

PUBLIZIERBARER Endbericht Studien (gilt nicht für andere Projekttypen)

A) Projektdaten

Titel:	CC-Snow		
Programm:	ACRP		
Koordinator/ Projekteinreicher:	Prof. Dr. Ulrich Strasser		
Kontaktperson-Name:	Prof. Dr. Ulrich Strasser		
Kontaktperson – Adresse:	Institut für Geographie und Raumforschung Heinrichstr. 36 8010 Graz		
Kontaktperson – Telefon:	0316 380 8828		
Kontaktperson E-Mail:	ulrich.strasser@uni-graz.at		
Projekt- und Kooperationspartner (inkl. Bundesland):	(P1) Dr. Andreas Gobiet, Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel und Institut für Geophysik, Astrophysik und Meteorologie, Universität Graz (Steiermark) (P2) Prof. Dr. Johann Stötter, Institut für Geographie, Universität Innsbruck (Tirol) (P3) Dr. Hannes Kleindienst, GRID-IT, Innsbruck (Tirol)		
Projektwebsite:	www.cc-snow.at		
Schlagwörter:	Schneedecke, Szenario, Klimawandel, Skitourismus, Schladming, Kitzbühel, Tirol Steiermark, Modellierung		
Projektgesamtkosten:	362.934 €		
Fördersumme:	307.794 €		
Klimafonds-Nr:	A963645		
Projektstart & Ende	1.1.2010 - 31.12.2011		



B) Projektübersicht

1 Executive Summary

Das Projekt CC-Snow verwendet die Ausgaben von Klimamodellsimulationen, um den Effekt des Klimawandels auf die zukünftigen Schneeverhältnisse in den Österreichischen Alpen abzuschätzen. Wir verwenden dazu vier verschiedene regionale Realisierungen des moderaten Emissions-Szenarios A1B, welche mit einer statistischen Methode auf die Punkt-Skala von Klimastationen in Tirol und der Steiermark skaliert werden. Für die Skigebiete Kitzbühel und Schladming verwenden wir ein detailliertes, physikalisch basiertes Schneemodell zur Berechnung von Indikatoren, welche die zukünftigen Schneebedingungen für den Skitourismus zusammenfassend beschreiben. Auf der regionalen Skala der Bundesländer kommt dazu ein einfacheres Konzeptmodell zum Einsatz. Die Unterschiede in den Ergebnissen aus den vier Klimarealisierungen sind beträchtlich, zeigen aber konsistent für A1B-Bedingungen einen deutlichen Trend zur Abnahme der winterlichen Schneebedeckung bis in die höchsten Gipfelbereiche. Nur dort kommt es durch vermehrte Niederschläge zum Teil auch zu einer Zunahme.

2 Hintergrund und Zielsetzung

CC-Snow ist ein Projekt mit dem Ziel, die Kernkompetenzen zur Analyse der Folgen des Klimawandels auf die natürlichen Schneebedingungen in den Österreichischen Alpen auf lokaler und regionaler Skala zusammenzubringen. Dazu werden detaillierte, flächenverteilte Modellierungen von zukünftig möglichen Klima- (A1B) und Schneeverhältnissen kombiniert, Indikatoren zur wirtschaftlichen Inwertsetzung der Ergebnisse entwickelt (für den Sektor Skitourismus), und die Ergebnisse sowohl der wissenschaftlichen Gemeinschaft als auch der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Grundsätzlich gilt, dass Gebirgsräume besonders sensibel gegenüber dem Klimawandel sind; sie werden daher auch als "early warning systems" für den Klimawandel bezeichnet. Um die Effekte des Klimawandels abschätzen zu können, haben sich hochaufgelöste Modellrechnungen schon in vielen Anwendungen bewährt – im Hochgebirge mit seiner komplexen Topographie stellen sowohl die modellierten Klimaszenarien (wegen den extremen Gradienten), als auch die Modellierung der Schneedecke (wegen der lateralen Prozesse) nach wie vor eine wissenschaftliche Herausforderung dar.

