

"Wir würden jedenfalls inskünftig in der Schweiz mit mehr Schnee besser leben als mit weniger Schnee."

Walter Ammann, Direktor SLF Davos, 1999

## 4. Klimaänderung und Schneesicherheit

Die Abhängigkeit des alpinen Wintertourismus von guten Schneebedingungen ist beträchtlich, und schneearme Winter hinterlassen massive finanzielle Spuren. Die drei aufeinanderfolgenden schneearmen Winter Ende der 80er Jahre führten diesen einfachen Zusammenhang sehr deutlich vor Augen. Generell zeichnet sich der alpine Wintertourismus durch eine hohe Sensitivität gegenüber der natürlichen Klimavariabilität beziehungsweise einer Klimaänderung aus, da bei einer Erwärmung auch mit weniger Schnee gerechnet werden muss. Im folgenden Kapitel wird zunächst ein Konzept entwickelt, um die Schneesicherheit von Skigebieten zu beurteilen (Kap. 4.1). Am Beispiel Engelberg werden die Schneebedingungen analysiert und die heutige Schneesicherheit bestimmt (Kap. 4.2). Kapitel 4.3 widmet sich der Schneesicherheit unter veränderten klimatischen Bedingungen. Mittels Schneedeckenmodellierungen wird die zukünftige Schneesicherheit von ausgewählten Schweizer Wintersportstationen beurteilt (Engelberg, Disentis, Montana, Davos und Davos-Weissfluhjoch). Abschliessend wird in Kapitel 4.4 aufgrund der zu erwartenden Veränderungen der Schneebedingungen die zukünftige Schneesicherheit im gesamten schweizerischen Alpenraum diskutiert.

### 4.1 Die Beurteilung der Schneesicherheit von Skigebieten

Die Schneesicherheit ist einer der wichtigsten Beweggründe bei der Wahl eines Skigebietes (vgl. Kap. 5) und steht gemäss einer repräsentativen Befragung von Übernachtungsgästen an erster Stelle der Gästebedürfnisse in der Wintersaison (Schweizer Tourismus in Zahlen 1999, S. 30). Die Schneesicherheit wird denn auch von den Tourismusverantwortlichen als unabdingbare Voraussetzung für den wirtschaftlichen Erfolg wintertouristisch orientierter Seilbahnunternehmen erachtet (vgl. Kap. 7). Trotzdem liegt bis heute

noch kein befriedigender Vorschlag vor, wie die Schneesicherheit von Ski-gebieten angemessen beurteilt werden kann. Diese Lücke soll mit einem allgemeingültigen Konzept der Schneesicherheit geschlossen werden.

WITMER (1984, S. 65ff.) und ABEGG (1996, S. 59f.) diskutieren die verschiedenen Ansätze, den Begriff Schneesicherheit zu bestimmen. Letzterer stellt zusammenfassend fest, dass sich trotz des Fehlens einer allgemein akzeptierten Definition die Tendenz erkennen lasse, Schneesicherheit über bestimmte Schneehöhen und klar festgelegte Zeitperioden zu definieren. In diese Richtung zielt auch die sogenannte 100-Tage-Regel von WITMER (1986, S. 193): "Eine ökonomisch sinnvolle Investition in Wintersportgebieten ist u.a. nur dann gegeben, wenn während mindestens 100 Tagen je Saison eine Ausnützung der installierten Anlagen erwartet werden kann, was nur mit einer Schneedecke von genügender Mächtigkeit möglich ist."

ABEGG (1996, S. 61f.) bespricht ausführlich die drei inhärenten Fragen der 100-Tage-Regel, nämlich:

- Was bedeutet eine für den Skisport ausreichende Schneedecke?
- Wie wird die Wintersaison definiert?
- Braucht es tatsächlich 100 Tage für einen rentablen Skibetrieb?

Aufgrund seiner Überlegungen zur 100-Tage-Regel kommt er zum Schluss, dass "die Schneesicherheit eines Gebietes gewährleistet [ist], wenn in der Zeitspanne vom 16. Dezember bis zum 15. April an mindestens 100 Tagen eine für den Skisport ausreichende Schneedecke von 30 cm (Ski alpin) bzw. 15 cm (Ski nordisch) vorhanden ist" (ABEGG 1996, S. 62).<sup>18</sup>

Aufgrund der Tatsache, dass die Schneebedingungen einer sehr grossen inter-annuellen Variabilität unterliegen, genügt diese Definition allerdings nicht, um die Schneesicherheit abschliessend und längerfristig zu beurteilen. Sie gibt vielmehr an, ob ein einzelner Winter in Bezug auf die Schneebedingungen als 'gut' bezeichnet werden kann. Daran anschliessend stellt sich die Fra-

---

<sup>18</sup> Der besagte Schwellenwert von mindestens 100 Tagen gilt auch für die vorliegende Arbeit. Allerdings wird für meine Untersuchung mit dem 1. Dezember ein früherer Saisonstart gewählt. Der Grund liegt darin, dass sich die Skigebiete immer häufiger nach den jeweiligen Schneebedingungen richten; liegt bereits Anfangs Dezember ausreichend Schnee, so werden die Anlagen auch betrieben. Als Ergänzung zu den vorgeschlagenen Werten wird eine Mindestschneehöhe von 30 - 50 cm verlangt, da in Höhenlagen über 1'500 - 2'000 m ü.M. der Untergrund meist rauher ist und 30 cm Schnee kaum zur Pistenpräparation ausreichen.

ge, was ein 'schlechter' Winter ist. Analysen von Jahresberichten diverser Seilbahnunternehmen und Gespräche mit Seilbahnmanagern haben gezeigt, dass der Schwellenwert bei rund 40 Tagen liegt, das heisst, ein Winter mit weniger als 40 Tagen mit ausreichender Schneedecke führt höchstwahrscheinlich zu Betriebsverlusten. Einzelne Winter lassen sich somit in Bezug auf die Schneesicherheit folgendermassen einteilen:

*Ein für den Skisport 'guter' Winter liegt vor, wenn in der Zeitspanne vom 1. Dezember bis 15. April an mindestens 100 Tagen eine für den Skisport ausreichende Schneedecke von mindestens 30 - 50 cm vorhanden ist; ein 'schlechter' Winter tritt hingegen ein, wenn an weniger als 40 Tagen ausreichend Schnee liegt.*

Um Schneesicherheit umfassend zu beurteilen, drängt es sich auf, die interannuelle Variabilität des Schnees auch im Konzept der Schneesicherheit zu berücksichtigen. Denn die Seilbahnunternehmungen müssen mit schneearmen Wintern leben können, und die 100-Tage-Regel braucht nicht in jedem Winter erfüllt zu werden. Es stellt sich vielmehr die Frage, wieviele 'gute' Winter während einer bestimmten Zeitspanne notwendig sind, um genügend Reserven für 'schlechte' Winter zu schaffen, oder umgekehrt formuliert, wieviele 'schlechte' Winter kann eine Seilbahnunternehmung in einer bestimmten Zeitperiode verkraften. Daraus lässt sich ein allgemeingültiges Konzept der Schneesicherheit ableiten, und zwar indem die Definition die vier aufgelisteten Kriterien berücksichtigt:

- Mindestzahl an Tagen,
- mit ausreichender Schneedecke für den Wintersport,
- während der Skisaison.

⏟  
ein 'guter' Winter

- Häufigkeit von 'guten' Wintern über einen längeren Zeitraum.

Für jede Skiregion der Welt lässt sich nun anhand der vier Kriterien die Schneesicherheit definieren, wenn die entsprechenden Schwellenwerte eingesetzt werden. Für die vorliegende Untersuchung in den Schweizer Alpen fehlt noch der Schwellenwert der Häufigkeit 'guter' Winter. Aufgrund der Analyse der finanziellen Situation von Seilbahnunternehmen (z.B. ZEGG & POSTI 1998) und der Befragung von Kurdirektoren und Verkehrsvereinspräsidenten in Graubünden (ABEGG 1996) zeigt sich, dass in 10 Jahren 7 'gute' Winter auftreten müssen. Eine Seilbahnunternehmung muss demnach in einer Dekade eine Dreierserie schneearmer Winter, was in den Alpen keine Seltenheit ist, verkraften können. Die Definition von Schneesicherheit für die vorliegende Untersuchung lautet folglich:

*Ein Schweizer Skigebiet ist schneesicher, wenn in 7 von 10 Wintern in der Zeit vom 1. Dezember - 15. April an mindestens 100 Tagen eine für den Skisport ausreichende Schneedecke von mindestens 30 - 50 cm vorhanden ist.*

Gute Schneeverhältnisse sind eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für den wirtschaftlichen Erfolg einer Seilbahnunternehmung. Wenn die Schneesicherheit gemäss meiner Definition gewährleistet ist, so bestehen zumindest hinsichtlich der Schneeverhältnisse gute Voraussetzungen für einen langfristig erfolgreichen Seilbahnbetrieb.<sup>19</sup> Trotzdem sollte das Konzept der Schneesicherheit nicht als strikte Regel verstanden werden, sondern eher als ein praktisches Arbeitsinstrument, das von den Seilbahnmanagern im Allgemeinen akzeptiert wird.

