

Analyse der Schneesicherheit im Skigebiet Elm

Schlussbericht

Bruno Abegg^{1,2} & Robert Steiger^{2,3}

¹Institut für Systemisches Management und Public Governance, Universität St. Gallen

²Institut für Geographie, Universität Innsbruck

³Institut für Finanzwissenschaften, Universität Innsbruck

St. Gallen / Innsbruck
März 2019

Institut für Systemisches Management
und Public Governance



Universität St.Gallen



Vorbemerkung

Die Autoren haben im letzten Jahr die Grundlagenstudie „Schneesicherheit der Glarner Skigebiete“ erarbeitet. Am 17. Januar 2019 wurden die Ergebnisse dieser Studie mit S. Elmer, J. Marti und A. Aebli diskutiert. Dabei wurde auch der Wunsch nach einer detaillierten Analyse der Schneesicherheit im Skigebiet von Elm laut. Das Projektteam wurde von S. Elmer (Leiter Standortentwicklung) eingeladen, eine entsprechende Offerte zu verfassen. Diese wurde am 22. Januar 2019 eingereicht und kurz darauf als Auftrag bestätigt.

Der vorliegende Bericht basiert auf der Offerte vom 22. Januar 2019 und umfasst:

- eine Analyse der Niederschlagsdaten (v.a. Schneedaten),
- eine Beschreibung des methodischen Vorgehens sowie
- die Ergebnisse der Schneemodellierungen mit SkiSim auf Basis der CH2018-Szenarien. Dabei wurden die Exposition, verschiedene Höhenstufen sowie die bestehende und geplante Beschneigungsinfrastruktur berücksichtigt. Die Angaben zur aktuellen und zukünftigen Beschneigungskapazität und -praxis wurden von Bruno Landolt (Direktor Sportbahnen Elm) und Jakob Rhyner (stellvertretender Leiter Technischer Dienst) zur Verfügung gestellt (Treffen vom 12. Februar und 15. März in Elm).

Das Wichtigste in Kürze

Die Schneeverhältnisse haben sich in den letzten Jahrzehnten verschlechtert und werden sich in Zukunft weiter verschlechtern: Die winterliche Nullgradgrenze wird weiter ansteigen, es gibt mehr Regen- und weniger Schneetage. Die Konsequenz: weniger Naturschnee und schwierigere klimatische Rahmenbedingungen für die Produktion von technischem Schnee.

Die bestehende Beschneiungsinfrastruktur ist für den aktuell vorgesehenen Einsatz aus klimatischer Sicht knapp ausreichend. Für mehr – sei es eine Beschneigung von tiefer gelegenen Teilen des Skigebiets oder eine Beschneigung in einem wärmeren Klima – wäre sie nicht geeignet.

Mit der geplanten Beschneiungsinfrastruktur könnte eine deutliche Erhöhung der Schneesicherheit erzielt werden. Letztlich hängt die Beurteilung vom Planungshorizont ab. Wenn man von 20 Jahren ausgeht (mittlere Dekade im Zeitfenster 2030: 2019-2049), werden durchwegs gute Werte erreicht (auch im Bereich der Talstation). Wenn man von 40 Jahren ausgeht (mittlere Dekade im Zeitfenster 2050: 2039-2069), müssen Abstriche gemacht werden – diese betreffen sowohl die Talabfahrt als auch den Saisonstart inklusive Weihnachten/Neujahr.

In einer wärmeren Zukunft müsste deutlich mehr beschneit werden. Hierzu ein Beispiel: Mit der geplanten Beschneiungsinfrastruktur würde sich der Wasserbedarf im RCP 8.5-Szenario (kein Klimaschutz) von heute 165'000 m³ auf 315'000 m³ im Zeitfenster 2050 „verdoppeln“. Nach Auskunft der Skigebietsbetreiber ist die Wasserverfügbarkeit für die geplante Beschneiungsinfrastruktur gegeben.

Die Berechnungen zeigen, was mit einer leistungsstarken Beschneiungsinfrastruktur möglich wäre. Sie geben aber keine Auskunft über die Kosten. Ein höherer Beschneigungsaufwand setzt nicht nur eine entsprechende Beschneiungsinfrastruktur voraus (= geplante Anlage in Elm), sondern wird sich auch in den Betriebskosten der Sportbahnen Elm niederschlagen.

Wie die Ergebnisse zeigen (s. auch Grundlagenstudie), würde Elm – wie alle anderen alpinen Skigebiete auch – von einem griffigen globalen Klimaschutz profitieren.

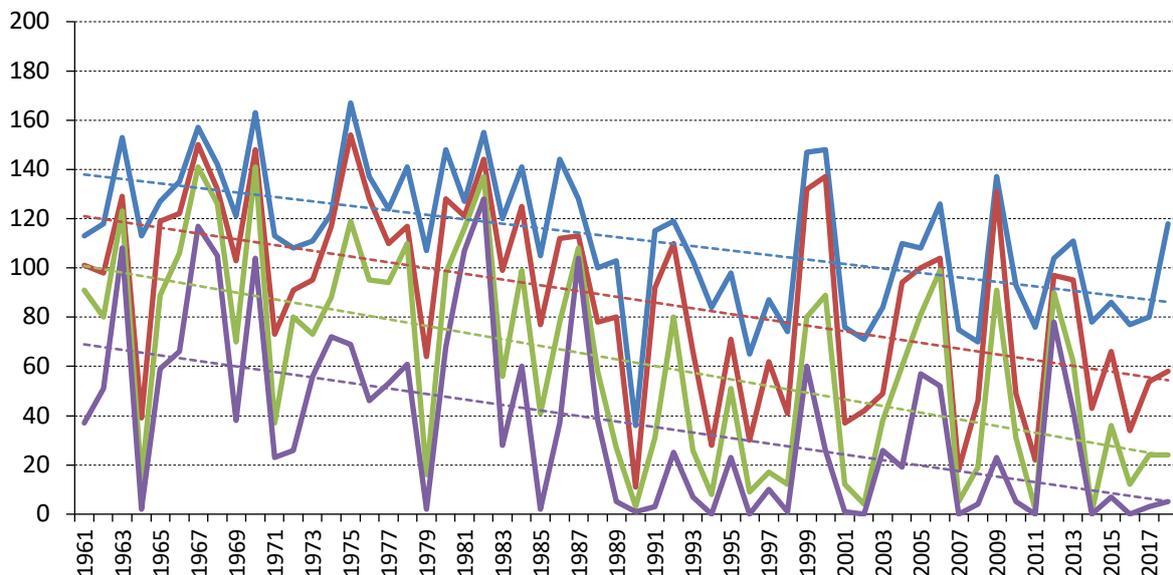
Diese Berechnungen sind als Szenarien zu verstehen – plausible Zukunftsbilder, die unter bestimmten Annahmen gültig sind. Die Unsicherheiten, die mit diesen Annahmen verbunden sind, betreffen nicht nur die zukünftige klimatische Entwicklung (z.B. Treibhausgas-Emissionen, Klimamodelle etc.), sondern auch die Schneesimulationen im Modell (z.B. Modellkonfiguration, Beschneigungskapazität und -praxis etc.) – alles „Stellschrauben“, die „richtig“ eingestellt werden müssen.

Der Blick in die Vergangenheit

Die Daten der Klimastation in Elm (958 m) geben Auskunft über die Entwicklung der Schneeverhältnisse. In den Abb. 1 und 2 werden die Anzahl Tage mit einer bestimmten Schneehöhe dargestellt: in Abb. 1 für das Winterhalbjahr (November bis April), in Abb. 2 für die Monate November und Dezember. In den Tab. 1 und 2 findet sich ein Mittelwertvergleich und die Abb. 3 und 4 zeigen am Beispiel des Schwellenwertes 30 cm Schneehöhe die jährlichen Abweichungen vom langjährigen Mittel (1960/61-2018). Die Daten lassen folgende Schlüsse zu:

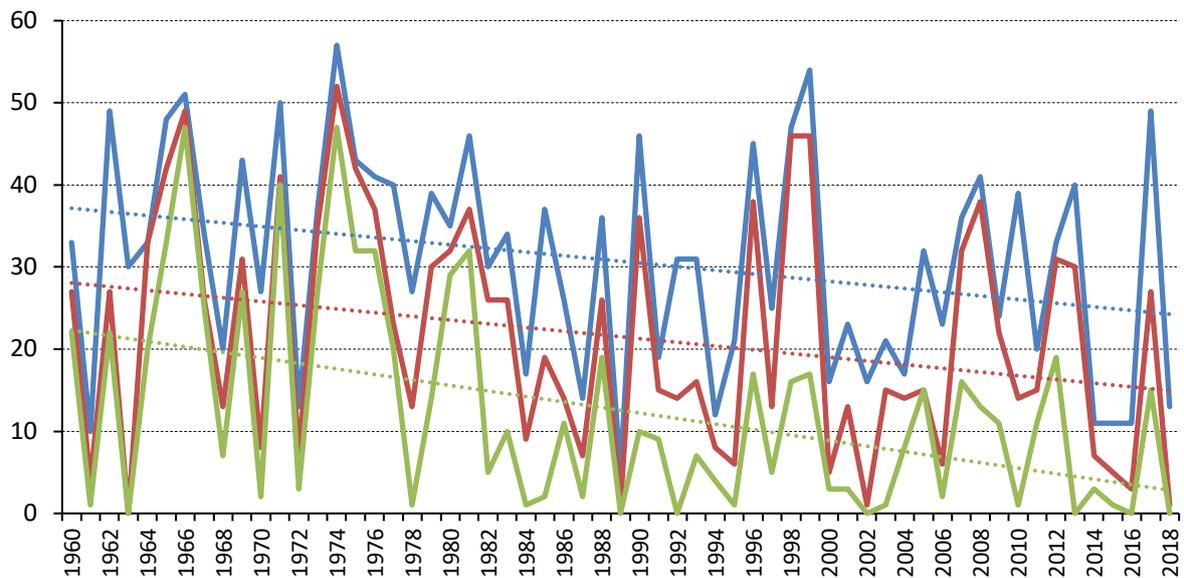
- Die Schneeverhältnisse variieren stark von Jahr zu Jahr.
- Die Anzahl Tage mit ≥ 5 cm, ≥ 15 cm und ≥ 30 cm bzw. ≥ 50 cm Schnee gehen zurück. Je höher die geforderte Mindestschneehöhe, desto deutlicher sind die negativen Trends.
- Die hier gezeigten Daten bestätigen Entwicklungen, die von anderen Schweizer Stationen bzw. aus der wissenschaftlichen Literatur bekannt sind. Die Anzahl Tage mit einer bestimmten Schneehöhe gehen in fast allen Stationen bis ca. 2500 m zurück (Klein et al. 2016), besonders ausgeprägt in tiefergelegenen Stationen (Latenser & Schneebeli 2003). Im Weiteren bestätigt sich der sogenannte „regime shift“ (Marty 2008) gegen Ende der 1980er Jahre: Die Perioden vor und nach diesem Zeitpunkt unterscheiden sich deutlich – sowohl was die Mittelwerte der Anzahl Tage mit einer bestimmten Schneehöhe (vgl. Tab. 1 und 2) als auch was die Häufigkeit der jährlichen negativen Abweichungen vom langjährigen Mittel betrifft (vgl. Abb. 3 und 4). Der Rückgang der Schneetage ist also nicht graduell, sondern stufig abgelaufen.

Abb. 1: Entwicklung der Anzahl Tage mit ≥ 5 cm (blau), ≥ 15 cm (rot), ≥ 30 cm (grün) und ≥ 50 cm Schnee (lila) im Winterhalbjahr (1961-2018)



Bemerkung: 1961 = Winter 1960/61; jeweils von November bis April. Fein gepunktete Linien = linearer Trend.

Abb. 2: Entwicklung der Anzahl Tage mit ≥ 5 cm (blau), ≥ 15 cm (rot) und ≥ 30 cm Schnee (grün) im November und Dezember (1960-2018)



Bemerkung: fein gepunktete Linien = linearer Trend

Tab. 1: Mittlere Anzahl Tage mit ≥ 5 cm, ≥ 15 cm, ≥ 30 cm und ≥ 50 cm Schnee im Winterhalbjahr – Vergleich der Perioden 1961-1989, 1990-2018 und 1961-2018

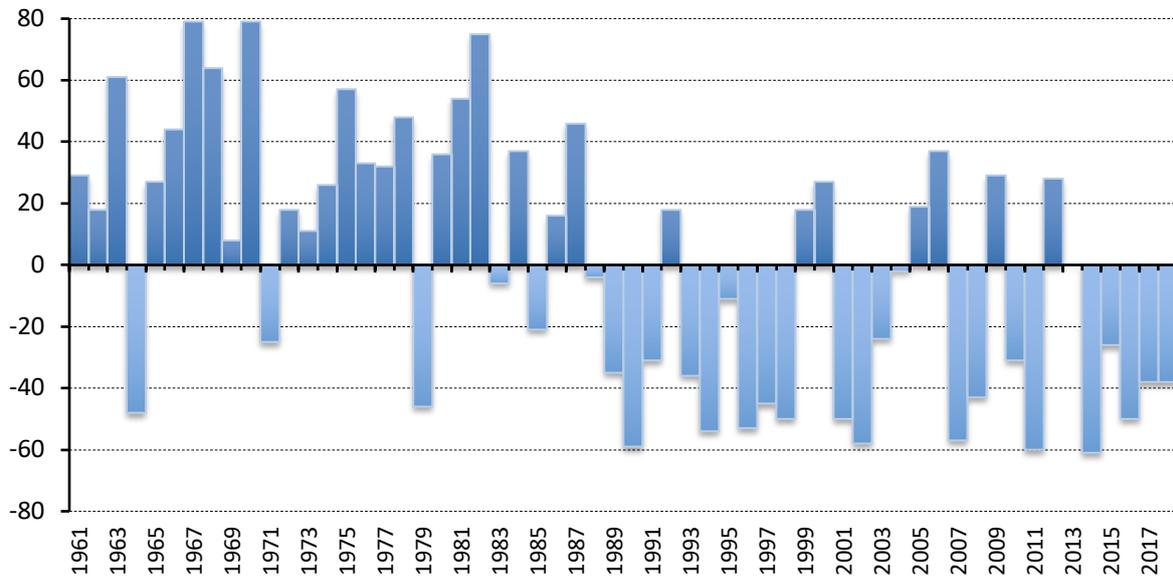
	Mittelwert 1961-1989	Mittelwert 1990-2018	Mittelwert 1961-2018
≥ 5 cm Schnee	129	95	112
≥ 15 cm Schnee	109	66	88
≥ 30 cm Schnee	87	38	62
≥ 50 cm Schnee	58	16	37

Bemerkung: 1961 = Winter 1960/61, jeweils von November bis April

Tab. 2: Mittlere Anzahl Tage mit ≥ 5 cm, ≥ 15 cm und ≥ 30 cm Schnee im November und Dezember – Vergleich der Perioden 1960-1989, 1990-2018 und 1960-2018

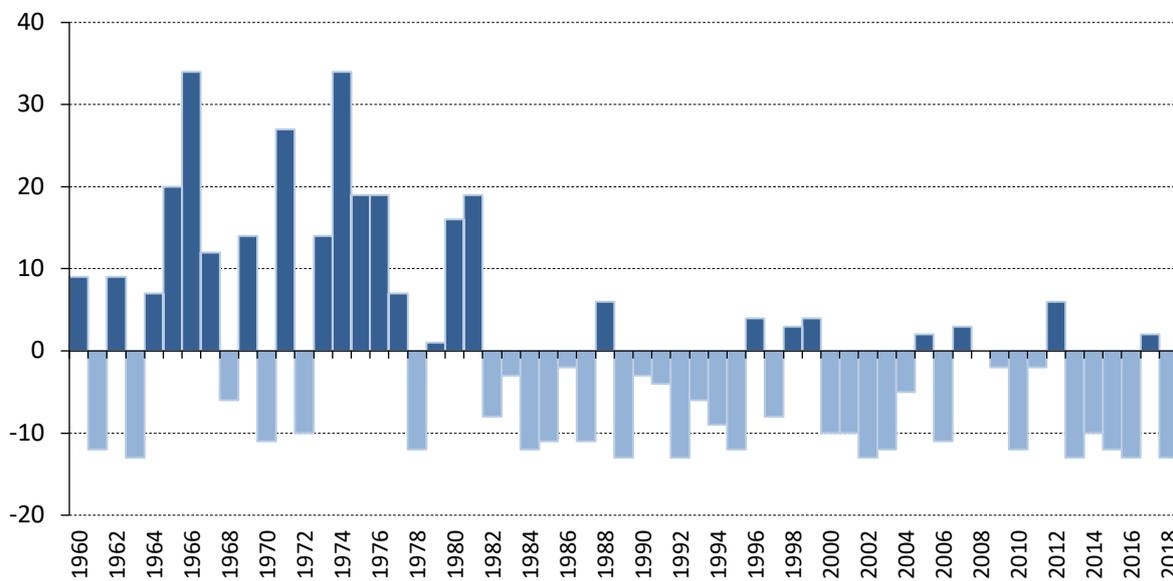
	Mittelwert 1960-1989	Mittelwert 1990-2018	Mittelwert 1960-2018
≥ 5 cm Schnee	34	28	31
≥ 15 cm Schnee	25	18	22
≥ 30 cm Schnee	18	7	13

Abb. 3: Jährliche Abweichung der Anzahl Tage mit ≥ 30 cm Schnee vom langjährigen Mittel im Winterhalbjahr (1961-2018)



Bemerkung: 1961 = Winter 1960/61; jeweils November bis April

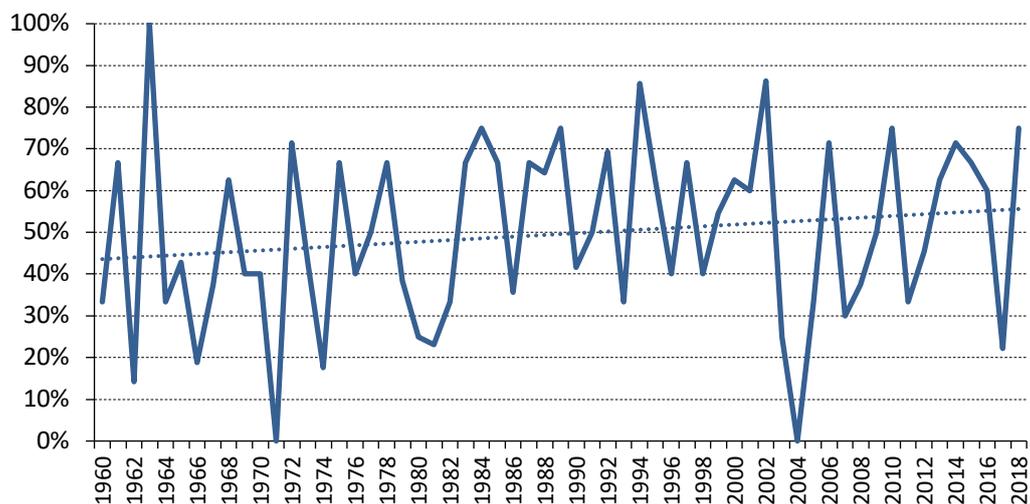
Abb. 4: Jährliche Abweichung der Anzahl Tage mit ≥ 30 cm Schnee vom langjährigen Mittel im November und Dezember (1960-2018)