Heutige regionale Klimamodelle sind aus Gründen der Rechenressourcen auf relativ grobe Auflösungen von ca. 50 km bis max. 10 km Gitterweite begrenzt. Da detaillierte Schneemodelle höher aufgelöste Daten benötigen, und auch systematische Fehler in den Klimamodellausgaben korrigiert werden müssen, muss eine geeignete Maßstabs- und Biaskorrektur der Daten durchgeführt werden. Für die Modellierung der Schneedecke gilt, dass die detaillierten, physikalisch basierten Modelle zwar generell übertragbar in Raum und Zeit sind (da sie nicht kalibriert werden müssen), aber wegen der benötigten Eingabedaten und Rechenzeit nur auf kleinere Gebiete bzw. für relativ kurze Zeiträume angewendet werden können. Die einfacheren Konzeptmodelle sind schnell und brauchen nur wenige Eingabedaten, sie produzieren aber einen gewissen Fehler in den Ergebnissen durch die notwendige Kalibration für einen bestimmten Ort bzw. Zeitraum. In CC-Snow werden diese beiden Modelltypen zum Vorteil kombiniert. Dazu werden sowohl Stationsdaten für historische Zeiträume, als auch Szenariodaten für zukünftige Bedingungen (bis 2050) als Eingabedaten für die Schneemodellierung aufbereitet. Auf regionaler Ebene wird damit das Konzeptmodell SNOWREG angetrieben (Bundesländer Tirol und Steiermark), während lokal das Prozessmodell AMUNDSEN eingesetzt wird (Skigebiete Kitzbühel und Schladming). Die räumliche Auflösung



der Modellierung beträgt 250 m bzw. 50 m. Schon zu Beginn des Projektes wurden die Indikatoren vereinbart, welche mitgerechnet werden und eine für die Skitourismusbranche geeignete Auswertung der Schneemodellergebnisse ermöglichen sollen. Extra betrachtet werden die zukünftigen Bedingungen zur Produktion von technischem Schnee.

Die dem Projekt CC-Snow zugrundeliegenden Klimaszenarien stammen aus dem ENSEMBLES-Projekt (van der Linden, P. und Mitchell, J.F.B., 2009), haben eine räumliche Auflösung von 25 km und basieren auf dem A1B Emissions-Szenario. Die Projektpartner haben sich auf vier Realisierungen geeinigt, welche für die beiden Untersuchungsgebiete einen repräsentativen Rahmen zukünftiger Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse abbilden. Für jede dieser Realisierungen haben wir drei verschiedene Modell-Läufe analysiert: historisches Wetter zur Validierung der Schneemodelle liefern die sogenannte "Hindcast-Läufe" (1961-2000), welche durch meteorologische Re-Analysen (ERA-40) angetrieben werden. Eine Kontrollsimulation (1971-2000) sowie die Szenariosimulation (2021-2050) schließlich dienen als Referenz- bzw. Szenarioklima für die Schneemodellierungen. Die regionalen Klimamodelle wurden hier von globalen Zirkulationsmodellen unter Verwendung beobachteter (Vergangenheit) bzw. angenommener Konzentrationen von klimawirksamen Gasen in der Atmosphäre (Zukunft) angetrieben. Die Veränderungen des Klimas sowie der Schneeverhältnisse werden durch Vergleich der Schneemodellierungen für die Kontrollsimulation (1971–2000) mit denen der Szenariosimulation (2021-2050) bestimmt.

Die simulierten Klimadaten wurden unter Verwendung einer empirisch-statistischen Methode (quantile mapping) und Stationsdaten der ZentralAnstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) regionalisiert und auf Tagesbasis fehlerkorrigiert. Für die lokale Schneemodellierung wurden die Tageswerte unter Verwendung des Tagesgangs in den Klimasimulationen auf 3-stündliche Werte disaggregiert. Die Interpolation für die Flächen der Schneemodellierung erfolgt erst in den Vorprozessierungsschritten der Schneemodellierung auf Basis von Abhängigkeitsbeziehungen der Größen mit der Topographie. Zum Vergleich wurde zusätzlich ein kriging-Verfahren getestet.

Im Rahmen der Arbeiten im Projekt wurden zwei Schneemodelle weiterentwickelt: AMUNDSEN wurde um einen flexiblen Mechanismus zur Behandlung unterschiedliche Zeitschritte erweitert, sowie um die Ausgabe der Indikatoren und der Feuchttemperatur (welche wichtig ist für Effizienz der Produktion technischen Schnees). SNOWREG wurde in seiner Performanz verbessert, um eine graphische Benutzeroberfläche erweitert und mit einer Datenbank kombiniert. Das Modell wurde für die Testgebiete Tirol und Steiermark spezifisch unter Verwendung von Stations- und Satellitendaten trainiert. Die Validierung der Schneemodelle ergibt, dass beide Modelle für den in CC-Snow vorgesehenen Zweck geeignet sind und verwendet werden können. Auf eine spezielle Kalibration des regionalen Modells durch Assimilation von Ausgaben des lokalen Modells konnte verzichtet werden, da die beiden Modelle sehr ähnliche Ausgaben für die Szenarioperiode produzieren.