## **4.2 Schneeverhältnisse in Engelberg**

In der Region Ob-/Nidwalden sind nur sehr beschränkt geeignete Messreihen der täglichen Schneehöhe greifbar. Die Beurteilung der Schneeverhältnisse beschränkt sich deshalb auf das Fallbeispiel Engelberg, da dort zwei langjährige Reihen auf unterschiedlichen Höhenlagen zur Verfügung stehen. Es handelt sich um Daten der Messstationen Engelberg (1'020 m ü.M.), die sich in Tallage am Dorfrand befindet, und Trübsee (1'800 m ü.M.), welche im

---

<sup>19</sup> Die vorgeschlagene Definition gilt für mittlere und grosse Unternehmen, wie sie in der vorliegenden Untersuchung im Zentrum stehen. Weniger strenge Kriterien gelten für kleine Skibetriebe und Einzelanlagen.

Mittelteil des Skigebietes Engelberg-Titlis liegt. Die Zeitreihe Engelberg-Dorf umfasst die Winter 1950 bis 1996, diejenige von Trübsee die Winter 1970 bis 1998.

Engelberg zählt zum nördlichen Alpenkamm, welcher sich durch sehr hohe Niederschläge und für die jeweilige Höhenlage überdurchschnittliche Schneemengen auszeichnet.<sup>20</sup> Eine sehr detaillierte Analyse der Messreihe von Engelberg-Dorf nimmt BRAND (1991) vor. Er zeigt unter anderem die paradoxe Situation für Engelberg, dass trotz einer deutlichen, langfristigen Temperaturzunahme noch keine signifikante Schneehöhenabnahme festgestellt werden kann.

Die Schneeerhältnisse in Engelberg werden in drei Abschnitten beschrieben. Zuerst wird der durchschnittliche Jahresverlauf der Schneehöhen, dann die Wahrscheinlichkeit des Auftretens bestimmter Schneehöhen und schliesslich die Anzahl Tage mit einer bestimmten Schneebedeckung diskutiert.

Abbildung 4.1 zeigt den Schneehöhenverlauf in Engelberg-Dorf und Engelberg-Trübsee. Dargestellt werden der Mittelwert (arithmetisches Mittel) sowie die Minimal- und Maximalwerte (tiefster und höchster Tageswert) der jeweiligen Messreihe.

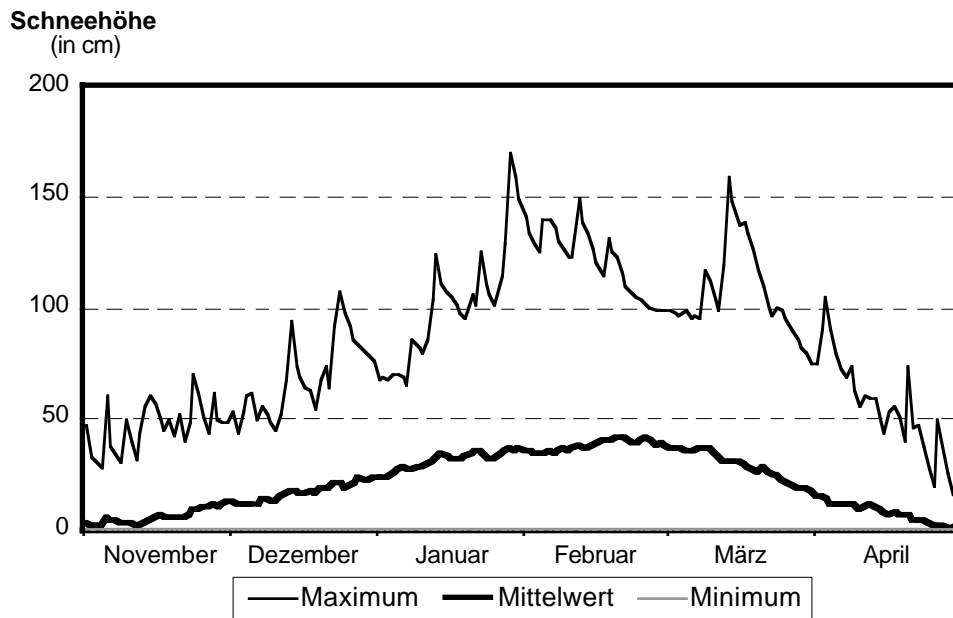
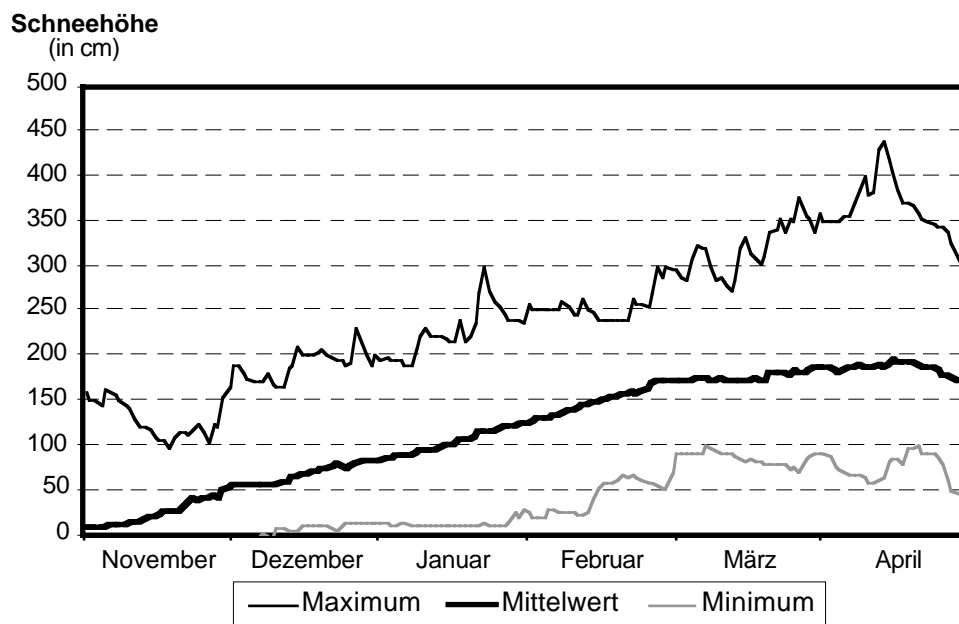
Die beiden Stationen unterscheiden sich in zwei wesentlichen Punkten. Erstens liegen erwartungsgemäss alle Werte auf dem Trübsee deutlich höher als in Engelberg-Dorf. Im März und April werden im Mittel auf dem Trübsee fast zwei Meter Schnee gemessen, und das Maximum erreicht über vier Meter. Im Dorf liegt im Februar durchschnittlich knapp 40 cm Schnee, und das Maximum übertrifft die Zwei-Meter-Marke nie. Zweitens unterscheidet sich der Verlauf der Kurven. Während im Dorf der Scheitelpunkt des Mittelwertes bereits Ende Februar erreicht wird und im April der Schnee rasch schmilzt, fällt der Scheitelpunkt auf dem Trübsee auf Mitte April. Dort liegt bis Ende Mai immer noch mehr als einen Meter Schnee.

---

<sup>20</sup> vgl. WITMER (1984 und 1986) oder SCHÜEPP et al. (1980)

**Abb. 4.1:** Schneehöhenverlauf in Engelberg

Quelle: eigene Berechnungen (Daten: SLF)

*Engelberg-Dorf (1950-1996)<sup>21</sup>**Engelberg-Trübsee (1970-1998)*

<sup>21</sup> Das Minimum liegt fast durchgehend bei 0 cm.