Die durchschnittliche winterliche Nullgradgrenze ist seit 1961 um 300 bis 400 m gestiegen (NCCS 2018). Das bedeutet, dass die Winterniederschläge, vor allem in tieferen und mittleren Lagen, vermehrt als Regen fallen, wofür sich auch in der wissenschaftlichen Literatur zahlreiche Hinweise finden (z.B. Serquet et al. 2011 und 2013). Ein Blick in die Elmer Niederschlagsdaten (1960-2018) zeigt:

- Wenn man das sogenannte „snowfall/precipitation day ratio“ betrachtet, also das Verhältnis zwischen Schneefalltagen (definiert als Tag mit mindestens 1 cm Neuschnee) und Niederschlagstagen (definiert als Tag mit mindestens 1 mm Niederschlag), sind in der Periode vom 1. November bis zum 31. Dezember noch keine grossen Veränderungen sichtbar. Im November beträgt das besagte Verhältnis rund 50% (Tendenz sinkend), im Dezember knapp 70% (keine Tendenz).
- Wenn man aber die Intensität der Niederschläge berücksichtigt, also beispielsweise einen Schwellenwert von mindestens 10 mm/Tag (= 10 Liter/m²) definiert, haben die Regentage im November und Dezember zugenommen (vgl. Abb. 5).

Abb. 5: Anteil der Regentage an den Tagen mit ≥ 10 mm Niederschlag (Nov. – Dez.)



Bemerkung: fein gepunktete Linie = linearer Trend

Methodisches Vorgehen

SkiSim

Die aktuelle und zukünftige Schneesicherheit des Skigebiets in Elm wird mit dem Modell SkiSim 2.0 berechnet. SkiSim 2.0 besteht aus zwei Teilen: a) einem Schneemodell, in dem der natürliche Schneedeckenaufbau und die Schneeschmelze berechnet werden; und b) einem Beschneiungsmodul, das die technische Schneeproduktion steuert (Steiger 2010).

Als Eingangsdaten für SkiSim 2.0 werden tägliche Temperatur- (Minimum- und Maximumtemperaturen) und Niederschlagsdaten benötigt. Die verwendeten Daten stammen von den beiden Messstationen Elm (958 m, Meteo Schweiz) und Elm Chüebodensee (2050 m, SLF) und wurden auf die verschiedenen Höhenbereiche des Skigebiets extrapoliert. Vorgehensweise und Modellvalidierung sind im Grundlagenbericht beschrieben.

Die Schnee- und Beschneiungsverhältnisse werden für die gesamte Höhererstreckung des Skigebiets berechnet. Der Einfachheit halber werden aber nur drei Höhenstufen gezeigt (1000 m = „Talstation“, 1500 m = „Mittelstation“ und 2000 m = „Bergstation“), wobei das Hauptaugenmerk auf der Tal- und Mittelstation liegt. Das Skigebiet ist nach Südosten ausgerichtet, die meisten Pisten sind süd-, südost- oder ostexponiert. Im Modell wird die Exposition berücksichtigt – es kann allerdings nur zwischen Nord, Ost/West und Süd unterschieden werden. Da viele Bereiche des Skigebiets südexponiert sind, und diese sonnenausgesetzten Stellen letztlich über die Schneesicherheit des gesamten Gebietes entscheiden, basieren die im Hauptteil dieses Berichts gezeigten Ergebnisse – mit Ausnahme des Wasserbedarfs – auf der Exposition Süd. Den Resultaten zum Wasserbedarf liegt die reale Ausrichtung der Pisten gemäss GIS zugrunde, und ein Vergleich der Resultate „Süd vs. Ost/West“ findet sich im Anhang.

Die Beschneiungsparameter, welche das Beschneiungsmodul im Modell steuern, wurden in Absprache mit den Skigebietsbetreibern wie folgt definiert:

Tab. 3: Beschneiungsparameter für die bestehende (Aktuell) und die geplante (Ausbau) Beschneiungsinfrastruktur

	Beschneite Fläche	Pumpenleistung	Beschneigungskapazität
Aktuell	31.5 ha	45 l/sek	3 cm/Tag
Ausbau	44.6 ha	240 l/sek	11.6 cm/Tag

Die bestehende und geplante Beschneiungsinfrastruktur ist vergleichsweise komplex: Leistung der verschiedenen Pumpen, Volumina der bestehenden bzw. geplanten Wasserspeicher, Wasser aus dem Steinibach etc. Für die Skigebietsbetreiber bedeutet dies, dass sie – je nach Bedarf und klimatischen Bedingungen – in der Frage wann, wo und in welcher Intensität sie die Beschneiungsanlagen in Betrieb nehmen, relativ flexibel sind. Da sich sowohl die Komplexität in der Infrastruktur als auch die Flexibilität im Betrieb in einem Modell nur beschränkt abbilden lassen, werden die der Berechnung zugrunde liegenden (vereinfachten) Annahmen kurz erläutert:

- Aktuell: Im „optimalen Fall“, so die Skigebietsbetreiber, könne mit einer Pumpenleistung von 50 l/sek beschneit werden. Das entspräche rein rechnerisch einer Beschneidungskapazität von 3.43 cm/Tag. Da nicht immer vom optimalen Fall ausgegangen werden kann (z.B. kein Wasser mehr aus dem Reservoir Pleus und nicht alle drei Pumpen gleichzeitig in Betrieb), wird die angenommene Pumpenleistung leicht auf 45 l/sek reduziert.
- Ausbau: Wenn man davon ausgeht, dass die Talabfahrt mit einer Leistung von 40 l/sek (Wasser vom Steinibach bzw. vom Reservoir Ämpächli) und die anderen Pisten mit einer Leistung von 240 l/sek (Pumpenleistung Ämpächli) beschneit werden, resultiert für beide Bereiche eine Beschneidungskapazität von 11.6 cm/Tag. Zusätzliches Wasser aus dem Speicher Pleus ist hier nicht berücksichtigt.

Im Weiteren wird von einer Beschneidungstemperatur von -2°C (Lufttemperatur) ausgegangen. Der Beschneidungszeitraum dauert vom 1. November bis zum 31. März, und das Beschneidungsmodul ist so eingestellt, dass der Skibetrieb vom frühestmöglichen Termin bis zum 1. April aufrechterhalten werden kann (90% der Winter). Anfangs Winter – ungeachtet der natürlichen Schneevorkommen – erfolgt die Grundbeschneidung (40 cm); danach wird nur noch beschneit was nötig ist, um das obige Saisonziel (Betrieb bis 1. April) zu erreichen.

Emissions- und Klimaszenarien

Für die vorliegenden Berechnungen wurden die CH2018-Szenarien verwendet (CH 2018). Neu stehen auch stationsbezogene Szenarien (in unserem Fall: Szenarien für die Messstation Elm) zur Verfügung. Bei diesen transienten Szenarien wird von einer kontinuierlichen Veränderungen des Klimas (quasi von Tag zu Tag) über den gesamten Szenariozeitraum (1981-2099) ausgegangen. Das heisst, wir sind nicht mehr auf vorgegebene Mittelwerte (regional/saisonal) und Zeitfenster (2035, 2060 und 2085) angewiesen (vgl. Grundlagenbericht), sondern können die Veränderungen in den Schneebedingungen kontinuierlich von heute in die Zukunft modellieren und dabei auch eigene Zeitfenster (immer basierend auf 30 Einzeljahren) für die Präsentation der Ergebnisse wählen.