Die Analyse der Modellergebnisse ergibt erhebliche Veränderungen in den Schneebedingungen für die Zukunftsperiode auf beiden Skalen. Am stärksten wirken sich die veränderten Klimabedingungen in höheren Regionen (etwa 1500 m – 2500 m) aus. Hier beträgt die Abnahme der Skisaisonlänge bis zu 11 Wochen (je nach Realisierung und Region).

Sowohl in Tirol, als auch in der Steiermark muss in Zukunft mit einer erheblichen Reduktion der winterlichen Naturschneedecke und damit der möglichen (natürlichen) Skisaisonlänge gerechnet werden. Die Tatsache, dass Wintersport in Österreich einen erheblichen Wirtschaftsfaktor darstellt, legt nahe, sich verstärkt mit Anpassungsstrategien wie der Produktion von technischem Schnee auseinanderzusetzen. Solche Untersuchungen können auf



die Ergebnisse von CC-Snow zurückgreifen. In einem weiteren ACRP-Projekt (CC-Snow II) werden derzeit verschiedene Strategien der Produktion technischen Schnees in gekoppelten Modellrechnungen getestet, inkl. des damit verbundenen Verbrauchs von Wasser und Energie, sowie der ökonomischen und touristischen Auswirkungen.



3 Projektinhalt und Ergebnis

Um die Effekte des Klimawandels im alpinen Raum zu untersuchen, haben sich Szenariosimulationen schon in vielen Anwendungen als geeignete Methode bewährt (Mauser and Ludwig 2002), insbesondere auch zur Abschätzung zukünftiger Schneebedingungen (Liston 2004). Im Gebirge mit seiner komplexen Topographie ist jedoch die Bereitstellung regionaler Klimaszenarien und auch die Repräsentation der Prozesse Akkumulation, Umverteilung und Ablation der Schneedecke in den Modellsimulationen schwierig (Blöschl 1999, Cline et al. 1998). Heutige state-of-the-art Klimamodellierungen auf regionaler Skala haben üblicherweise Auflösungen von 50 km bis 10 km (z.B. Christensen and Christensen 2007, Loibl et al. 2007, Hewitt and Griggs 2004). Letztere stellen die jüngsten Simulationen dar, deren Ergebnisse mit einer zeitlichen Auflösung von einigen Stunden gespeichert werden. Modellrechnungen mit noch höherer räumlicher Auflösung sind noch im experimentellen Stadium, und wegen dem Bedarf an Rechnerkapazität nur für kurze Zeiträume durchführbar.

Eine in der Wissenschaft vieldiskutierte Frage ist, welcher Typ Schneedeckenmodell sich für Szenariomodellierungen im Hochgebirge am besten eignet (Klemes 1990, WMO 1986). Generell können deterministische (prozess-orientierte) Schneemodelle, welche die Physik aller relevanten Prozesse an der Schneeoberfläche beschreiben, eingesetzt werden; diese sind übertragbar in Raum und Zeit, aber wegen der Anforderungen an Eingabedaten und die Rechnerhardware werden sie meist nur auf kleiner Skala oder für kurze Zeiträume eingesetzt. Oft sind diese Modelle für ganz bestimmte Fallstudien maßgeschnitten. Die einfacheren Konzeptmodelle eignen sich jedoch für regionale Modellierungen; sie sind schnell und benötigen nur wenige Eingabedaten, aber die Ergebnisse sind durch die notwendige Kalibrierung der Parameter mit einem Bias zum Ort und der Zeit der Kalibration versehen. Beide Modelltypen haben für regionale Untersuchungen also ihr jeweiliges Defizit. Wenn die Schneemodelle mit Klimamodellausgaben angetrieben werden sollen, muss zusätzlich der Skalenübergang beim Prozessieren der Daten gemeistert werden, wodurch eine weitere Quelle von Unsicherheiten entsteht.

Im Projekt CC-Snow wird versucht, eine optimale Methodenkombination zu entwickeln und die natürlichen Schneebedingungen in einer A1B-Zukunft mit der heute besten Modellanwendung zu simulieren. Dazu wird eine state-of-the-art Prozessierung der Klimaszenario-Daten vorgenommen, die Schneedeckenentwicklung auf lokaler Skala prozess-orientiert modelliert, und auf regionaler Skala ein Konzeptmodell angewandt. Die Ergebnisse der Schneemodellierungen werden mit Indikatoren beschrieben, welche zu Beginn des Projektes gemeinsam festgelegt wurden und eine Verwendung der Resultate in der österreichischen Skitourismuswirtschaft erleichtern.

