.** Temperaturszenario: **+2°C**

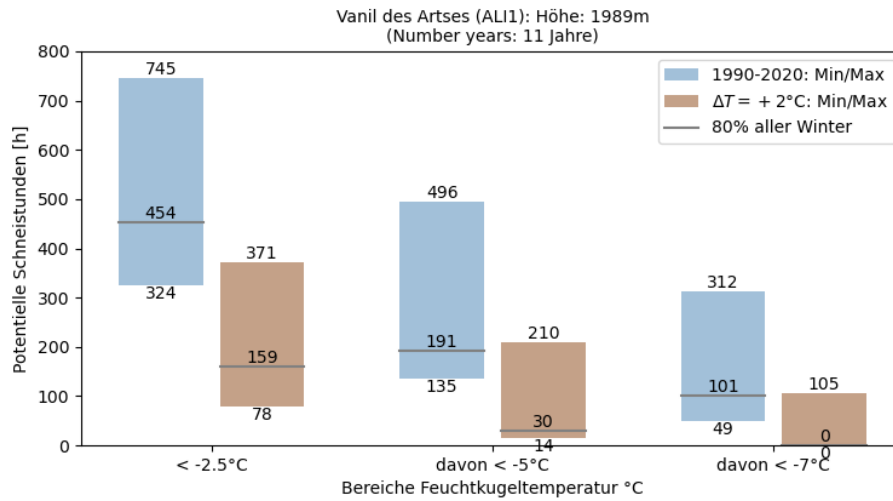


Abbildung 19: Potentielle Schneestunden an der Station ALI1 bei verschiedenen Bereichen der Feuchtkugeltemperatur für die Referenzperiode (1991-2020) und bei einem Temperaturszenario von +2°C.

abgeschätzt werden, wie viel Wochen für die Beschneigung theoretisch eingeplant werden müssen, wobei auch hier wetterbedingte Anpassungen getroffen werden müssen.

6.6 Validierung der Schneestunden: Temperaturszenarien

Um den Delta-Change-Ansatz für die Bestimmung der Schneestunden zu validieren, haben wir zusätzlich Daten der Periode 2004/2005-2014/2015 verwendet. Wir haben alle Stationen miteinander verglichen, die sowohl während der Periode 2004/2005-2014/2015 als auch der Periode 2014/2015-2024/2025 jeweils mindestens 10 Jahre Messdaten zur

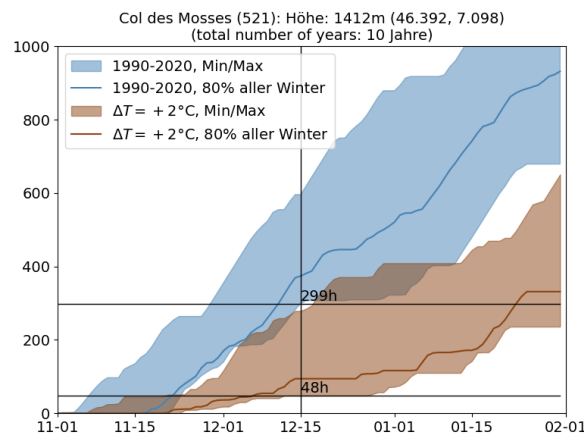


Abbildung 20: Entwicklung der potentiellen Schneestunden vom 1.11. bis zum 31.1. für die Station Col des Mosses und einer Feuchtkugeltemperatur von <-2.5°C.