Die CH2018-Szenarien basieren auf drei Emissionsszenarien (NCCS 2018: 20, CH2018: 20):

- RCP 2.6 – konsequenter Klimaschutz: „Mit einer umgehend eingeleiteten Senkung der Emissionen auf praktisch Null wird der Anstieg der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre bis etwa in 20 Jahren gestoppt. Damit lassen sich die Ziele des Pariser Klimaabkommens von 2015 wahrscheinlich erreichen und die globale Erwärmung auf zwei Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Zustand begrenzen.“
- RCP 4.5 – begrenzter Klimaschutz: „Der Ausstoss von Treibhausgasemissionen wird zwar eingedämmt, aber der Gehalt in der Atmosphäre steigt noch weitere 50 Jahre. Das Zwei-Grad-Ziel wird verfehlt.“
- RCP 8.5 – kein Klimaschutz: „Klimaschutzmassnahmen werden nicht ergriffen. Trotz des technischen Fortschritts nehmen daher die klimawirksamen Emissionen stetig zu – und mit ihnen die Erwärmung.“

Es stehen insgesamt 68 Kombinationen von globalen und regionalen Klimamodellen („GCM/RCM pairs“) zur Verfügung: 31 für das RCP 8.5, 25 für das RCP 4.5 und 12 für das RCP 2.6. Für die vorliegenden Berechnungen wurden sämtliche Modellkombinationen berücksichtigt. Im Weiteren wurden fünf Zeitperioden definiert: Referenz (1981-2011), 2030 (2019-2049), 2040 (2029-2059), 2050 (2039-2069) und 2080 (2069-2099). Es muss darauf hingewiesen werden, dass sich die Referenzperiode nicht auf Realdaten (wie im Grund-

lagenbericht), sondern auf Modelldaten bezieht. Wenn man das gesamte Winterhalbjahr (November bis April) betrachtet, sind die Unterschiede zwischen den gemessenen Daten und den Modelldaten gering. Bei den mittleren Temperaturminima beträgt die Differenz -0.1°C , $+0.1^{\circ}\text{C}$ und $+0.2^{\circ}\text{C}$, bei den mittleren Temperaturmaxima -0.2°C , 0.0°C und $+0.2^{\circ}\text{C}$, und bei den mittleren Winterniederschlägen -6% , -2% und $+2\%$. Der erste Wert bezieht sich auf die kälteste bzw. trockenste Modellkombination, der zweite Wert auf den Median (der Median, auch Halbwert oder Zentralwert genannt, ist derjenige Wert, der die der Grösse nach geordneten Werte in zwei gleich grosse Hälften teilt) und der dritte Wert auf die wärmste bzw. feuchteste Modellkombination. Wenn man dagegen einzelne Monate betrachtet, können die Unterschiede beträchtlich sein. Es gibt Modellkombinationen, die über das ganze Winterhalbjahr kaum Abweichungen zeigen, in einzelnen Monaten aber deutlich zu kalt/warm bzw. zu trocken/feucht sind. Da sich die Veränderungssignale in den Klimamodellen auf die jeweiligen Modelldaten aus der Referenzperiode beziehen, werden diese Abweichungen auch in die Zukunft projiziert. Dies wird hier so ausführlich ausgeführt, weil einzelne zu kalte/warme bzw. zu trockene/feuchte Monate durchaus einen gewissen Einfluss auf die Schneedeckenentwicklung, wie sie in SkiSim modelliert wird, haben können.

In den Tab. 4 bis 6 werden die Veränderungen der mittleren Temperaturminima, der mittleren Temperaturmaxima und des mittleren Winterniederschlags für die drei RCPs und die vier Zeitperioden in der Zukunft aufgeführt. „Low“ bezieht sich auf das 10%-Quantil (90% der Veränderungssignale sind grösser wie der Wert für „low“), „medium“ auf den Median und „high“ auf das 90%-Quantil (90% der Veränderungssignale sind kleiner wie der Wert für „high“). Alle Resultate im Hauptteil dieses Berichts basieren auf dem Median („medium“) der Veränderungssignale. Zur Illustration der Modellunsicherheiten findet sich im Anhang ein Beispiel, das aufzeigt, in welcher Bandbreite die Ergebnisse je nach Klimamodell und RCP liegen können.

Tab. 4: Veränderung der mittleren täglichen Temperaturminima ($^{\circ}\text{C}$) in Elm

CH2018	2030			2040			2050			2080		
	low	medium	high									
RCP 8.5	0.8	1.2	1.6	1.3	1.7	2.1	1.7	2.1	2.5	3.2	4.0	4.4
RCP 4.5	0.6	1.0	1.2	0.9	1.3	1.6	1.0	1.4	2.0	1.3	1.8	2.7
RCP 2.6	0.4	0.9	1.2	0.4	1.1	1.3	0.5	1.2	1.3	0.5	1.1	1.5

Tab. 5: Veränderung der mittleren täglichen Temperaturmaxima ($^{\circ}\text{C}$) in Elm

CH2018	2030			2040			2050			2080		
	low	medium	high									
RCP 8.5	0.8	1.4	2.0	1.5	1.9	2.6	2.0	2.6	3.4	3.7	4.8	5.9
RCP 4.5	0.6	1.3	1.5	1.0	1.6	2.1	1.2	1.8	2.6	1.6	2.4	3.4
RCP 2.6	0.7	1.1	1.5	0.7	1.4	1.6	0.7	1.5	1.6	0.8	1.4	2.0

Tab. 6: Veränderung der mittleren Winterniederschläge (%) in Elm

CH2018	2030			2040			2050			2080		
	low	medium	high									
RCP 8.5	4.8	8.7	8.9	2.4	8.0	11.6	7.7	10.4	11.8	8.9	16.1	18.2
RCP 4.5	-0.2	4.0	11.0	-0.4	4.3	9.9	-1.4	5.7	8.6	1.7	10.1	12.6
RCP 2.6	-9.4	6.6	18.6	-7.6	6.4	13.8	-2.7	6.5	10.8	-4.8	6.2	11.4

Resultate

In Abb. 6 wird die Entwicklung der Skitage (= Anzahl Tage mit ≥ 30 cm Schnee) mit der bestehenden („Aktuell“) und geplanten Beschneiungsinfrastruktur („Ausbau“) auf 1000 m (oben), 1500 m (Mitte) und 2000 m (unten) dargestellt. Ein Blick auf die Abbildung zeigt:

- Auf 1000 m Höhe fallen die grossen Unterschiede zwischen „Aktuell“ und „Ausbau“ auf. Das beginnt mit den unterschiedlichen Ausgangswerten in der Referenzperiode und setzt sich mit zunehmender Erwärmung fort: mit der bestehenden Beschneiungsinfrastruktur würde der Rückgang der Skitage früher einsetzen (bereits 2030) und stärker ausfallen, mit der geplanten Beschneiungsinfrastruktur wäre er verzögert und weniger stark.
- Auf 1500 m Höhe sind die Unterschiede zwischen „Aktuell“ und „Ausbau“ weniger akzentuiert. Ansonsten zeigt sich ein ähnliches Bild – mit dem Unterschied, dass die Werte höher sind und sich der Rückgang der Skitage mit der geplanten Beschneiungsinfrastruktur weiter verzögert.
- Auf 2000 m Höhe werden durchwegs hohe Werte erreicht. Ein deutlicher Rückgang ist nur beim RCP 8.5 (kein Klimaschutz) zu erwarten: mit der bestehenden Beschneiungsinfrastruktur ab 2050, mit der geplanten Beschneiungsinfrastruktur erst gegen Ende des Jahrhunderts.

In den Abb. 7 und 8 wird die Wahrscheinlichkeit (%), dass die Anforderungen an die 100-Tage Regel (Witmer 1986, Abegg 1996) und den Weihnachtsindikator (Scott et al. 2008) erfüllt werden, dargestellt. Die 100-Tage Regel (hier: ≥ 100 Tage mit ≥ 30 cm Schnee vom 1. Dez. bis zum 1. April) ist ein gebräuchlicher Indikator für die Schneesicherheit eines Gebiets, der Weihnachtsindikators (hier: ≥ 30 cm Schnee vom 22. Dez. bis zum 4. Jan.) bezieht sich auf eine der betriebswirtschaftlich wichtigsten Perioden: die Zeit über Weihnachten und Neujahr (s. auch Grundlagenbericht). Hier beschränken wir uns auf die kritischen Höhen im der Bereich der Tal- (1000 m) und Mittelstation (1500 m):

- Auf 1000 m Höhe fallen – wiederum – die grossen Unterschiede zwischen „Aktuell“ und „Ausbau“ auf. Mit der bestehenden Beschneiungsinfrastruktur liegen alle Werte – auch diejenigen für die Referenzperiode – unter 50%. Mit der geplanten Beschneiungsinfrastruktur sind die Werte deutlich höher, aber auch hier muss ohne Klimaschutz (RCP 8.5) von einem schnellen Rückgang von heute 90% auf 70% (2030) bzw. 60% (2040) ausgegangen werden.
- Auf 1500 m Höhe sind die Resultate besser. In der Referenzperiode werden hohe („Aktuell“) bzw. sehr hohe Werte („Ausbau“) erreicht, in einer wärmeren Zukunft ohne Klimaschutz (RCP 8.5) gehen die Werte – wenn auch in unterschiedlichem Ausmass und Tempo – zurück: Mit der bestehenden Beschneiungsinfrastruktur sinken die Werte schon im Zeitfenster 2030 auf 50 (Weihnachtsindikator) bzw. 60% (100-Tage Regel), mit der geplanten Beschneiungsinfrastruktur liegen die Werte auch im Zeitfenster 2050 knapp unter (Weihnachtsindikator) bzw. über 80% (100-Tage Regel).

Bemerkung: Alle Berechnungen basieren auf den angenommenen Beschneigungskapazitäten (vgl. Tab. 3) und zeigen, wie viele Skitage auf einer bestimmten Höhenlage mit Hilfe der angenommenen Beschneigung erreicht werden können. D.h., es können auch Angaben über die Höhenstufe 1000 m, Variante „Aktuell“, gemacht werden, obwohl mit der bestehenden Beschneiungsinfrastruktur auf Höhe der Talstation aktuell gar nicht beschneit wird.