Das physikalisch basierte Schneemodell AMUNDSEN wird dazu für eine Prozessmodellierung in den Testgebieten Kitzbühel und Schladming angewandt. AMUNDSEN besteht aus einer physikalischen Beschreibung der relevanten Energie- und Masseaustauschprozesse an der Schneeoberfläche und ist dadurch übertragbar in Raum und v.a. auch Zeit. Mit diesem Modell wird detailliert die zukünftige (A1B) Schneedeckenentwicklung, sowie die abgeleiteten Indikatoren, für die beiden Skigebietsdestinationen beschrieben. Auf Skala der Bundesländer wird dazu das Konzeptmodell SNOWREG verwandt. Um die Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der Kalibrierung der Parameter zu minimieren, wird SNOWREG durch Assimilation von kontinuierlichen Zeitreihen von Stationsmessungen (der Schneehöhe) sowie aus Satellitendaten abgeleiteter Schneebedeckung trainiert.



Tabelle 1: Die CC-Snow Indikatoren zur Beschreibung zukünftiger Klima- und Schneebedingungen für die österreichische Skitourismuswirtschaft.

Indikator	Quantifizierung	Ergebnistyp	
Ski-opening Naturschnee I	120 mm swe nach dem 1. Nov. für mindestens 5 aufeinanderfolgende Tage	Datum (doy)	
Ski-opening Naturschnee II	30 cm Schneehöhe nach dem 1. Nov. für mindestens 5 aufeinanderfolgende Tage	Datum (doy)	
Stunden technischer Schneeproduktion	Feuchttemperatur < Schwellenwert	Zahl der Stunden	
Ski-opening technischer Schnee	120 mm swe nach dem 1. Nov. für mindestens 5 aufeinanderfolgende Tage	Datum (doy)	
Ski-closing Naturschnee	Dauer vom ski-opening mit swe < 80 mm für mindestens 10 aufeinanderfolgende Tage	Datum (doy)	
Ski-closing technischer Schnee	Dauer vom ski-opening mit swe < 80 mm für mindestens 10 aufeinanderfolgende Tage	Datum (doy)	
Weisse Winterlandschaft	> 15 mm swe zwischen November und April	Zahl der Tage	
Saisonlänge Naturschnee	Closing Tag minus opening Tag	Zahl der Tage	
Saisonlänge technischer Schnee	Closing Tag minus opening Tag	Zahl der Tage	
Skibetrieb Naturschnee	> 120 mm swe zwischen opening und closing Tag	Zahl der Tage	
Skibetrieb technischer Schnee	> 120 mm swe zwischen opening und closing Tag	Zahl der Tage	
Starkschneefall 3 Tage	3 Tage Starkschneefall > 200 mm swe	Zahl der Ereignisse	
Starkschneefall 1 Tag	1 Tag Starkschneefall > 100 mm swe	Zahl der Ereignisse	

Die Ergebnisse des Projektes CC-Snow bestehen also aus den regionalen Klima- und Schneedeckenprojektionen für die Gebiete von Tirol und der Steiermark, hochaufgelöste Detailuntersuchungen zur Schneedecke in den beiden Testgebieten, sowie den Indikatoren. Diese Ergebnisse können als Basis für weitere wissenschaftliche Studien im Bereich des Skitourismus und der Ökonomie des Skibetriebes verwendet werden, z.B. zur Abschätzung von Möglichkeiten und Anforderungen technischer Schneeproduktion.



3.1 Klimaänderungssignal

In Tabelle 2 ist das Klimaänderungssignal für die vier verwendeten A1B-Realisierungen im Detail für die zum Herunterskalieren herangezogenen Klimastationen in der Region Schladming dargestellt.

Tabelle 2: Klimawandelsignal (2021-2050 vs 1971-2000) für Schladming im Winter (Nov.-Apr.). Die fetten Zahlen stehen für statistische Signifikanz (5%) des Trends.