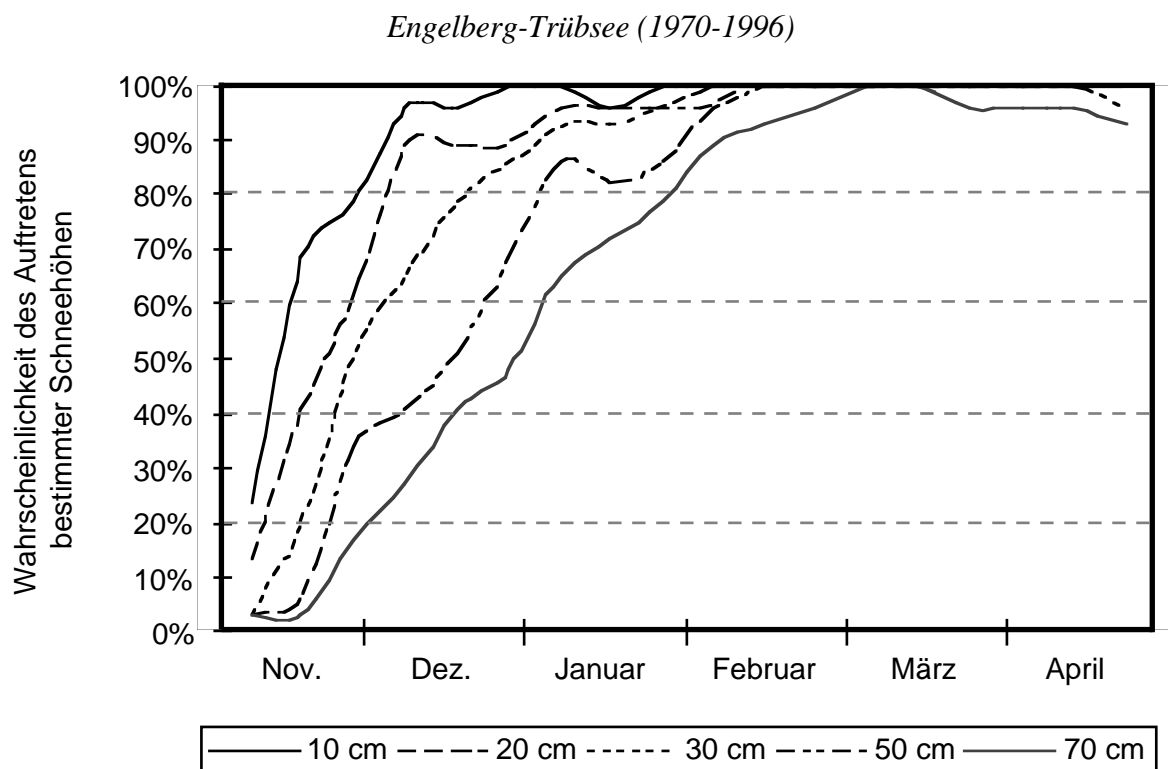
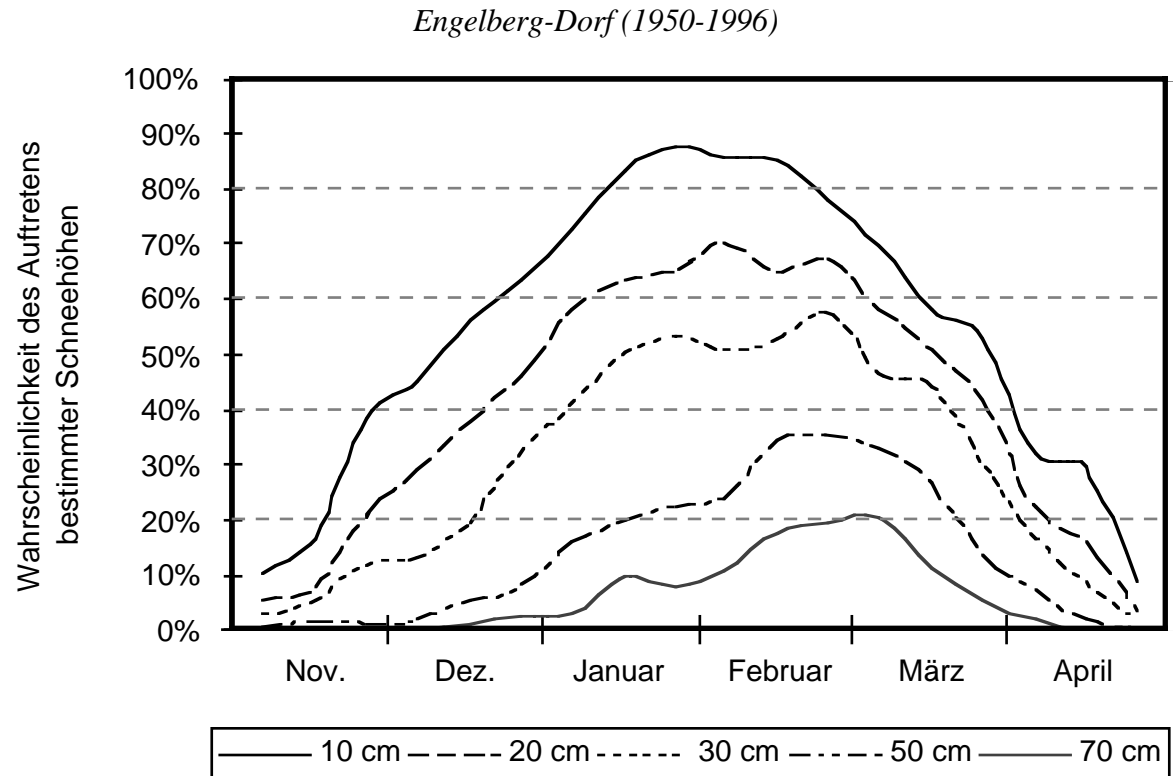
Im Durchschnitt liegt in Engelberg die für den Skisport erforderliche Schneehöhe von 30 cm an 63 Tagen, nämlich vom 11. Januar bis zum 14. März. Auf dem Trübsee liegen im Mittel ab Anfang Dezember bis in den Frühsommer die auf dieser Höhenlage erforderlichen 50 cm Schnee. Der Verlauf der Minimakurve in Engelberg ist kaum zu erkennen, da der Wert bis auf eine Ausnahme immer 0 cm beträgt, also kein Schnee liegt. Sogar auf dem Trübsee auf 1'800 m ü.M. bleiben die Minimalwerte bis Mitte Februar unter 30 cm. Ungenügende Schneeverhältnisse über Weihnachten/Neujahr können also in Extremwintern durchaus auch in höheren Lagen auftreten.

Ein 'Probability Calendar' gibt Auskunft über die Wahrscheinlichkeit des Auftretens bestimmter Schneehöhen (RISSER & MARTIN 1984). Dies erlaubt die Abschätzung, ob am gewählten Standort in bestimmten Zeiträumen (z.B. Weihnachten/Neujahr) mit ausreichend Schnee zum Skifahren gerechnet werden kann. Das Beispiel Engelberg-Dorf zeigt, dass an Weihnachten/Neujahr mit einer Wahrscheinlichkeit von rund 65% mindestens 10 cm Schnee liegen (Abb. 4.2). In Engelberg können deshalb 'Weisse Weihnachten' mit recht grosser Wahrscheinlichkeit erwartet werden. Allerdings reicht dann im Dorf der Schnee meistens nicht aus, um Skifahren zu können, denn an rund 7 von 10 Weihnachten liegt weniger als 30 cm Schnee. Nur von Mitte Januar bis Ende Februar liegt mit 50% Wahrscheinlichkeit 30 cm Schnee.

Auf der Höhe Trübsee sehen die Verhältnisse ganz anders aus, denn dort schneit es meistens bereits im November kräftig ein, so dass ab anfangs Dezember in vier von fünf Wintern mindestens 10 cm Schnee liegt. Die notwendige Schneedecke von 50 cm tritt mit derselben Wahrscheinlichkeit ab Ende Dezember ein. Während des Hochwinters bis Ende April kann sogar mit fast 100% Sicherheit eine Schneedecke von mindestens 70 cm Mächtigkeit erwartet werden.