Abb. 6: Skitage – Anzahl Tage mit ≥ 30 cm Schnee auf 1000 m, 1500 m und 2000 m

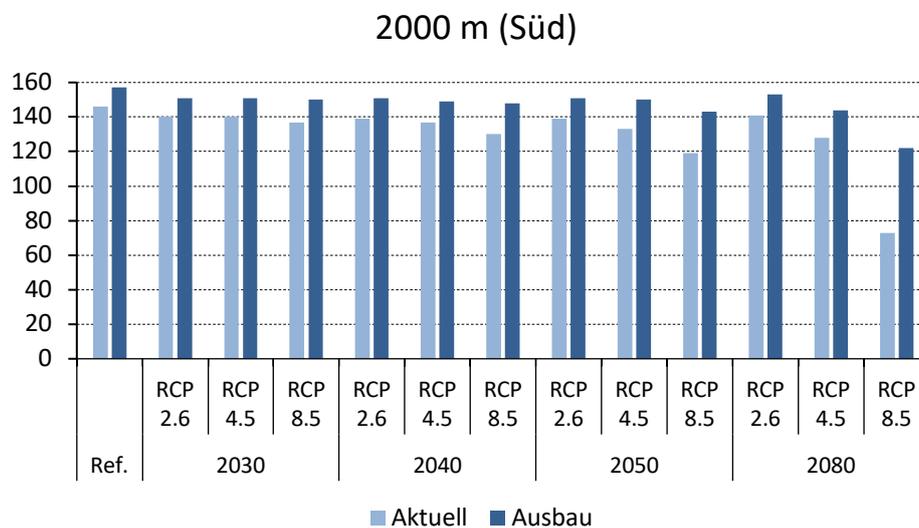
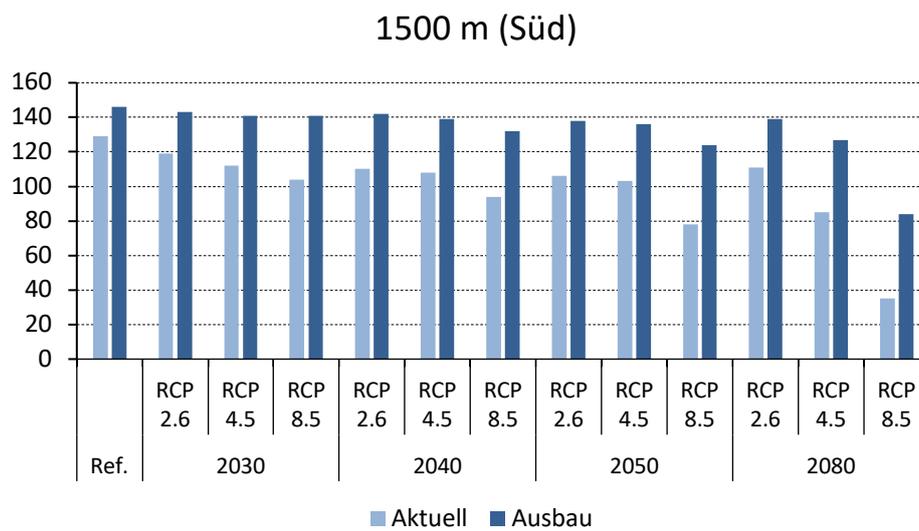
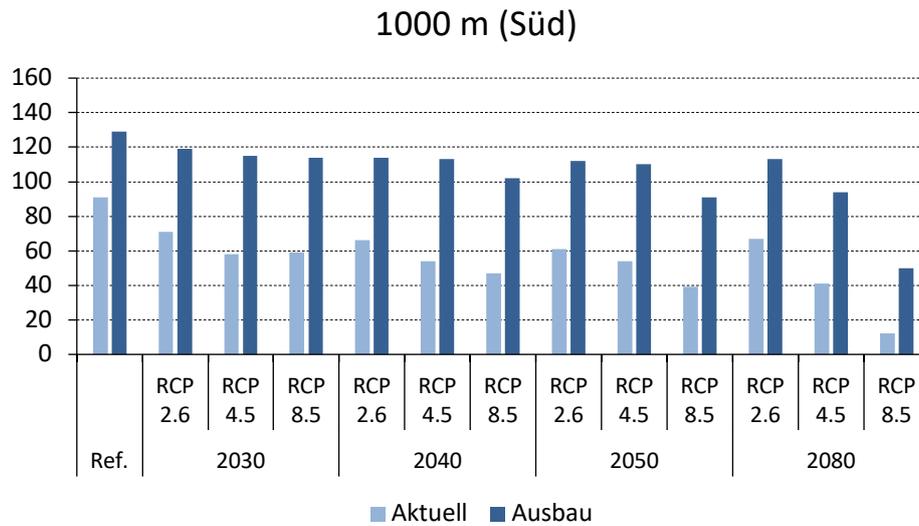


Abb. 7: Wahrscheinlichkeit (%), dass die Anforderungen an die 100-Tage Regel auf 1000 m und 1500 m erfüllt werden

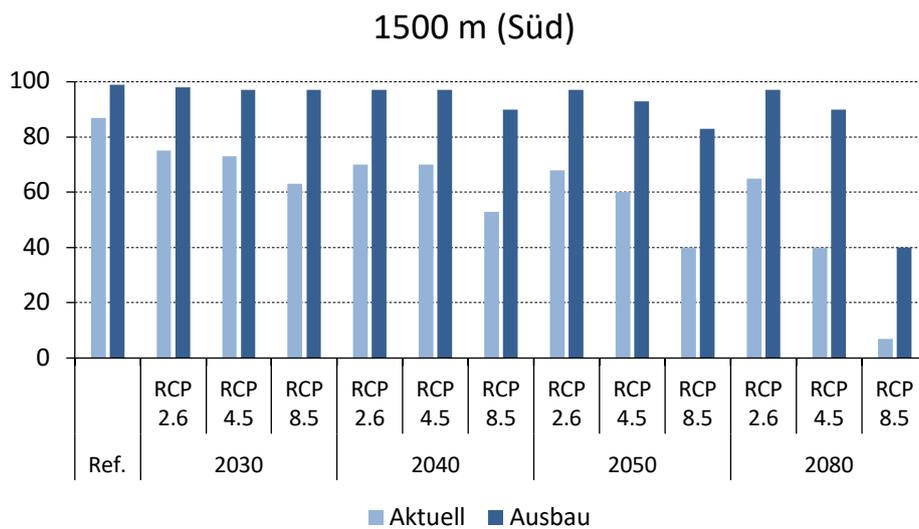
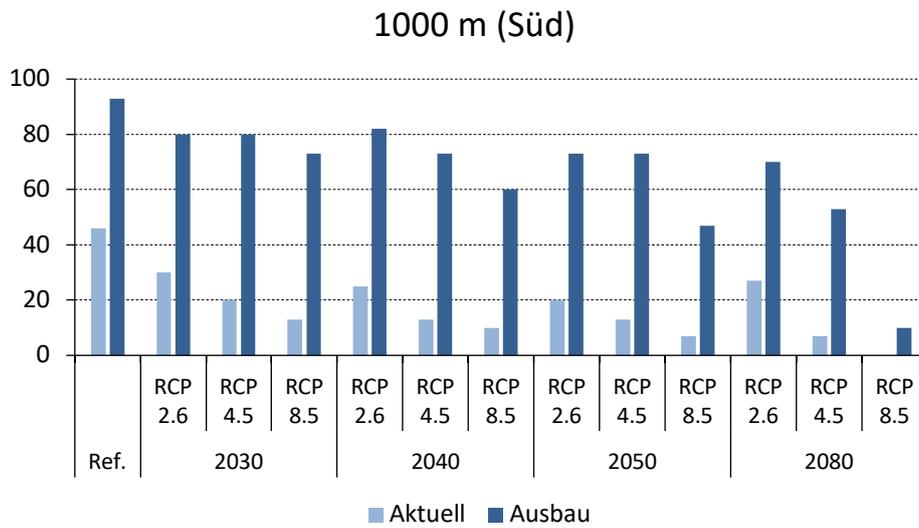
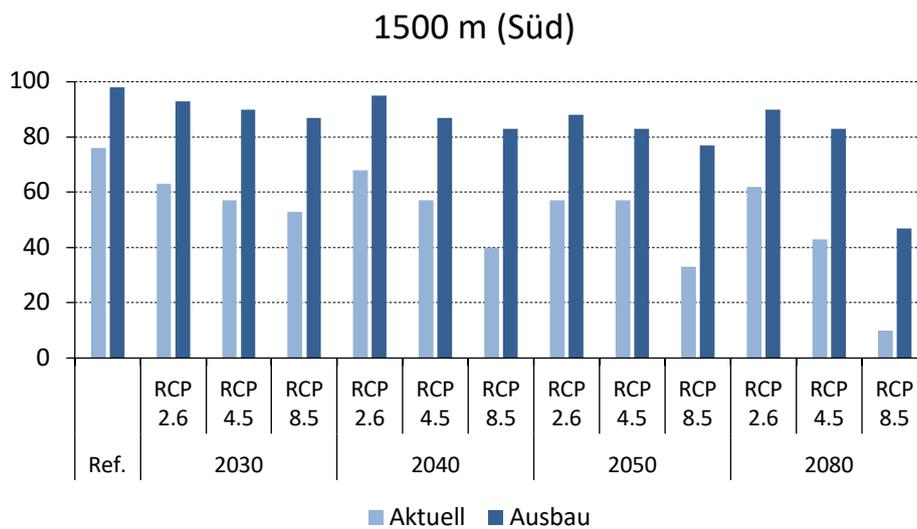
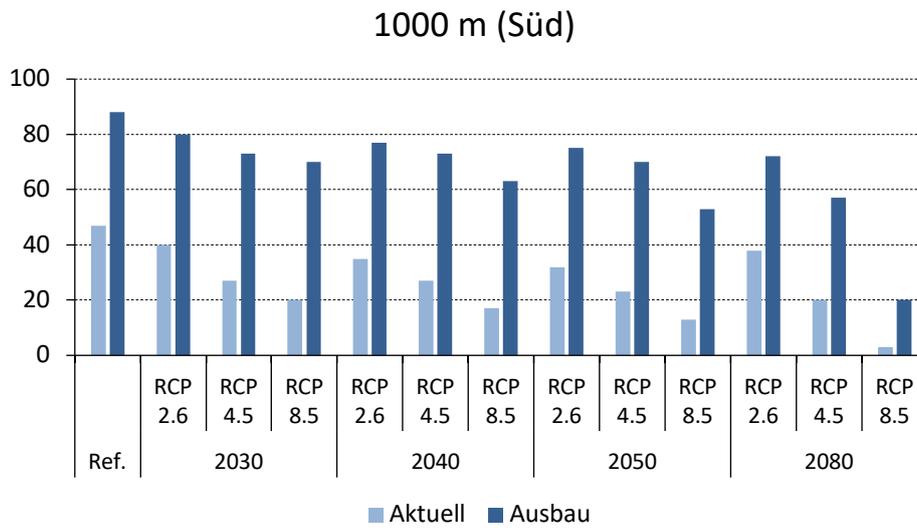