Stations- Name	Krippen- stein	Schönberg- alm	Bad Mitterndorf	Ramsau a.D.	Gröbming	Rohrmoos	Kleinsölk		
Stations- Nummer	9620	9630	9700	12711	12810	12700	12800		
	Relative Feuchte [%]								
ICTP	0,11	0,24	0,16	0,2	0,14	0,19	0,19		
METNO	-2,46	-1,69	-1,08	-1,4	-1,21	-1,46	-1,36		
C4I	2,35	2,13	1,43	1,64	1,09	1,84	1,43		
SMHI	-0,22	0,08	0,1	0,05	0,07	0,16	0,14		
	Niederschlag [%]								
ICTP	-8,04	-7,62	-8,35	-11,09	-10,33	-10,01	-9,75		
METNO	6,15	5,34	12,04	11,91	10,58	10,83	7,63		
C4I	7,99	8,07	6,58	11,67	16,49	15,48	13		
SMHI	4,18	4,38	7,58	9,89	9,87	7,47	7,63		
			Luftdrug	ck [hPa]					
ICTP	NA	NA	1,23	0,88	0,95	NA	NA		
METNO	NA	NA	2,76	1,91	2,16	NA	NA		
C4I	NA	NA	1,89	1,33	1,51	NA	NA		
SMHI	NA	NA	1,79	1,56	1,76	NA	NA		
			Globalstrahl	ung [W/m²]					
ICTP	3,12	NA	-1,45	0,15	-1,1	NA	NA		
METNO	-3.19	NA	-1.86	-2,5	-2	NA	NA		
C4I	-10,95	NA	-9,37	-10,08	-9,9	NA	NA		
SMHI	-1,85	NA	-1,91	-2	-1,53	NA	NA		
	,		,-		,				
			Tempera	ntur [°C]					
ICTP	1,19	1,08	0,95	1,06	0,91	0,99	0,92		
METNO	2,09	1,87	1,69	1,81	1,67	1,74	1,68		
C4I	3,92	3,56	3,06	3,33	3,01	3,2	3,09		
SMHI	1,69	1,55	1,36	1,43	1,29	1,34	1,3		
Windgeschwindigkeit [m/s]									
ICTP	-0,24	NA	-0,06	-0,06	-0,05	-0,05	-0,09		
METNO	0,12	NA	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05		
C4I	-0,06	NA	-0,03	-0,04	-0,01	0	-0,05		
SMHI	-0,06	NA	-0,02	-0,02	-0,03	-0,03	-0,05		



Das Änderungssignal ist als Differenz des jeweiligen Parameters für die Zukunftsperiode (2021-2050) zu einer Referenzperiode in der Vergangenheit (1971-2000) angegeben. Wie erwartet ist der Anstieg der Temperatur signifikant für alle Stationen und auch in allen Modellkombinationen repräsentiert. Die Veränderung im Niederschlagsverhalten jedoch (sowohl Anstieg als auch Reduktion) sind nur teilweise signifikant. Die relative Feuchte zeigt einen Anstieg in der C4I-Modellierung, während bei METNO zumindest für zwei Stationen ein Rückgang resultiert (für Details zu den Realisierungen siehe Kapitel 4.1). Die Globalstrahlung geht in allen vier Simulationen zurück, besonders stark bei C4I. Grund hierfür dürfte die Niederschlagsentwicklung sein, die mit entsprechender Bewölkungszunahme einhergeht. Statistisch robust ist insgesamt nur der Temperaturanstieg, während sich für die anderen Parameter kein eindeutiges Klimawandelsignal abzeichnet.

Die verschiedenen Schritte der Prozessierung der Klimadaten, wie sie in CC-Snow durchgeführt werden, führen zu einer Modifikation des Klimaänderungssignals, welches durch Vergleich der Szenario- mit der historischen Periode sichtbar wird. Diese Modifikation muss bei der Interpretation der Ergebnisse auf ihrer jeweiligen räumlichen Skala mitgedacht werden.

Die Prozessierungsschritte bestehen aus

- Der Auswahl von Realisierungen aus der ENSEMBLES-Datenbank (Mittelung derjenigen Klimamodell-Rasterzellen, welche in der berücksichtigten Fläche der Bundesländer liegen)
- Downscaling und Bias-Korrektur der ausgewählten Realisierungen unter Verwendung des ZAMG Stationsnetzwerkes (Beeinflussung durch die Messungen einzelner Stationen)
- Räumliche Interpolation vom Ort der ZAMG-Stationen auf das jeweilige Raster der Schneemodelle, durchgeführt durch die meteorologischen Präprozessoren in den Schneemodellen, sowie anschließender räumlicher Mittelung der Werte über alle Rasterzellen im Gebiet

Tabelle 3 zeigt das Klimaänderungssignal (Temperatur (°C) und Niederschlag (%)) vor und nach den genannten Prozessierungsschritten für das Schladminger Testgebiet.

Tabelle 3: Klimaänderungssignal (2021-2050 vs 1971-2000) vor und nach den CC-Snow Datenprozessierschritten für die vier A1B Realisierungen für das Schladminger Testgebiet (Temperaturänderung in °C gefolgt von der Niederschlagsänderung in %).