**Abb. 4.2:** 'Probability Calendars' von Engelberg

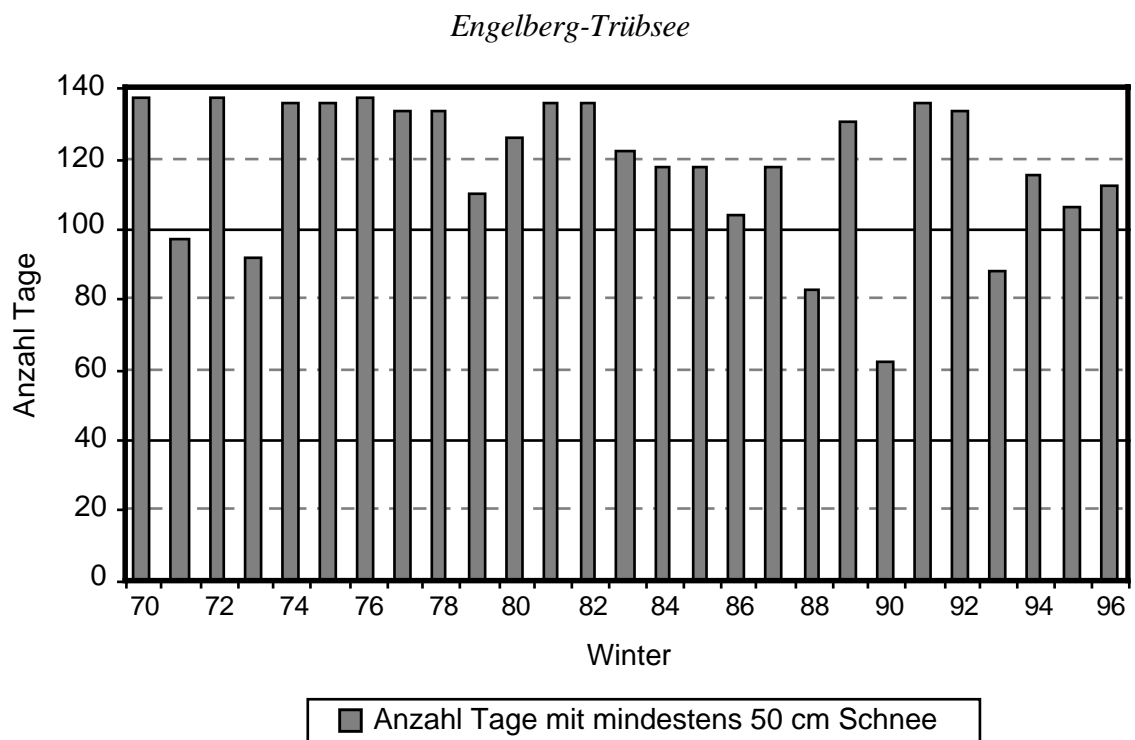
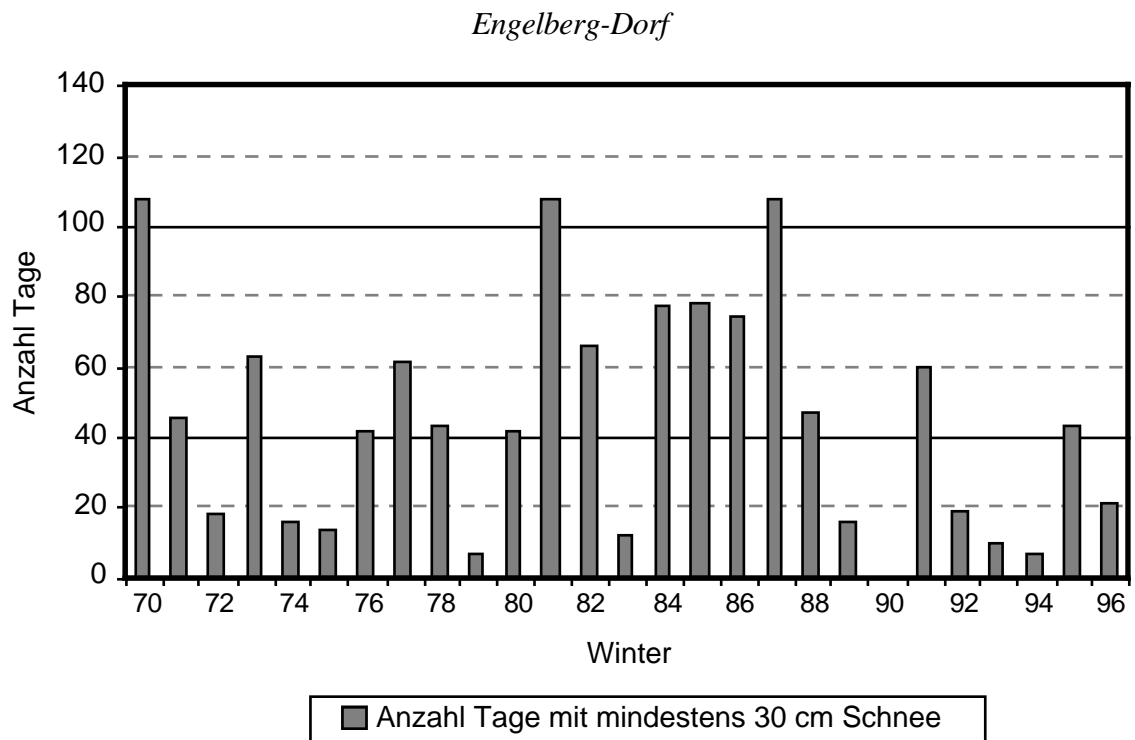
Quelle: eigene Berechnungen (Daten: SLF)





**Abb. 4.3:** Anzahl Tage  $\geq 30/50$  cm Schnee in Engelberg (1. Dez. - 15. April)

Quelle: eigene Berechnungen (Daten: SLF)



Um die Schneesicherheit von Engelberg abschätzen zu können, bedarf es gemäss Definition die Betrachtung der Anzahl Tage mit den für den Skisport erforderlichen Schneehöhen. Abbildung 4.3 zeigt die Anzahl Tage mit mindestens 30 cm Schnee während der Skisaison in Engelberg-Dorf und mit mindestens 50 cm für Engelberg-Trübsee.

In den beiden Diagrammen kommt die grosse natürliche Variabilität deutlich zum Ausdruck. In Engelberg-Dorf treten einerseits eine Reihe von Wintern mit weniger als 20 Tagen mit der erforderlichen Schneedecke auf, und im Winter 1990 lag sogar an keinem einzigen Tag mindestens 30 cm Schnee. Andererseits liegt in schneereichen Wintern an über 100 Tagen genügend Schnee. Der Maximalwert von 136 beziehungsweise an Schaltjahren 137 Tagen wird jedoch im Dorf nie erreicht. Auch auf dem Trübsee tritt die Variabilität deutlich hervor, allerdings liegt die Spanne zwischen 62 Tagen (im Winter 1990) und dem grösstmöglichen Wert, der im Schnitt alle fünf Jahre erreicht wird.

Abschliessend lässt sich die Schneesicherheit der beiden Stationen bestimmen (Tab. 4.1). Engelberg-Dorf muss eindeutig als nicht-schneesicher bezeichnet werden. Dort werden die erforderlichen Kriterien deutlich verfehlt, denn statt mindestens 70% werden je nach Schwellenwert der erforderlichen Schneehöhe nur gerade 15 - 26% gute Winter erreicht. 21 - 37% der Winter müssen sogar als schlecht bezeichnet werden. Engelberg-Trübsee hingegen erreicht die erforderlichen Werte bei Schwellenwerten von 30 und 50 cm Schneehöhe mit 93% beziehungsweise 81% guter Winter, und verpasst bei 70 cm den Schwellenwert bei 70% nur sehr knapp.

**Tab. 4.1:** Schneesicherheit von Engelberg

Quelle: eigene Berechnungen (Daten: SLF; Dorf: 1970-1998; Trübsee 1950-1996)

	Engelberg-Dorf (1'020 m ü.M.)		Engelberg-Trübsee (1'800 m ü.M.)		
	> 20 cm	> 30 cm	> 30 cm	> 50 cm	> 70 cm
<b>gute Winter</b>	26%	15%	93%	81%	67%
<b>mittlere Winter</b>	53%	49%	7%	19%	33%
<b>schlechte Winter</b>	21%	37%	0%	0%	0%
<b>Schneesicherheit</b>	nein	nein	ja	ja	nein

### 4.3 Schneedecken-Modellrechnungen

Da der alpine Wintertourismus sehr sensitiv auf Veränderungen der Schnee-verhältnisse reagiert, ist es von grossem Interesse, wie sich eine mögliche Klimaänderung auf die Schneedecke auswirken wird. Aufgrund von einfachen Schneemodellen lässt sich grob abschätzen, wie sich die Höhengrenze der Schneesicherheit bei einer Klimaänderung verschieben wird (vgl. Kap. 4.4). Verschiedenste Autoren haben solche Schneemodellierungen mit unterschiedlicher Methodik ausgeführt. Einen Überblick dieser Arbeiten bietet KÖNIG (1998). Für die detaillierte Beurteilung der Schneesicherheit mittels des vorgestellten Konzeptes (Kap. 4.1) greifen diese Ansätze jedoch zu kurz. Notwendig sind Verfahren, welche erstens nicht nur die Anzahl Tage mit Schneebedeckung, sondern den zukünftigen Schneedeckenverlauf modellieren. Zweitens muss sich diese Modellierung auf die lokale Ebene, das heisst den Wintersportort selbst, beziehen. Diese Anforderungen erfüllt die im folgenden beschriebene Methode.