Abb. 8: Wahrscheinlichkeit (%), dass die Anforderungen an den Weihnachtsindikator auf 1000 m und 1500 m erfüllt werden



In den Abb. 9 und 10 werden der Anteil der Jahre mit Skibetrieb (in % - jeweils über 30 Jahre gerechnet) auf 1000 m und 1500 m dargestellt. In der oberen Graphik wird die Variante „Aktuell“ gezeigt, in der unteren Graphik die Variante „Ausbau“. Zu Vergleichszwecken ist in der unteren Graphik auch die Kurve für „Referenz Aktuell“ aufgeführt. Um die Lesbarkeit der Graphiken zu vereinfachen, haben wir auf die Kurven für das Zeitfenster 2040 verzichtet. Die Periode über Weihnachten und Neujahr ist hellgrau hinterlegt, und alle Kurven beziehen sich auf RCP 8.5-Szenario (kein Klimaschutz). In den Graphiken kann für jeden Tag im Winterhalbjahr abgelesen werden, wie oft mindestens 30 cm Schnee erreicht werden und Skibetrieb möglich ist. Ein Blick auf die Abbildungen zeigt:

- Je mehr die Erwärmung fortschreitet bzw. je weiter wir in die Zukunft blicken (von der Referenzperiode über 2030 und 2050 bis 2080), desto tiefer liegen die Kurven.
- Die Kurven mit der geplanten Beschneigung („Ausbau“) liegen deutlich höher wie die Kurven mit der bestehenden Beschneigung („Aktuell“). Stark vereinfacht ausgedrückt, entsprechen die Werte, die heute mit der bestehenden Beschneigungsinfrastruktur erreicht werden, in etwa den Werten, die mit der geplanten Beschneigungsinfrastruktur in der Mitte des Jahrhunderts erreicht werden.
- Der Saisonstart inklusive Weihnachten und Neujahr ist (heute) und bleibt (Zukunft) problematisch. Das gilt in erster Linie für die Variante „Aktuell“. Mit der geplanten Beschneigungsinfrastruktur kann die Schneesicherheit in den Weihnachtsferien deutlich erhöht werden. In der Referenzperiode liegen die Werte nahe bei 100%, im Zeitfenster 2050 betragen sie noch 50-70% (1000 m) bzw. 63-83% (1500 m). Mit anderen Worten: es darf nicht davon ausgegangen werden, dass über Weihnachten/Neujahr (auch mit der geplanten Beschneigungsinfrastruktur nicht) immer genügend Schnee liegen wird. Der Saisonschluss Ende März/anfangs April ist dagegen vergleichsweise unproblematisch.
- Erstaunen mag, dass in einzelnen Fällen (vor allem gegen Ende der Saison) die „spätere“ Kurve (z.B. 2030 bei Ausbau Süd) leicht über der „früheren“ Kurve (z.B. Referenz bei Ausbau Süd) liegen kann. Dies liegt daran, dass während der Saison mehr beschneit werden muss, um das Zieldatum (Ende März/anfangs April) sicher zu erreichen. Es wird hierbei in allen Saisonen ähnlich viel Schnee produziert, da am Anfang der Saison noch nicht abgesehen werden kann, wie sich der Winter entwickelt. Das heisst, dass die produzierte Schneemenge immer so hoch ist, dass in einer sehr warmen/schneearmen Saison das Saisonende erreicht werden kann (vorausgesetzt es stehen ausreichend Schneestunden zur Verfügung). In schneereicheren und kühleren Jahren kann es daher passieren, dass etwas zu viel Schnee produziert wird und daher die Kurven höher als heute liegen (bei weniger produziertem Schnee).

Abb. 9: Anteil der Jahre mit Skibetrieb in % (Zeitraum 30 Jahre) auf 1000 m (RCP 8.5)

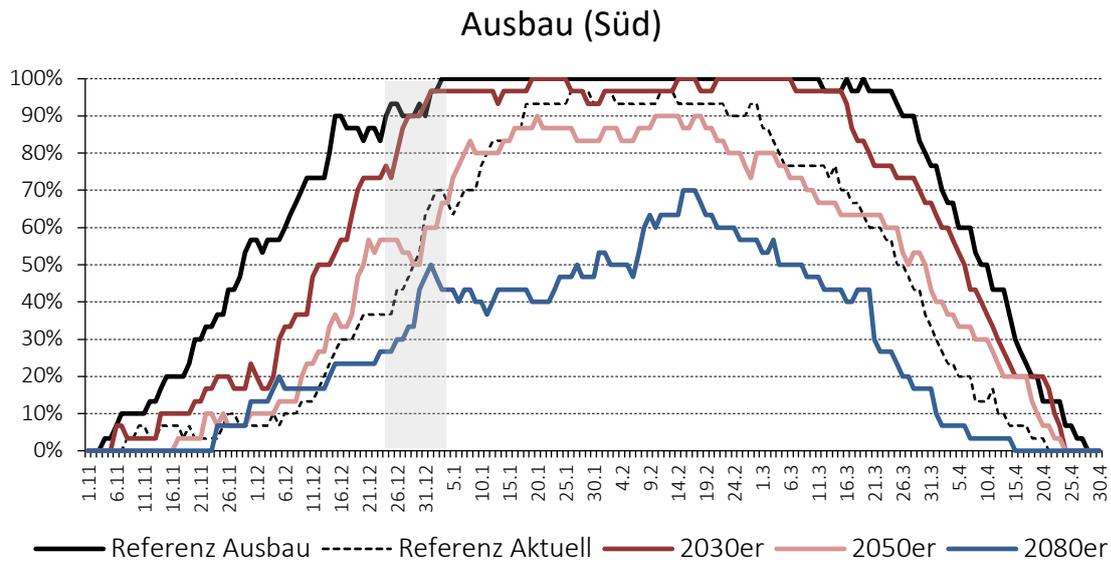
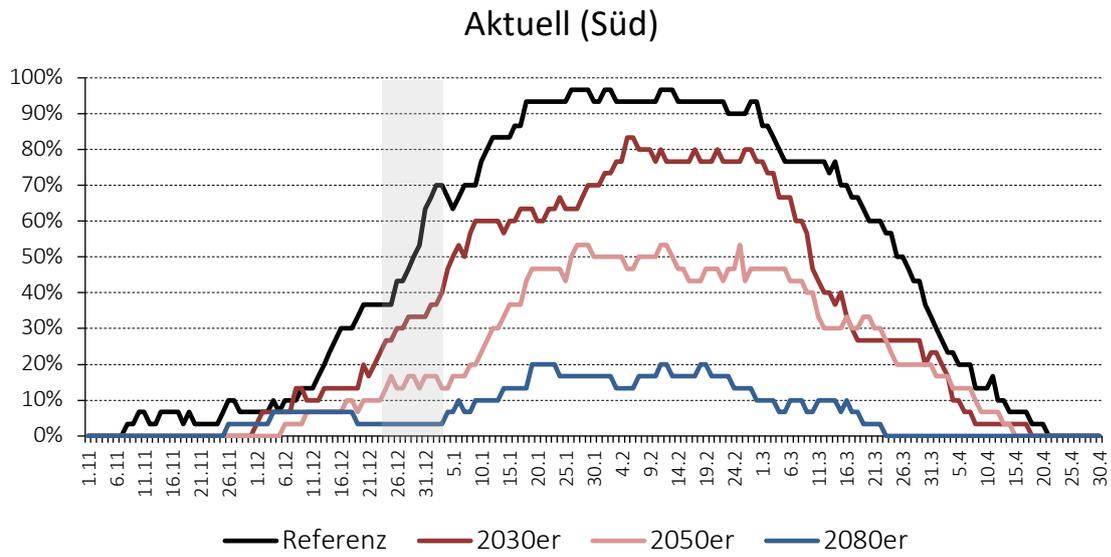
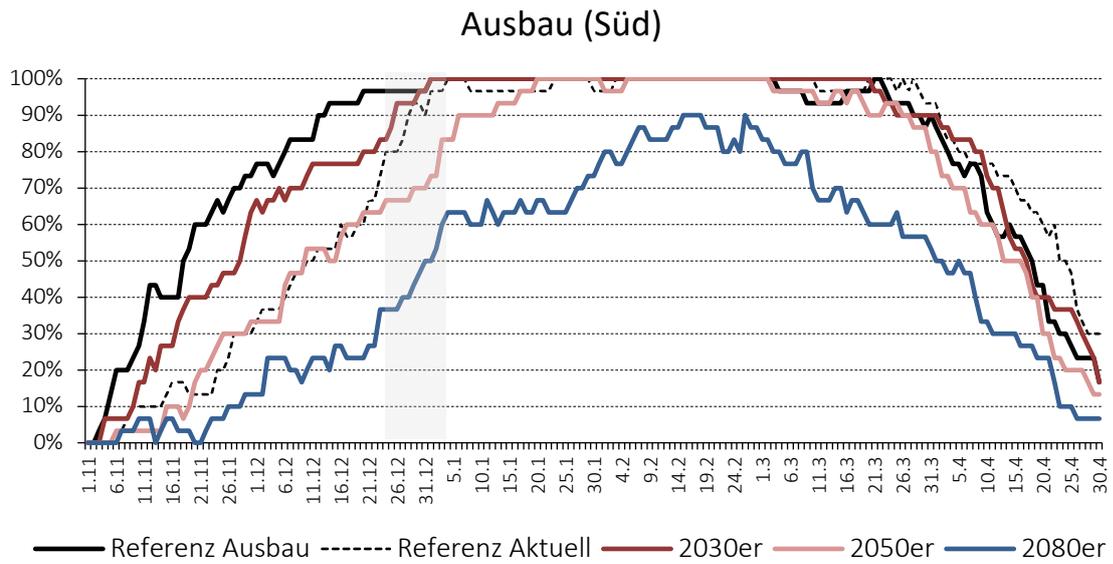
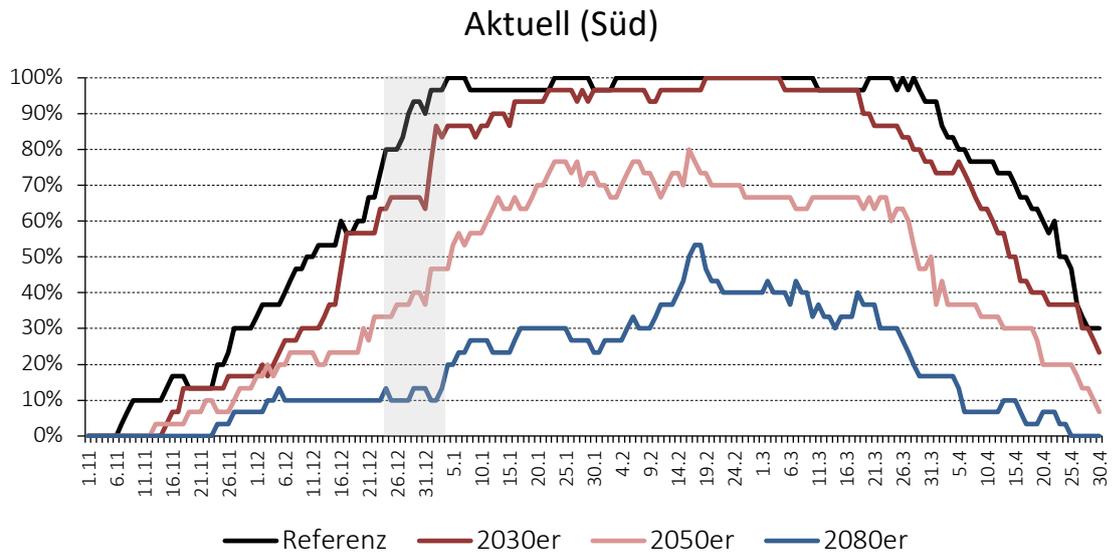