	Regionales Klimamodell (Mittel der Gridwerte, deren Zentrum innerhalb des Gebiets liegt)	AMUNDSEN (Mittel der Schneemodellrasterwerte im selben Gebiet)
METNO	+ 1.7 °C, + 4 %	+ 1.8 °C, + 9 %
SMHI	+ 1.1 °C, + 2 %	+ 1.4 °C, + 7 %
ICTP	+ 1 °C, - 4.5 %	+ 0.9 °C, - 10 %
C4I	+ 2.6 °C, + 6.5 %	+ 3.3 °C, + 8 %

Im Folgenden werden die Szenariosimulationen vorgestellt, welche mit den beiden Schneemodellen unter Verwendung der meteorologischen Eingabedaten berechnet wurden. Im Appendix des wissenschaftlichen Berichtes (auf Englisch, zu finden unter: www.cc-snow.at)



sind die zukünftig möglichen Klima- und Schneedeckenbedingungen für alle Realisierungen (METNO, ICTP, C4I, SMHI) und für beide Regionen/Skalen (Tirol/Steiermark sowie Kitzbühel/Schladming) enthalten. Hier wird beispielhaft nur ein (typisches) Ergebnis vorgestellt, der METNO-Modelllauf für die Steiermark bzw. die Region Schladming. Das hier verwendete regionale Klimamodell ist HIRHAM, der globale Antrieb HadCM3Q0. Diese Kombination produziert einen mittleren Anstieg von Temperatur und Niederschlag in den Wintermonaten.

Abb. 1 (links) zeigt den mittleren Winterniederschlag (November bis April) für die Referenzperiode 1970/71-1999/00 im Testgebiet Schladming. Das höhenabhängige Remapping der downgescalten Klimamodell-Niederschlagsdaten von den Orten der ZAMG-Klimastationen auf das Raster des lokalen Schneemodells AMUNDSEN (50 m x 50 m) führt zu vergleichsweise geringen Niederschlagswerten in den Tallagen (< 400 mm), während in den Bergregionen der Schladminger Tauern und des Dachsteinmassivs deutlich höhere Werte resultieren (> 700 mm). In Abb. 1 (rechts) ist ein Direktvergleich (Differenz) der Winterniederschläge zwischen den mittleren Verhältnissen 1970/71-1999/00 und der Szenarioperiode 2020/21-2049/50 dargestellt. Die Zunahme beträgt zwischen 2 % und 12 %, wobei die absolute Zunahme in den Gipfellagen aber höher ausfällt als in den Talbereichen (hier jedoch durch die Höhenabhängigkeit der Niederschläge nicht als Relativzunahme sichtbar).

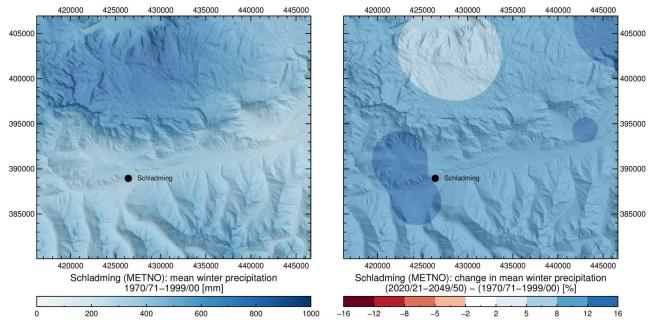


Abb. 1: Mittlere Winterniederschläge im Testgebiet Schladming für die Referenzperiode 1970/71-1999/00 und Veränderungen 2020/21-2049/50 relativ zur Referenzperiode entsprechend der skalierten METNO-Klimatologie (jeweils Monate November-April).

Abb. 2 (links) zeigt die mittlere Wintertemperatur für die Referenzperiode im Testgebiet Schladming. Der Skalierungs-Algorithmus in AMUNDSEN reproduziert die natürliche Abnahme der Temperatur mit zunehmender Höhe, was in Temperaturen von über 0 °C in den Talbereichen, und zwischen 0 °C und -6 °C in den höheren Lagen führt. In den höchsten Gipfelregionen des Dachsteinmassivs kommen noch niedrigere Temperaturen vor. Die Veränderungen der Temperaturverhältnisse zwischen der Referenz- und der Szenarioperiode



(Differenz der jeweiligen Bilder) sind in Abb. 2 (rechts) dargestellt: die Temperaturzunahme ist für praktisch das gesamte Gebiet im Bereich von $1.5~^{\circ}\text{C} - 2.0~^{\circ}\text{C}$.