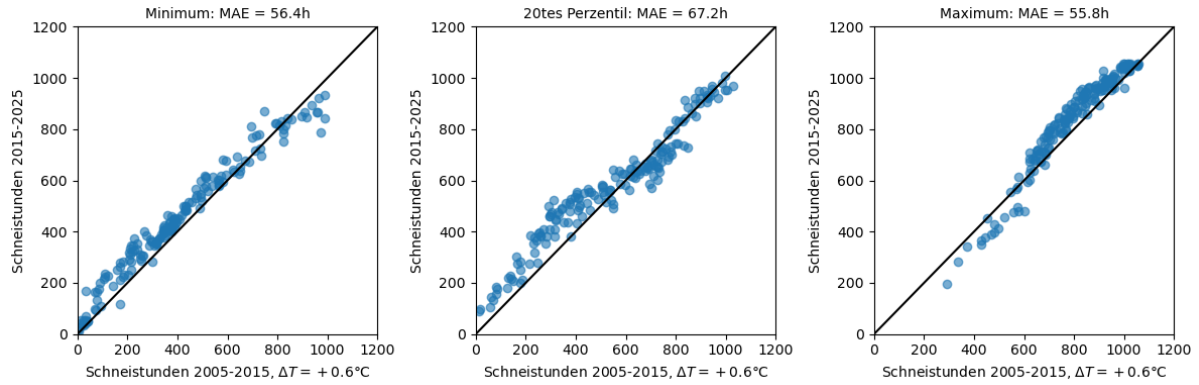


Abbildung 21: Vergleich der Schneistunden der Periode 2005-2015 und einem Temperaturszenario $+0.6^{\circ}\text{C}$ mit den Schneistunden der Periode 2015-2025.

Verfügung haben. Die zweite Periode hat eine Erwärmung von $+0.6^{\circ}\text{C}$ gegenüber der ersten Periode erfahren. Dementsprechend haben wir auf die erste Periode eine Temperaturszenario von $+0.6^{\circ}\text{C}$ gerechnet und die daraus resultierenden Schneistunden mit den Stunden der zweiten Periode verglichen (Abbildung 21). Der mittlere absolute Fehler beträgt zwischen 55 h und 67 h.

6.7 Validierung der Schneistunden: Höhenstufe

Grundsätzlich nehmen die Schneistunden mit der Höhe zu, wie in Abbildung 22 schön zu sehen ist. Um Ausreisser zu bestimmen wurde zunächst der Trend mittels einem Polynomfunktion 3. Grades der Daten mit der Höhe bestimmt, wie folgt bestimmt:

$$y = p_1 \cdot x^3 + p_2 \cdot x^2 + p_3 \cdot x + p_4, \quad (7)$$

wobei x die potentiellen Schneistunden und y die Höhe ist. Die Koeffizienten der Polynomfunktion $p_1 - \dots - p_4$ wurden so gefittet, dass der quadratische Fehler minimiert wurde. Der dritte Grad eignet sich besonders gut, da die Anzahl der Schneistunden sowohl nach unten (0 h), als auch durch den gegebenen Zeitraum nach oben (1057 h) begrenzt ist. Ausreisser wurden dann mittels der interquartile range (*IQR*) Methode bestimmt, indem die Verteilung der Fehler zwischen Polynomfunktion und gemessenen Daten betrachtet wurde. Dafür wurden zunächst das erste Quartil $Q1$ (auch 25tes Perzentil genannt) und das dritte Quartil $Q3$ (auch 75tes Perzentil genannt) der Fehler berechnet. Das *IQR* ergibt sich aus:

$$IQR = Q3 - Q1 \quad (8)$$

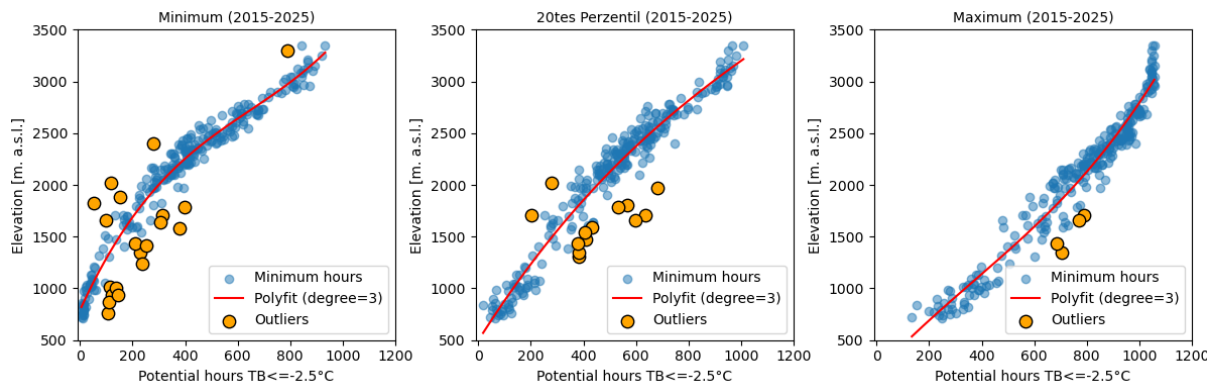


Abbildung 22: Minimale (links), 8 von 10 (Mitte) und maximale (rechts) Schneistunden bei $TB < -2.5^{\circ}\text{C}$ mit der Höhe. Orange Punkte sind Stationen, die vom Trend (rot, polyfit 3. Grad) abweichen.