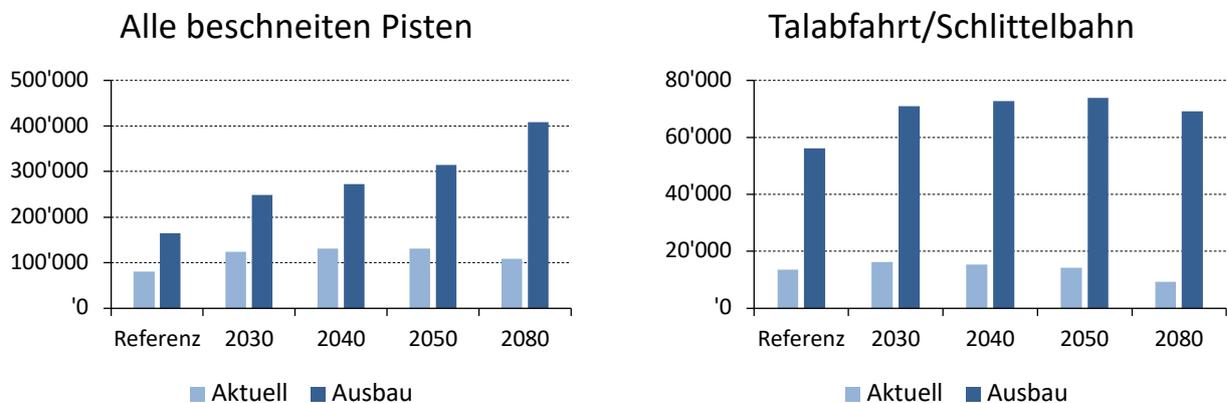
Abb. 10: Anteil der Jahre mit Skibetrieb in % (Zeitraum 30 Jahre) auf 1500 m (RCP 8.5)



In Abb. 11 wird der Wasserbedarf (in m³ Wasser) für die Beschneigung dargestellt: links für alle beschneiten Pisten, rechts nur für die Talabfahrt/Schlittelbahn. Alle Angaben beziehen sich auf das RCP 8.5-Szenario (kein Klimaschutz):

- In der Referenzperiode wird von einem Wasserbedarf von rund 80'000 („Aktuell“) bzw. 165'000 m³ Wasser („Ausbau“) ausgegangen. Die Skigebietsbetreiber haben für die bestehende Beschneigungsinfrastruktur einen Wasserbedarf von 60'000-80'000 m³ Wasser angegeben, für die geplante Beschneigungsinfrastruktur einen Wasserbedarf von 120'000 m³ (Wert, der vom Hersteller der geplanten Anlage kommuniziert wurde) bzw. 160'000 m³ (eigene Schätzung der Skigebietsbetreiber).
- Mit der bestehenden Beschneigungsinfrastruktur würde der Wasserbedarf zunächst steigen, ab 2030 (Talabfahrt/Schlittelbahn) bzw. 2050 (alle beschneiten Pisten) aber wieder sinken – nicht, weil weniger Wasser gebraucht würde, sondern bei den zukünftigen Klimabedingungen nicht mehr Wasser verschneit werden könnte.
- Mit der geplanten Beschneigungsinfrastruktur würde sich der Wasserbedarf für alle beschneiten Pisten von heute bis 2050 verdoppeln. Für die Talabfahrt müsste in Zukunft (2030-2050) fast so viel Wasser aufgewendet werden wie heute mit der bestehenden Beschneigungsinfrastruktur für alle beschneiten Pisten. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts würde der Wasserbedarf für die Beschneigung der Talabfahrt/Schlittelbahn auch mit der geplanten Beschneigungsinfrastruktur abnehmen (aus dem gleichen Grund wie oben).

Abb. 11: Aktueller und zukünftiger Wasserbedarf (in m³ Wasser) für die Beschneigung: links für alle beschneiten Pisten, rechts für die Talabfahrt/Schlittelbahn (RCP 8.5)



Abschliessende Bemerkungen

Die bestehende, notabene sehr aufwendig zu betreibende Beschneiungsinfrastruktur ist für den aktuell vorgesehenen Einsatz aus klimatischer Sicht knapp ausreichend. Für mehr – sei es eine Beschneigung von tiefer gelegenen Teilen des Skigebiets oder eine Beschneigung in einem wärmeren Klima – wäre sie nicht geeignet. Mit der geplanten Beschneiungsinfrastruktur könnte eine deutliche Erhöhung der Schneesicherheit erzielt werden. Letztlich hängt die Beurteilung vom Planungshorizont ab. Wenn man von 20 Jahren ausgeht (Zeitfenster 2030), werden durchwegs gute Werte erreicht (auch im Bereich der Talstation). Wenn man von 40 Jahren ausgeht (Zeitfenster 2050), müssen Abstriche gemacht werden – diese betreffen sowohl die Talabfahrt als auch den Saisonstart inklusive Weihnachten/Neujahr. Im Weiteren muss darauf hingewiesen werden, dass die Erhöhung der Schneesicherheit nur erreicht werden kann, wenn deutlich mehr beschneit wird (z.B. Verdoppelung des Wasserbedarfs von heute bis 2050 bei RCP 8.5). Zukünftige Schneesicherheit ist nicht nur eine technisch-klimatische Frage, sondern muss auch aus betriebswirtschaftlicher Warte kritisch hinterfragt werden (Investitions- und Betriebskosten).