#### 4.3.1 Methode der Schneedecken-Modellrechnungen

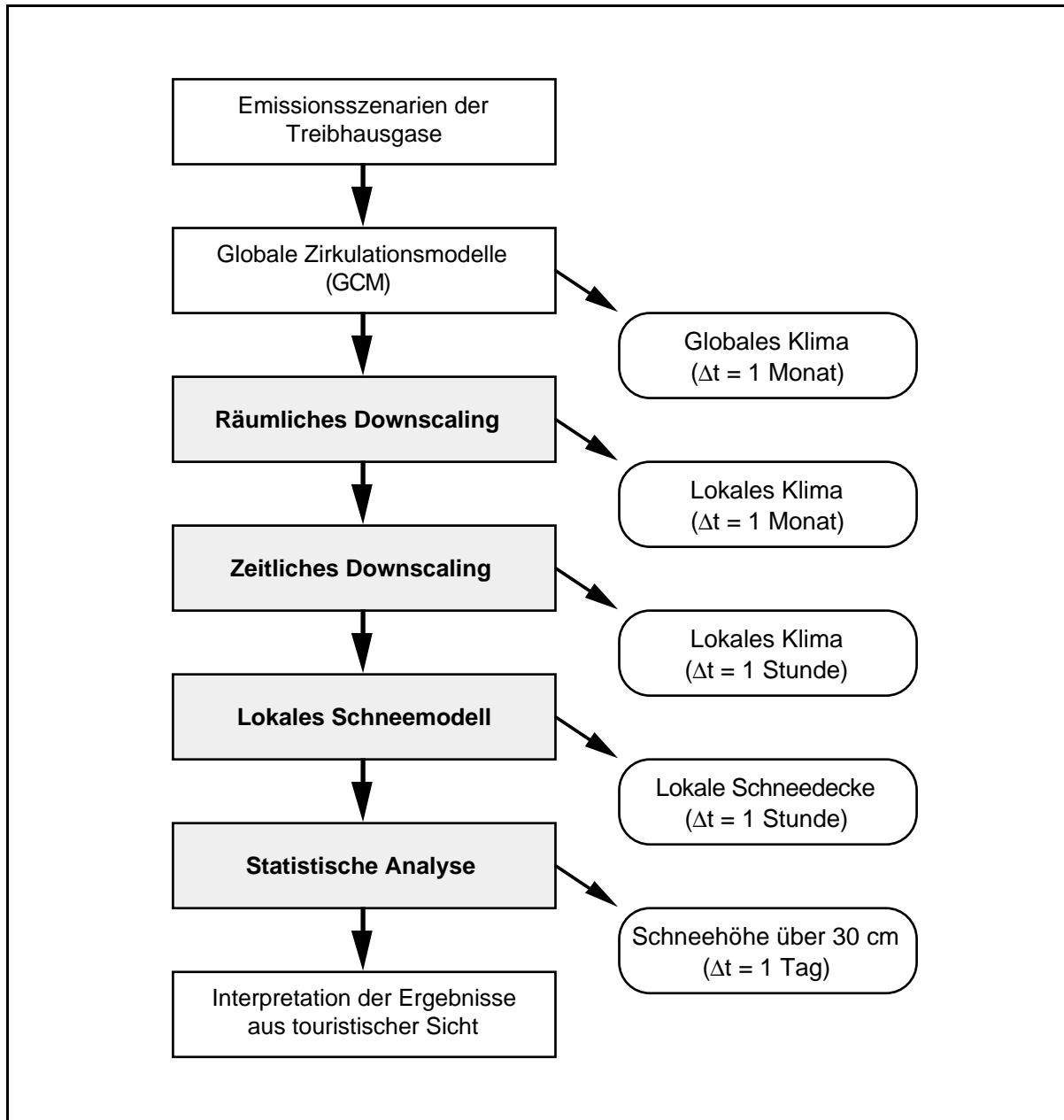
Für die Schneemodellierung konnte ich auf die von Dr. Bruno Abegg initiierte Zusammenarbeit mit verschiedenen Personen zählen: Dr. Dimitrios Gyalistras (Geographisches Institut Universität Bern) ist für die Klimaszenarien und den von ihm entwickelten stochastischen Wettergenerator verantwortlich. Dr. Mario Rohrer, Christoph Wahrenberg, Daniela Lorenzi und Urs Steinegger (Geographisches Institut ETH Zürich/Meteodat AG) lieferten das Schneemodell und führten die entsprechenden Berechnungen durch. Erste Resultate dieser Zusammenarbeit sind in Form von Schneemodellrechnungen für die Stationen Disentis und Einsiedeln von ABEGG (1996) publiziert worden. Die hier vorgestellten Schneemodellierungen der Stationen Engelberg, Disentis, Montana, Davos und Davos-Weissfluhjoch sind ein Ergebnis der Intensivierung der Zusammenarbeit. GYALISTRAS et al. (in Vorbereitung) beschreiben die Methodik und stellen die Resultate der Schneemodellierungen zusammen, ABEGG et al. (in Vorbereitung) diskutieren die Resultate aus skitouristischer Sicht.<sup>22</sup>

---

<sup>22</sup> Die folgenden Ausführungen tragen der Tatsache Rechnung, dass der Leserkreis dieser Arbeit meist aus Nicht-Klimatologen besteht. Deshalb sind die methodischen Ausführungen möglichst kurz und einfach verfasst. Für vertiefende methodische Einblicke bieten sich die Ar-

**Abb. 4.4:** Verfahren der Schneedecken-Modellrechnungen

Quelle: nach GYALISTRAS et al. (in Vorbereitung)



Den Schneedecken-Modellrechnungen liegt ein vierstufiges Verfahren zu Grunde (Abb. 4.4), das im folgenden Abschnitt kurz erläutert wird. Das Ziel der Methode liegt darin, die zukünftige Schneesicherheit für bestimmte Stationen in den Alpen ausgehend von Emissionsszenarien von Treibhausga-

sen und Globalen Zirkulationsmodellen (GCM) abschätzen zu können.

- Räumliches Downscaling

Um Klimaszenarien für einzelne Stationen berechnen zu können, braucht es statistische Downscaling-Verfahren. Sie transformieren grossräumige Klimaveränderungen der GCM's auf die regionale Ebene.

- Temporales Downscaling

GCM's liefern eine zeitliche Auflösung von einem Monat. Für eine angemessene Simulation der Schneedecke braucht es aber eine Auflösung von mindestens einer Stunde. Zu diesem Zweck werden mit einem zeitlichen Downscaling aus den Monatsmittelwerten stündliche Temperatur- und Niederschlagswerte simuliert.

- Lokales Schneemodell

Mit Hilfe des Schneemodells wurden aus den lokalen Niederschlags- und Temperaturwerten das stündliche Wasseräquivalent des Schnees und die Schneedecke für die jeweilige Station modelliert. Für die vorliegenden Untersuchungen fand nur die simulierte Schneehöhe jeweils am Morgen um 7 Uhr (UTC) Verwendung.

- Statistische Analyse aus Sicht des Tourismus

Um die zukünftige Schneesicherheit von Skistationen abschätzen zu können, braucht es gemäss des Konzeptes von Schneesicherheit ganz bestimmte statistische Werte. Im Zentrum steht die Frage, ob an einem bestimmten Tag jeweils am Morgen mindestens 30 cm Schnee liegt. Dieser Wert liefert die Grundlage, um die Schneesicherheit gemäss meinem Konzept zu beurteilen, nämlich die Anzahl Tage innerhalb der Skisaison (1. Dezember - 15. April) mit mindestens 20, 30 oder 50 cm Schnee. Daraus lässt sich die Häufigkeit von 'guten' (mindestens 100 Tage ausreichend Schnee während der Skisaison), 'mittleren' (40 - 99 Tage) und 'schlechten' Jahren (weniger als 40 Tage) berechnen.

### 4.3.2 Die verwendeten Klimaszenarien

Als Grundlage für die Schneedecken-Modellrechnungen dienen zwei Globale Zirkulationsmodelle (GCM), nämlich das ECHAM-Modell des Max Planck Instituts für Meteorologie in Hamburg (CUBASCH et al. 1992) und das CCC-Modell des Canadian Climate Center (BOER et al. 1992). Beide Modelle simulieren zukünftige Gleichgewichtsklimata, die bei einer schrittweisen Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in der Atmosphäre eintreten würden. Das räumliche und zeitliche Downscaling der globalen Klimaszenarien auf die lokale Ebene erfolgte mittels der Methode von GYALISTRAS et al. (1994).

Die simulierten Klimaszenarien könnten sich ungefähr im Zeitraum 2030 bis 2050 einstellen. Allerdings beinhaltet diese Abschätzung verschiedene Unsicherheiten wie zum Beispiel der weitere Verlauf der Treibhausgas-Emissionen oder die kühlende Wirkung der Aerosole.

In Tab. 4.2 sind die monatlichen Temperatur- und Niederschlagswerte für das Winterhalbjahr in Engelberg-Dorf zusammengestellt.<sup>23</sup> Die Angaben für die Situation 'heute' beziehen sich auf das Mittel der Jahre 1931 - 1980 (Referenzklima), die Angaben für die Zukunft sind Resultate der Downscaling-Simulationen mit den beiden Klimamodellen ECHAM und CCC.

Die beiden Klimamodelle zeigen deutliche Unterschiede im Hinblick auf die simulierten Temperatur- und Niederschlagsänderungen des Winterhalbjahres in Engelberg. Während mit dem ECHAM-Modell nur ein leichter Temperaturanstieg von 1.2°C resultieren würde, würde die Temperatur unter CCC-Bedingungen um 2.6°C steigen. Allerdings würde die Niederschlagsmenge bei ECHAM um 12,5% sinken, bei CCC hingegen sogar leicht steigen. Zusammenfassend wäre das Winterklima in Engelberg unter ECHAM-Bedingungen leicht wärmer und trockener, unter CCC-Bedingungen stark wärmer und leicht feuchter. Beide Klimaszenarien zeigen jedoch einen ähnlichen Verlauf der Parameter während der Wintermonate. Insbesondere der Hochwinter im Januar und Februar ist wärmer und feuchter, während in den Randmonaten die Erwärmung schwächer ausfällt und die Niederschlagsmengen niedriger wären.

---

<sup>23</sup> Für die Station Engelberg-Trübsee konnten keine Modellierungen durchgeführt werden, da aufgrund der zu kurzen Messreihe keine verlässlichen Ergebnisse berechnet werden können.