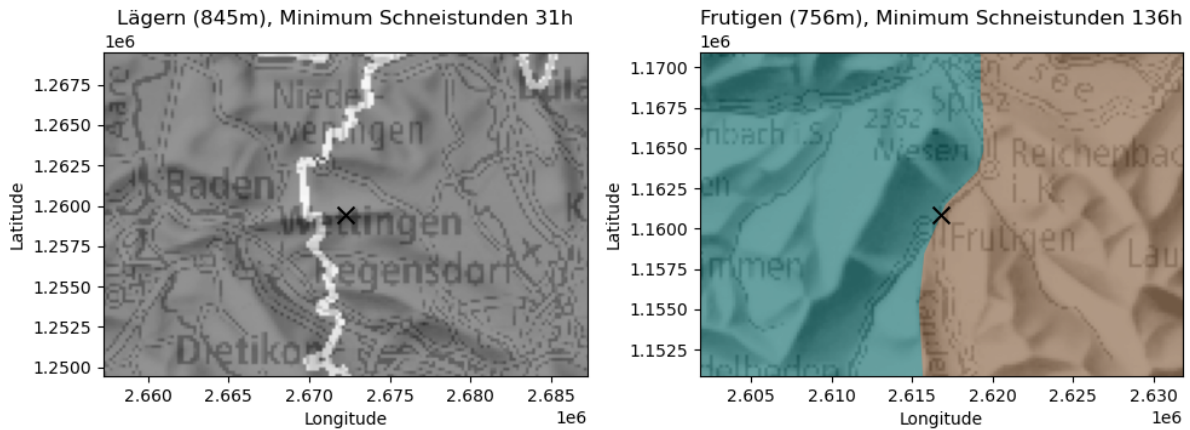


Abbildung 23: Standorte der zwei Stationen Lägern (845 m) und Frutigen (756 m). Frutigen befindet sich in Tallage in einem Kältesee und hat mit mindestens 136 h deutlich mehr Schneistunden als die Station in Lägern (31 h), die sich auf einem Kamm befindet.

Dieser Bereich gibt an, wie die Daten um den Median verteilt sind. Nun wurde der Toleranzbereich $[Q1 - 1.5 \cdot IQR, Q3 + 1.5 \cdot IQR]$ bestimmt, in dem man die Daten erwartet, Datenpunkte ausserhalb des Toleranzbereiches wurden als Ausreisser klassifiziert.

Mit diesen Ausreissern können wir beispielsweise Stationen in Kälteseen sehr gut sehen. Abbildung 23 zeigt im Vergleich die Stationen Lägern (LAE) und Frutigen (FRU), die sich auf etwa 800 m Höhe befinden. LAE befindet sich in Kammlage und liegt mit mindestens 36 h etwa im Durchschnitt. Das etwa 100 m tiefer gelegene FRU befindet sich in Tallage in einem Kältesee und hat mit mindestens 136 h deutlich mehr Schneistunden und ist dementsprechend ein sichererer Standort für technische Beschneigung.

Literatur

- Aschauer, J., Michel, A., Jonas, T., and Marty, C.: An empirical model to calculate snow depth from daily snow water equivalent: SWE2HS 1.0, *Geoscientific Model Development*, 16, 4063–4081, <https://doi.org/10.5194/gmd-16-4063-2023>, 2023.
- Bülow, K., Kotlarski, S., Steger, C. R., and Teichmann, C.: European snow cover in the EURO-CORDEX regional climate model ensemble – Part 2: Scenarios, in preparation, 2025.
- CH2011: Swiss Climate Change Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, ISBN: 978-3-033-03065-7, 2011.
- CH2018: CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, ISBN: 978-3-9525031-4-0, 2018.
- Fiddes, J., Aalstad, K., and Lehning, M.: TopoCLIM: rapid topography-based downscaling of regional climate model output in complex terrain v1.1, *Geoscientific Model Development*, 15, 1753–1768, <https://doi.org/10.5194/gmd-15-1753-2022>, 2022.
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., and Stoffel, M.: 21st century climate change in the European Alps—A review, *Science of The Total Environment*, 493, 1138–1151, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>, 2014.
- Jonas, T., Webster, C., Mazzotti, G., and Malle, J.: HPEval: A canopy shortwave radiation transmission model using high-resolution hemispherical images, *Agricultural and Forest Meteorology*, 284, 107903, <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107903>, 2020.
- Kommission Rechtsfragen Schneesportanlagen, S. S.: Die Verkehrssicherungspflicht auf Schneesportanlagen, https://s3-seilbahnen.novu.ch/p/asset/dateien/recht/verkehrssicherungspflicht_winter/vsp_2024_web_de.pdf, 2024.
- Kotlarski, S., Gobiet, A., Morin, S., Olefs, M., Rajczak, J., and Samacoïts, R.: 21st Century alpine climate change, *Climate Dynamics*, 60, 65–86, <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06303-3>, 2022.
- Magnusson, J., Gustafsson, D., Hüsler, F., and Jonas, T.: Assimilation of point SWE data into a distributed snow cover model comparing two contrasting methods, *Water Resources Research*, 50, 7816–7835, <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2014WR015302>, 2014.
- Marty, C., Schlögl, S., Bavay, M., and Lehning, M.: How much can we save? Impact of different emission scenarios on future snow cover in the Alps, *The Cryosphere*, 11, 517–529, <https://doi.org/10.5194/tc-11-517-2017>, 2017.
- Marty, C., Michel, A., Jonas, T., Steijn, C., Muelchi, R., and Kotlarski, S.: SPASS - new gridded climatological snow datasets for Switzerland: Potential and limitations, in preparation, 2025.