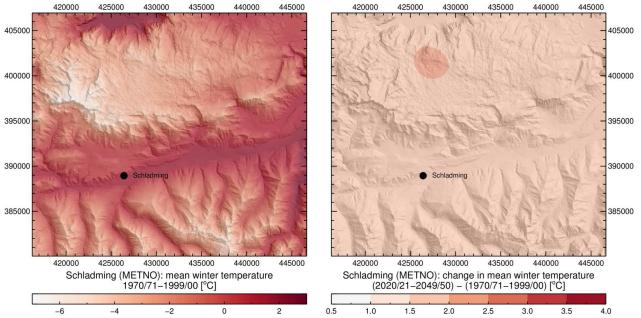


Abb. 2: Mittlere Wintertemperaturen im Testgebiet Schladming für die Referenzperiode 1970/71-1999/00 und Veränderungen 2020/21–2049/50 im Vergleich zur Referenzperiode entsprechend der skalierten METNO-Klimatologie (jeweils Monate November–April).

Ein Überblick über die modellierten Temperaturverhältnisse auf regionaler Skala (Steiermark) ist in Abb. 3 dargestellt; Abb. 4 zeigt die entsprechenden Niederschläge und ihre Veränderungen.

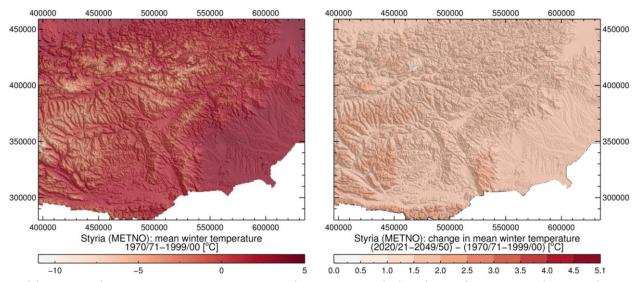


Abb. 3: Mittlere Wintertemperaturen in der Steiermark für die Referenzperiode 1970/71-1999/00 und Veränderungen 2020/21–2049/50 im Vergleich zur Referenzperiode entsprechend der skalierten METNO-Klimatologie (jeweils Monate November–April).



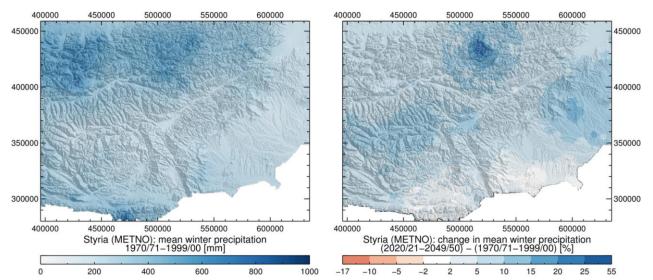


Abb. 4: Mittlere Winterniederschläge in der Steiermark für die Referenzperiode 1970/71-1999/00 und Veränderungen 2020/21–2049/50 relativ zur Referenzperiode entsprechend der skalierten METNO-Klimatologie (jeweils Monate November-April).

Wiederum sind die Höhengradienten von Temperatur und Niederschlag realistisch reproduziert, und ein Vergleich mit den AMUNDSEN-Ergebnissen auf lokaler Skala (siehe Abb. 1 und 2) ergibt weitgehende Übereinstimmung.

3.2 Indikator Skisaisonlänge

Abb. 5 (links) zeigt den Indikator "Länge der Skisaison" als Mittelwert über die Referenzperiode 1970/71-1999/00.

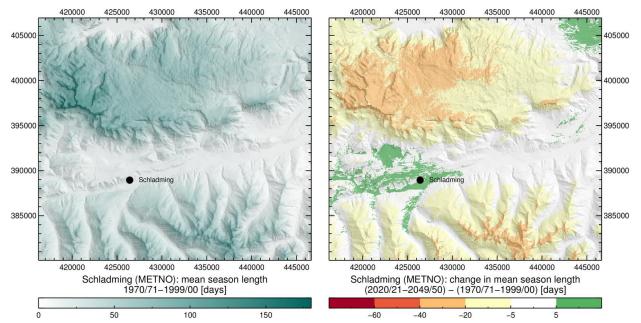


Abb. 5: Mittlere Skisaisonlänge im Testgebiet Schladming für die Referenzperiode 1970/71-1999/00 und Veränderungen 2020/21-2049/50 im Vergleich zur Referenzperiode berechnet auf Basis der skalierten METNO-Klimatologie (jeweils Monate November-April).



Die Saisonlänge wird als Differenz zwischen ski-opening Tag und ski-closing Tag bestimmt und berücksichtigt (hier noch) keine Produktion von technischem Schnee.