**Tab. 4.2:** Monatliche Klimaszenarien im Winterhalbjahr (Engelberg-Dorf)

Quelle: Pers. Auskunft von D. Gyalistras

	<b>heute</b> (1931 - 1980)		<b>ECHAM</b> (2 * CO <sub>2</sub> )		<b>CCC</b> (2 * CO <sub>2</sub> )	
	T (°C)	N (mm)	$\Delta T$ (°C)	$\Delta N$ (%)	$\Delta T$ (°C)	$\Delta N$ (%)
<b>November</b>	1.7	112	1.1	-17.9	1.7	-22.8
<b>Dezember</b>	-2.2	94	1.3	-17.1	2.9	-2.7
<b>Januar</b>	-3.1	102	1.1	-3.3	3.4	24.5
<b>Februar</b>	-1.8	102	1.6	-11.6	3.2	27.4
<b>März</b>	1.2	104	0.9	-11.1	2.7	-1.8
<b>April</b>	5.0	118	1.1	-14.0	1.9	0.7
<b>Mittel</b>	0.1	105	+1.2	-12.5	+2.6	+4.2

### 4.3.3 Das Schneemodell

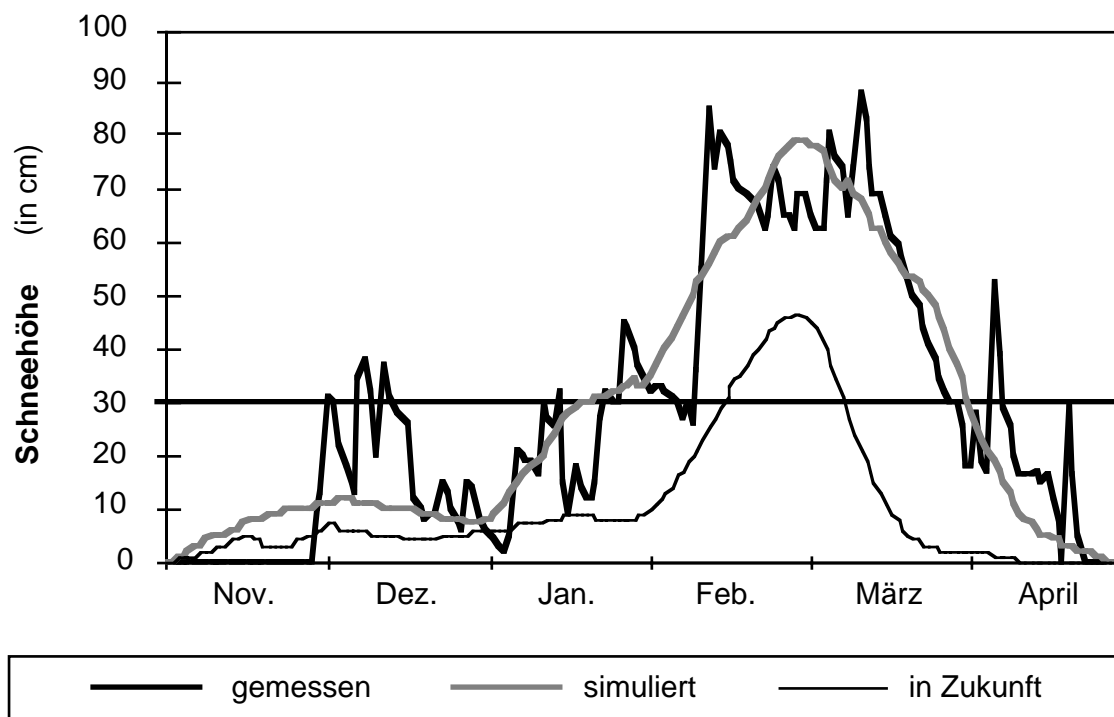
Das Schneemodell beruht auf einem relativ einfachen Verfahren (vgl. ABEGG 1996, S. 132ff.), um die Kompatibilität mit den Klimaszenarien zu gewährleisten. Als Input benötigt es nur die von den Szenarien simulierten stündlichen Temperatur- und Niederschlagswerte sowie die wichtigsten Stationsparameter. Einerseits wird mittels Lufttemperatur bestimmt, ob der Niederschlag als Schnee oder als Regen fällt. Andererseits simuliert ein Grad-Tag-Verfahren die Schneeschmelze (BRAUN 1985, S. 73ff.). Diese Schritte werden in mm Wasseräquivalent ausgeführt und erst am Schluss mit dem Verdichtungsmodell von MARTINEC (1977, S. 185ff.) in cm Schneehöhe umgerechnet.

Abb. 4.5 zeigt am Beispiel des Winters 1984/85 das Ergebnis der Schneemodellierung. Dieser Winter war überdurchschnittlich schneereich und die Veränderungen sind deshalb gut ersichtlich. Dargestellt werden der 'heutige' (gemessen und simuliert) sowie der 'zukünftige' Schneehöhenverlauf, wie er sich in diesem Winter unter ECHAM-Bedingungen eingestellt hätte. Der Vergleich der gemessenen mit den modellierten Werten zeigt die hohe Validität des Modells ( $r^2=0.94$ ); der Verlauf der Kurve wird sehr gut nachgebildet. Einige Maximal- und Minimalwerte fallen zwar zu schwach aus, was aber den Indikatorwert nicht wesentlich beeinflusst. Das Modell simuliert 74 Tage mit mindestens 30 cm Schnee während der Skisaison (1. Dezember bis 15. April), anstatt der gemessenen 77 Tage. Unter ECHAM Bedingungen

würde im entsprechenden Winter 1984/85 deutlich weniger Schnee liegen, und die Saison wäre wesentlich kürzer. Gute Bedingungen mit mindestens 30 cm Schnee würde nur noch an 28 Tagen vorherrschen.

**Abb. 4.5:** Gemessene und modellierte Schneehöhe in Engelberg (Winter 1984/85)

Daten: SLF



Anzahl Tage mit mindestens 30 cm Schnee (1. Dez. - 15. April):	
gemessen (Winter 1984/85):	77 Tage
simuliert (Winter 1984/85):	74 Tage ( $r^2 = 0.94$ )
in Zukunft (ECHAM):	28 Tage



#### 4.3.4 Resultate

Die Schneedecken-Modellrechnungen weisen eine sehr hohe Qualität auf (Gyalistras et al., in Vorbereitung) und erlauben eine adäquate Abschätzung der zukünftigen Schneesicherheit in den ausgewählten Wintersportorten. Trotzdem unterliegen die Resultate aufgrund der Modellannahmen gewissen Einschränkungen:

- Die Schneedecke wird exakt für die Station simuliert, welche ausser auf dem Weissfluhjoch immer im Dorf auf Höhe der Talstation liegt. Die Resultate sind deshalb entweder als Minimalwerte für das Skigebiet zu betrachten, da im höhergelegenen Teil des Skigebiets beziehungsweise ab der Mittelstation mehr Schnee liegt als im Dorf, oder sie gelten annäherungsweise für andere Skigebiete im Alpenraum auf derselben Höhenlage.
- Der Untergrund der Skipisten, ihre Exposition und die Art des Schnees fliessen nicht in die Simulation ein. Zudem schliessen die Berechnungen eine künstliche Beschneidung und andere mögliche technische Massnahmen (z.B. Schneedepots) aus.
- Die Analysen basieren auf zwei anerkannten GCM's. Unter veränderten Klimabedingungen können sich jedoch in den Alpen auch die Häufigkeitsverteilungen von Wetterlagen ändern, was sich unter Umständen stark auf die zukünftigen Schneeverhältnisse auswirken würde (WANNER et al. 1998).

##### 4.3.4.1 Zukünftige Schneesicherheit in Engelberg

Das Skigebiet Engelberg-Titlis darf unter den heutigen Bedingungen aufgrund seiner Höhenerstreckung als schneesicher bezeichnet werden, obwohl Engelberg selbst nicht schneesicher ist (vgl. Kap. 4.2). Aufgrund der Ergebnisse der Schneemodellierung für die Station Engelberg-Dorf lässt sich nun die zukünftige Verschlechterung der Schneesicherheit unter veränderten klimatischen Verhältnissen aufzeigen.