Die 100-Tage Regel und der Weihnachtsindikator sind gebräuchliche Indikatoren. In der wissenschaftlichen Literatur wird gemeinhin davon ausgegangen, dass diese Indikatoren nicht in jedem Winter (also zu 100%) erfüllt sein müssen – weil man davon ausgeht, dass Skigebiete den einen oder anderen schlechteren Winter verkraften bzw. schlechtere mit besseren Jahren kompensieren können. Wenn man beispielsweise einen Schwellenwert von 70% fordert (100-Tage Regel und Weihnachtsindikator sind in 7 von 10 Jahren erfüllt), ist Elm mit der geplanten Beschneiungsinfrastruktur bis Mitte Jahrhundert (zumindest auf Höhe der Mittelstation) gut aufgestellt. Letztlich sind aber auch damit betriebswirtschaftliche Fragen verknüpft. Zum Beispiel:

- Wie viele Betriebstage wollen/brauchen wir (in Elm dauert die Saison normalerweise von Mitte Dezember bis Ende März/anfangs April, also ungefähr 105 Tage)?
- Ist ein Schwellenwert von 70% akzeptabel, oder brauchen wir, zumindest über Weihnachten/Neujahr, nicht mindestens 90%?

Die zukünftigen Veränderungen von Niederschlag und Temperatur sind stark von den zukünftigen Treibhausgas-Emissionen abhängig. In der näheren Zukunft (2030 und 2040) unterscheiden sich die Veränderungssignale der drei RCPs nicht sehr stark. Hinzu kommt, dass die Auswirkungen dieser vergleichsweise geringen Unterschiede in den Temperatur- und Niederschlagssignalen mit einer leistungsstarken Beschneiungsanlage „aufgefangen“ werden können. Daher unterscheiden sich auch die Ergebnisse unserer Berechnungen – unabhängig vom betrachteten RCP – in der näheren Zukunft nicht so stark. Grössere Unterschiede sind erst ab Mitte des Jahrhunderts erkennbar, und im letzten Zeitfenster (2080) werden die Unterschiede in den Auswirkungen von RCP 2.6 (konsequenter Klimaschutz) und RCP 8.5 (kein Klimaschutz) überdeutlich.

Ein anderes Bild zeigt sich beim Wasserbedarf. Dieser steigt – zumindest so lange wie die klimatischen Voraussetzungen für die technische Beschneigung gegeben sind – mehr oder weniger kontinuierlich an: beim RCP 2.6 weniger ausgeprägt, beim RCP 8.5 ausgeprägter, da hier die höheren Temperaturveränderungssignale „kompensiert“ werden müssen. All dies würde aus der Sicht des alpinen Wintertourismus für einen griffigen globalen Klimaschutz sprechen.

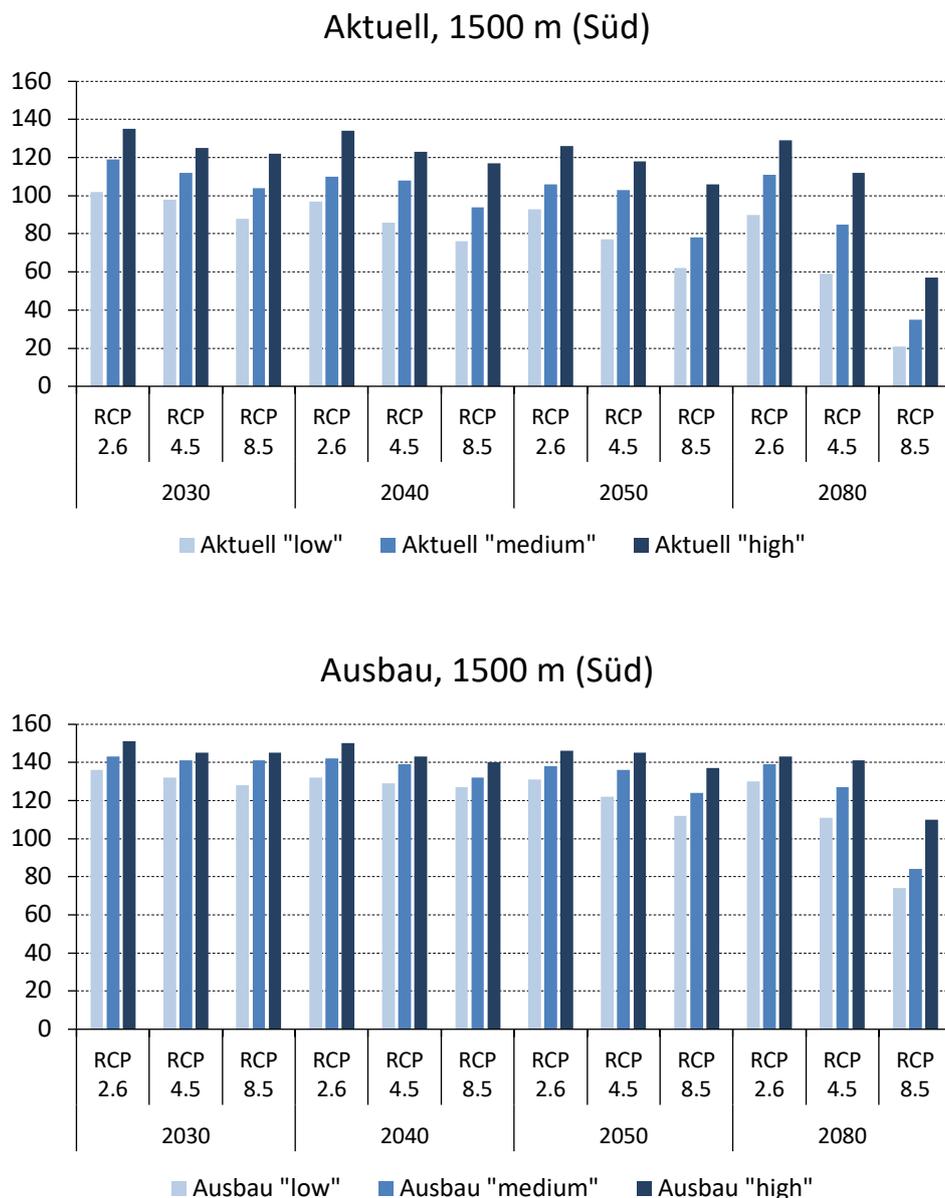
Literatur

- Abegg, B. (1996): Klimaänderung und Tourismus – Klimafolgenforschung am Beispiel des Wintertourismus in den Schweizer Alpen. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich: Zürich.
- CH2018 (2018): CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zürich.
- Klein, G., Vitasse, Y., Rixen, C., Marty, C. & Rebetez, M. (2016): Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset. *Climatic Change*, DOI 10.1007/s10584-016-1806-y.
- Laternser, M. & Schneebeli, M. (2003): Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931–99). *International Journal of Climatology* 23: 733–750.
- Marty, C. (2008): Regime shift of snow days in Switzerland. *Geophys Res Lett* 35.
- NCCS (Hrsg.) (2018): CH2018 - Klimaszenarien für die Schweiz. National Centre for Climate Services, Zürich.
- Scott, D., Dawson, J. & Jones, B. (2008): Climate change vulnerability of the US Northeast winter recreation–tourism sector. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 13: 577-596.
- Serquet, G., Marty, C., Dulex, J.-P. & Rebetez, M. (2011): Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation-day ratio in Switzerland. *Geophys Res Lett* 38.
- Serquet, G., Marty, C. & Rebetez, M. (2013): Monthly trends and the corresponding altitudinal shift in the snowfall/precipitation day ratio. *Theoretical and Applied Climatology* 114: 437-444.
- Steiger, R. (2010): The impact of climate change on ski season length and snowmaking requirements in Tyrol, Austria. *Climate Research* 43: 251-262.
- Witmer, U. (1986): Erfassung, Bearbeitung und Kartierung von Schneedaten in der Schweiz. Bern, Geographica Bernensia (G25).

Anhang

In Abb. 12 werden die Modellunsicherheiten (Bandbreite der Ergebnisse) am Beispiel der Anzahl Tage mit ≥ 30 cm Schnee für die bestehende und die geplante Beschneigungsinfrastruktur aufgezeigt. „Low“ bezieht sich auf das 10%-Quantil (90% der Ergebnisse sind grösser wie der Wert für „low“), „medium“ auf den Median und „high“ auf das 90%-Quantil (90% der Ergebnisse sind kleiner wie der Wert für „high“).

Abb. 12: Modellunsicherheit – Anzahl Tage ≥ 30 cm Schnee auf 1500 m (Süd): aktuell (oben) und Ausbau (unten)



In Abb. 13 werden unterschiedliche Expositionen (Süd vs. Ost/West) verglichen. Gezeigt werden die Anzahl Tage mit ≥ 30 cm Schnee auf 1500 m. Auffallend ist:

- Die Unterschiede zwischen den beiden Expositionen sind gering.
- Bei der aktuellen Beschneigung sind die Unterschiede etwas grösser als bei der geplanten Beschneigung. Das dürfte damit zusammenhängen, dass der Einfluss einer Ausrichtung nach Süden (höhere Schneeschmelze) mit der geplanten, deutlich leistungstärkeren Beschneiungsanlage besser „kompensiert“ werden kann.

Abb. 13: Skitage – Anzahl Tage mit ≥ 30 cm auf 1500 m (Vergleich Süd vs. Ost/West)