- Michel, A., Aschauer, J., Jonas, T., Gubler, S., Kotlarski, S., and Marty, C.: SnowQM 1.0: A fast *R* Package for bias-correcting spatial fields of snow water equivalent using quantile mapping, *Geoscientific Model Development Discussions*, 2023, 1–28, <https://doi.org/10.5194/gmd-2022-298>, 2023.
- Morin, S., Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N., Lejeune, Y., and Soubeyroux, J.-M.: Linking variations of meteorological and snow conditions in the frenchmountain regions to global temperature levels, in: *Proceedings of International Snow Science Workshop*, Innsbruck, Austria, pp. 481–487, 2018.
- Mott, R., Winstral, A., Cluzet, B., Helbig, N., Magnusson, J., Mazzotti, G., Quéno, L., Schirmer, M., Webster, C., and Jonas, T.: Operational snow-hydrological modeling for Switzerland, *Frontiers in Earth Science*, 11, <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1228158>, 2023.
- Ruostenoja, K. and Räisänen, P.: Seasonal Changes in Solar Radiation and Relative Humidity in Europe in Response to Global Warming, *Journal of Climate*, 26, 2467 – 2481, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00007.1>, 2013.
- Schmucki, E.: 21st century snow response to climate change in Switzerland, 2015.
- Schmucki, E., Marty, C., Fierz, C., and Lehning, M.: Simulations of 21st century snow response to climate change in Switzerland from a set of RCMs, *International Journal of Climatology*, 35, 3262–3273, <https://doi.org/10.1002/joc.4205>, 2015.
- Schmucki, E., Marty, C., Fierz, C., Weingartner, R., and Lehning, M.: Impact of climate change in Switzerland on socioeconomic snow indices, *Theoretical and Applied Climatology*, 127, 875–889, <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1676-7>, 2017.
- Senoner, A., Rajczak, J., and Kotlarski, S.: CH2018 – Swiss Climate Change Scenarios: Evaluation of the new reference period 1991-2020, National Centre for Climate Services, NCCS, Version 2.1, 04.05.2023, 2023.
- Stull, R.: Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50, 2267 – 2269, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0143.1>, 2011.
- Urs Witmer unter Mitarbeit von Paul Filliger, Stephan Kunz und Peter Küng, Geographisches Institut der Universität Bern: Erfassung, Bearbeitung und Kartierung von Schneedaten in der Schweiz, 1986.
- Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N., Lejeune, Y., and Morin, S.: Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps, *The Cryosphere*, 12, 1249–1271, <https://doi.org/10.5194/tc-12-1249-2018>, 2018.
- Willibald, F., Kotlarski, S., Grêt-Regamey, A., and Ludwig, R.: Anthropogenic climate change versus internal climate variability: impacts on snow cover in the Swiss Alps, *The Cryosphere*, 14, 2909–2924, <https://doi.org/10.5194/tc-14-2909-2020>, 2020.
- Willibald, F., Kotlarski, S., Ebner, P. P., Bavay, M., Marty, C., Trentini, F. V., Ludwig, R., and Grêt-Regamey, A.: Vulnerability of ski tourism towards internal climate variability and climate change in the Swiss Alps, *Science of The Total Environment*, 784, 147054, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147054>, 2021.