**Abb. 4.6:** Modellierte Schneesicherheit von Engelberg

Quelle: eigene Berechnungen

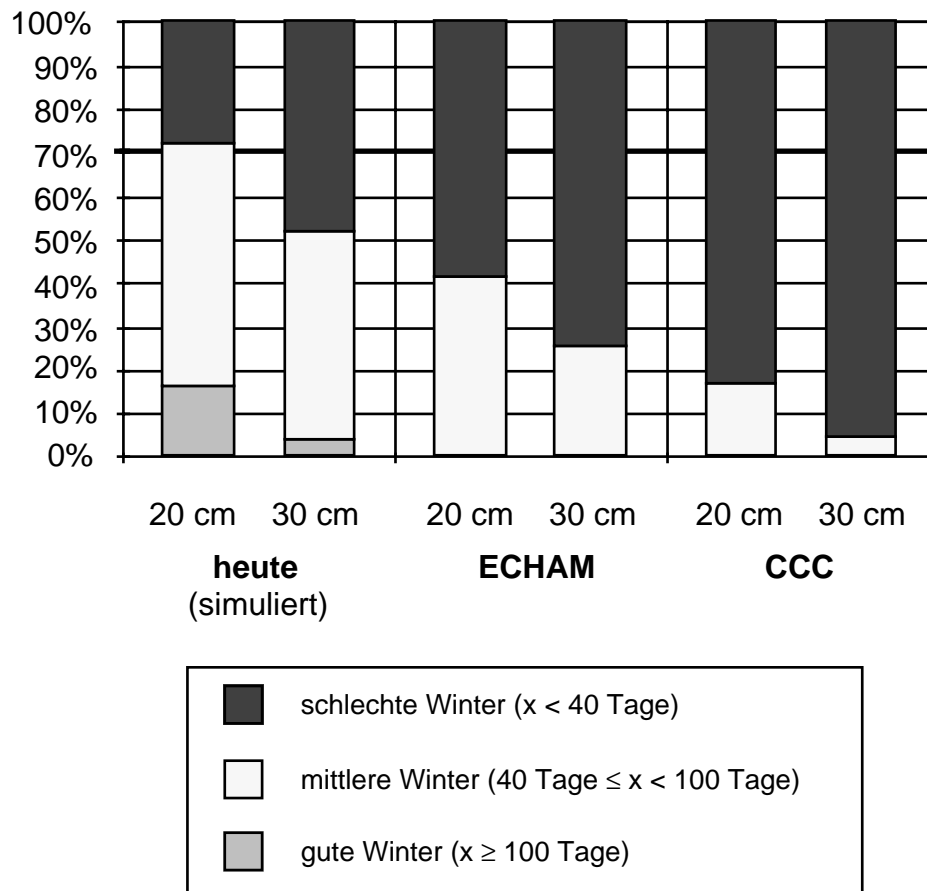


Abb. 4.6 illustriert die Ergebnisse der Schneemodellierung. Die bereits heute sehr kritischen Bedingungen für Engelberg-Dorf würden sich noch weiter verschlechtern. Sowohl das ECHAM- als auch das CCC-Modell modelliert für die Zukunft, das heisst für klimatische Bedingungen, die im Zeitraum 2030 - 2050 eintreten dürften, keinen einzigen guten Winter mehr. Auch die Anzahl mittlerer Winter würde reduziert, während die schlechten Winter einen markanten Anstieg zu verzeichnen hätten. Bei einer Klimaänderung werden bei einer notwendigen Schneehöhe von mindestens 30 cm je nach Klimaszenario 75% (ECHAM) bis 95% (CCC) der Winter schlecht sein. Skisport auf der Höhenlage von rund 1'000 m ist in Zukunft kaum mehr denkbar. Dies hat für Engelberg verschiedene Konsequenzen. Erstens wird im Tal kaum mehr Schnee liegen, das heisst, eine weisse Winteratmosphäre wird die Ausnahme sein. Zweitens werden die Dorfskilifte wegen

Schneemangels nur noch an sehr wenigen Tagen in Betrieb sein. Drittens werden die Talabfahrten nach Engelberg fast durchgehend geschlossen sein. Eine künstliche Beschneieung wäre infolge der Temperaturzunahme sehr schwierig und ein weisses Band der Skipiste kaum wünschenswert. Deshalb können, viertens, die Bahnen im unteren Teil des Skigebietes nur noch als reine Zubringeranlagen betrieben werden, und das Hauptskigebiet würde sich weiter nach oben verschieben. Aufgrund der Höhenlage der Engelberger Skigebiete, insbesondere des Skigebietes Titlis, wird aber mit den dargelegten Einschränkungen auch in Zukunft Skisport möglich sein.

#### 4.3.4.2 Schneesicherheit in den Schweizer Alpen

Um die Schneesicherheit im gesamten Alpenraum abschätzen zu können, haben wir den zukünftigen Schneehöhenverlauf nebst der Station Engelberg für vier weitere Wintersportorte auf unterschiedlicher Höhenlage und in verschiedenen Regionen modelliert (Tab. 4.3). Dies erlaubt uns, die zu erwartende Verschiebung der Höhengrenze der Schneesicherheit im Alpenraum abzuschätzen.

**Tab. 4.3:** Ausgewählte Stationen für die Schneemodellierungen

Daten: SMA

	<b>Lage</b>	<b>Höhe</b> (m ü.M.)	<b>Temperatur</b> Ø Winterhalbjahr (°C)	<b>Niederschlag</b> Σ Winterhalbjahr (mm)
<b>Engelberg</b>	Zentralschweiz (Tal)	1'020	0.7	624
<b>Disentis</b>	Graubünden (Tal)	1'190	1.0	445
<b>Montana</b>	Wallis (Südterrasse)	1'495	0.3	575
<b>Davos</b>	Graubünden (Tal)	1'590	-2.2	372
<b>Davos/Weissfluhjoch</b>	Graubünden (Bergstation)	2'540	-7.1	542

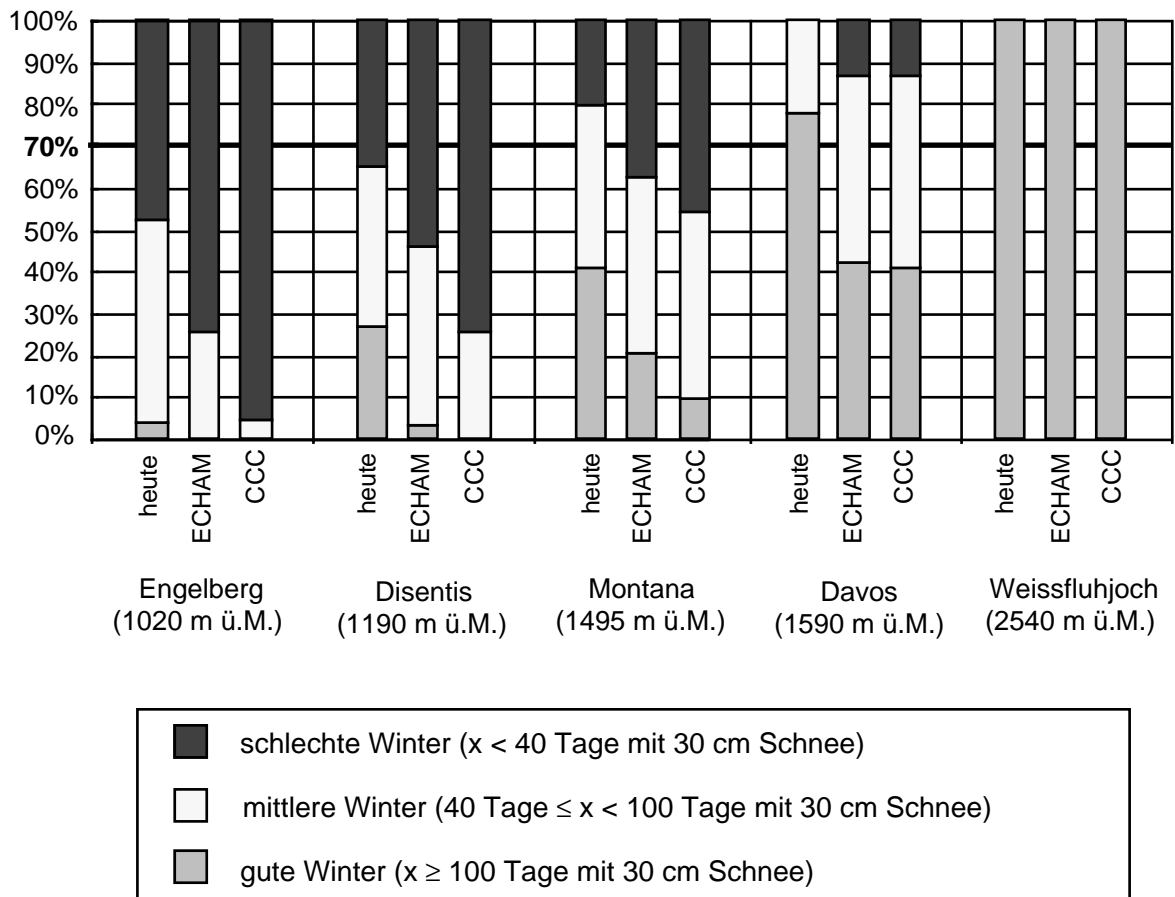
Wendet man die Definition von Schneesicherheit mit dem Schwellenwert von mindestens 30 cm Schnee auf die fünf Stationen an, so zeigt sich das folgende Bild (Abb. 4.7):

- Die Kriterien werden 'heute' nur gerade von den Stationen Davos-Dorf und Weissfluhjoch-Davos erreicht. Die drei anderen Stationen Engelberg, Disentis, aber auch Montana auf fast 1'500 m ü.M. können gemäss meinen Kriterien nicht als schneesicher bezeichnet werden, da in allen Stationen deutlich weniger als 70% der Winter gut sind.
- In Zukunft, das heisst im Zeitraum 2030 - 2050, erfüllt nur noch die Station Weissfluhjoch die Vorgaben. In Engelberg werden überhaupt keine, in Disentis und Montana je nach Szenario nur noch vereinzelt gute Winter auftreten.
- Das heute noch schneesichere Davos wird unter veränderten Klimabedingungen nicht mehr schneesicher sein. Sowohl unter ECHAM- als auch unter CCC-Bedingungen liegt der Anteil guter Winter bei weniger als 50%. Ersetzt man aber den Schwellenwert für die erforderliche Schneehöhe von 30 cm mit der tieferen Anforderung von 20 cm, wird die 70%-Marke nur sehr knapp verfehlt.

Die Resultate zeigen, dass sich bei einer Klimaänderung, wie sie für den Zeithorizont 2030 - 2050 zu erwarten ist, die Schneesituation in den tieferen und mittleren Lagen deutlich verschlechtern wird. Damit verbunden ist ein Ansteigen der Höhengrenze der Schneesicherheit. Die Schneemodellierungen verdeutlichen zudem, dass keine allgemeingültige Höhengrenze festgelegt werden kann, sondern die regionalen Eigenheiten berücksichtigt werden müssen. Dies zeigt ein Vergleich der beiden Stationen Davos und Montana, deren Höhenlagen sich lediglich um knapp 100 m unterscheiden, aber sehr unterschiedliche Schneeverhältnisse aufweisen.

**Abb. 4.7:** Modellierte Schneesicherheit ausgewählter Stationen der Alpen

Quelle: eigene Berechnungen



Bisher wurde die zukünftige Höhengrenze der Schneesicherheit auf der Basis der Arbeit von FÖHN (1990) auf 1'500 m ü.M. geschätzt. Unsere Modellierungen zeigen aber, dass diese Grenze höher liegen könnte. Bei einer Interpolation der Daten für die fehlende horizontale und vertikale Verteilung der Stationen würden die erforderlichen Schneesicherheitskriterien in Zukunft kaum unterhalb rund 1'600 - 2'000 m erfüllt werden. Die Aussagen bisheriger Studien, aber auch die Schlussfolgerungen in der Politik und Praxis müssen deshalb eher als zu optimistisch betrachtet werden.

#### 4.4 Höhengrenze der Schneesicherheit

In der vorliegenden Untersuchung wird die Schneesicherheit von Skigebieten aufgrund der tatsächlichen Schneeverhältnisse in den einzelnen Wintersportorten bestimmt. Obwohl die lokalen klimatischen Bedingungen die jeweiligen Schneeverhältnisse im Skigebiet stark beeinflussen, lässt sich dennoch mit gewisser Vorsicht eine Höhengrenze der Schneesicherheit für den Schweizerischen Alpenraum abschätzen. Gemäss FÖHN (1990, S. 45f.) liegt sie gegenwärtig auf 1'200 m ü.M. und wird inskünftig auf rund 1'500 m ü.M. steigen. Der Schweizerische Verband der Seilbahnen ('Seilbahnen Schweiz', SVS) übernimmt diese Angaben, setzt allerdings den gegenwärtigen Schwellenwert auf 1'300 m ü.M. Mit dieser 'Pufferzone' soll sichergestellt werden, dass der Skibetrieb im betreffenden Gebiet auch tatsächlich möglich ist. Für die zukünftige Höhengrenze der Schneesicherheit auf 1'500 m ü.M. wird allerdings auf eine 'Pufferzone' verzichtet.

Verschiedene Autoren nehmen die Höhenangaben von FÖHN beziehungsweise des SVS als Grundlage, um mit unterschiedlichen Verfahren schneesichere und nicht schneesichere Skigebiete zu unterscheiden (z.B. PFUND 1993 oder BRANDNER et al. 1995) beziehungsweise zu kartieren (MESSERLI 1990). Auch ABEGG (1996, S. 124ff.) überprüft anhand der Schwellenwerte auf 1'200 und 1'500 m ü.M. die insgesamt 230 Skigebiete und 122 Einzelanlagen der Schweiz auf ihre gegenwärtige und zukünftige Schneesicherheit. Mit derselben Methodik und einem aktualisierten Datensatz<sup>24</sup> wird nun ebenfalls der Anteil schneesicherer Skigebiete berechnet, wenn die Höhengrenze der Schneesicherheit wie in Kap. 4.3.4.2 dargelegt auf durchschnittlich rund 1'800 m ü.M. ansteigen wird (Tab. 4.4 und Tab. 4.5).

Bereits bei einem Anstieg der Höhengrenze der Schneesicherheit auf 1'500 m ü.M. wären in der Schweiz nur noch 63% der Skigebiete und 9% der Einzelanlagen schneesicher. Betroffen wären insbesondere die Voralpen, das Tessin und der Jura, während im Wallis und in Graubünden immer noch über 90% der Skigebiete schneesicher wären. Allerdings wären auch in diesen Regionen ca. 70% der Einzelanlagen nicht mehr schneesicher.

---

<sup>24</sup> SVS (1996) und HÜNERMANN (1999).

**Tab. 4.4:** Schneesicherheit der Skigebiete

Quelle: ABEGG (1996), ergänzt

Region	Anzahl Skigebiete	schneesicher 1'200 m ü.M.		schneesicher 1'500 m ü.M.		schneesicher 1'800 m ü.M.	
		abs.	%	abs.	%	abs.	%
<b>Jura</b>	15	4	27	1	7	0	0
<b>Alpes VD + FR</b>	19	16	84	7	37	4	21
<b>Wallis / Valais</b>	54	54	100	52	96	40	74
<b>Bern (ohne JU)</b>	35	30	86	20	57	12	34
<b>Zentralschweiz</b>	35	26	74	13	37	7	20
<b>Tessin</b>	8	8	100	3	38	2	25
<b>Ostschweiz</b>	18	11	61	6	33	3	17
<b>Graubünden</b>	46	46	100	42	91	33	72
<b>Schweiz</b>	230	195	85	144	63	101	44

**Tab. 4.5:** Schneesicherheit der Einzelanlagen

Quelle: ABEGG (1996), ergänzt

Region	Anzahl Skigebiete	schneesicher 1'200 m ü.M.		schneesicher 1'500 m ü.M.		schneesicher 1'800 m ü.M.	
		abs.	%	abs.	%	abs.	%
<b>Jura</b>	18	2	11	0	0	0	0
<b>Alpes VD + FR</b>	8	3	38	1	13	1	13
<b>Wallis / Valais</b>	15	15	100	4	27	1	7
<b>Bern (ohne JU)</b>	17	6	35	0	0	0	0
<b>Zentralschweiz</b>	18	7	39	1	6	0	0
<b>Tessin</b>	4	1	25	0	0	0	0
<b>Ostschweiz</b>	26	3	12	0	0	0	0
<b>Graubünden</b>	16	12	75	5	31	1	6
<b>Schweiz</b>	122	49	40	11	9	3	2

Ein Anstieg der Höhengrenze auf 1'800 m ü.M. verschlechtert die Bedingungen nochmals beträchtlich. Nur noch 44% der Skigebiete können als schneesicher bezeichnet werden. Auch im Wallis und in Graubünden wären

rund ein Viertel der Skigebiete nicht mehr schneesicher. Auch wenn die Kriterien der Schneesicherheit für Einzelanlagen eher zu restriktiv sind, zeigen die Resultate deutlich, dass in Zukunft der Grossteil der Einzelanlagen nicht mehr schneesicher ist, und zwar auch im Wallis und in Graubünden.

## 4.5 Fazit

Schneearme Winter sind kein neues Phänomen. Die natürliche Variabilität des Schnees führt zwangsläufig zu guten, schneereichen und schlechten, schneearmen Wintern. Gemäss realistischen Klimaszenarien dürfte eine Klimaänderung das Verhältnis guter zu schlechter Winter verschlechtern. Bisherige Studien haben die zukünftige Schneesicherheit im Alpenraum eher zu optimistisch eingeschätzt. Unsere Schneemodellierungen deuten darauf hin, dass in 30 bis 50 Jahren nur noch Skigebiete oberhalb rund 1'600 bis 2'000 m ü.M. schneesicher wären.

Ein solches Szenario hätte schwerwiegende Konsequenzen für den Skitourismus. Unter der Annahme, dass alle übrigen Faktoren konstant gehalten werden, würde sich der Skisport auf die hochgelegenen Skigebiete in der Kernzone der Alpen konzentrieren. Der Druck auf den Ausbau in den sensiblen Hochgebirgsräumen würde zunehmen. Bereits heute liegen im gesamten Alpenraum über 60 Ausbauprojekte vor, allerdings nicht ausschliesslich im Hochgebirge (CIPRA 1999). Die bereits heute wenig rentablen Skigebiete der tieferen Höhenlagen in den Voralpen, im Tessin und im Jura hätten kaum Überlebenschancen. Ihnen sind entweder aus topographischen Gründen die Hände gebunden, oder sie können die erwünschten Anlagen zur künstlichen Beschneigung nicht finanzieren. Sie müssen nach Alternativen suchen oder sich aus dem Skitourismus zurückziehen.

Ein solches 'Skiliftsterben' könnte sich langfristig auch für die höhergelegenen Skigebiete negativ auswirken, da der Skisport ganz allgemein an Bedeutung verlieren würde. Das Ausscheiden nahegelegener, familienfreundlicher und meist auch günstiger Skigebiete könnte die Motivation nehmen, überhaupt Skifahren zu erlernen. Dies würde den Trend verstärken, dass Skifahren immer stärker vom Volkssport zu einem Vergnügen ausgewählter Bevölkerungsgruppen wird. Die Seilbahnbranche hat diese Zeichen erkannt und erste Massnahmen vorgeschlagen. So sollen zum Beispiel finanzstarke Skigebiete in den Alpen gefährdete Skibetriebe nahe den Bevölkerungszent-



ren unter die Arme greifen. In Frankreich steht zu diesem Zweck eine Skiliftsteuer zur Diskussion.

Die Seilbahnbranche wird der skizzierten Entwicklung nicht tatenlos zusehen. Die Touristiker müssen jedoch berücksichtigen, dass die Touristen ebenfalls auf eine Klimaänderung reagieren werden. Im nächsten Kapitel wird deshalb die Frage aufgegriffen, wie Skifahrer die Thematik Klimaänderung und Tourismus wahrnehmen und wie sie auf eine Klimaänderung reagieren.