Die Kombination aus ansteigender Temperatur und zunehmendem Niederschlag führt zu einer geringfügigen Verlängerung der möglichen Saison in Teilbereichen der Täler und niedrigeren Gebieten (Abb. 3 rechts). Die stärksten Abnahmen der Saisonlänge findet man in den höheren Bereichen des Dachsteinmassivs (> 20 Tage).

Ähnlich wie AMUNDSEN modelliert auch SNOWREG, von täglichen Temperatur- und Niederschlagswerten aus dem METNO-Lauf angetrieben, eine starke Abnahme der Saisonlänge (Abb. 6). Das räumliche Bild dieses Indikators auf regionaler Skala zeigt ein ähnliches Muster wie auf der lokalen Skala: der Rückgang der Saisonlänge ist in den höheren Lagen am stärksten (> 20 Tage).

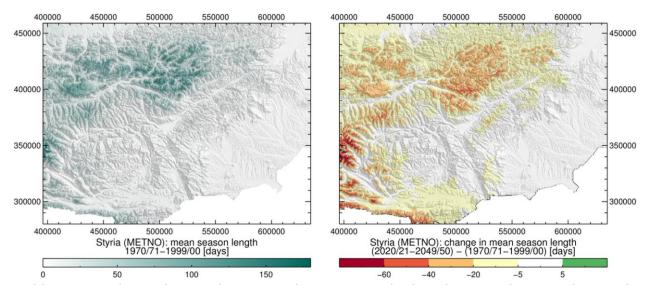


Abb. 6: Mittlere Skisaisonlänge in der Steiermark für die 1970/71-1999/00 und Veränderungen 2020/21–2049/50 im Vergleich zur Referenzperiode berechnet auf Basis der skalierten METNO-Klimatologie (jeweils Monate November-April).

Der Vergleich der mit den beiden Schneemodellen und der METNO-Klimatologie erzielten Muster zeigt, dass sie beide sehr ähnliche Rückgänge der Skisaisonlänge modellieren mit geringfügig stärkerem Rückgang in den SNOWREG-Ergebnissen. Die Modellierungen ergeben, dass die stärksten Abnahmen in den höher gelegenen Regionen erwartet werden müssen. Die maximale Abnahme des Indikators Skisaisonlänge ist durch die Skisaisonlänge in der Referenzperiode limitiert.

Die Tendenz des höheren Rückgangs der Skisaisonlänge in höher gelegenen Bereichen spiegelt sich in allen A1B Szenario-Realisierungen wieder, auch für beide Regionen. Dieser Rückgang gilt für Höhenbereiche bis zwischen 2000 m und 2500 m (Abb. 7). Darüber fällt die Zunahme des Winterniederschlags mit höhenbedingt niedrigen Temperaturen zusammen, so dass es zu einem Kompensationseffekt kommt und der Indikator geringere Rückgänge, und im Falle von SNOWREG auf der regionalen Skala teilweise sogar eine Zunahme der Skisaisonlänge anzeigt. Dieser Effekt ist jedoch auf nur extrem kleine räumliche Teile der Untersuchungsgebiete beschränkt (wenige Pixel).



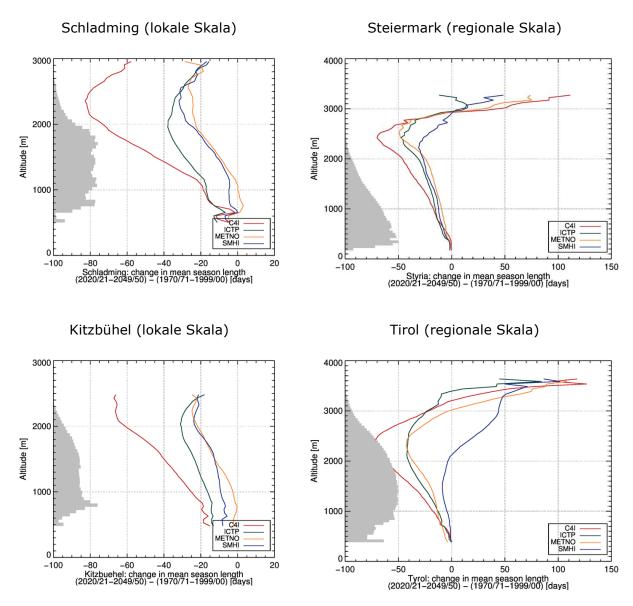


Abb. 7: Höhenverteilung der relativen Veränderung der mittleren Skisaisonlänge (November-April) auf lokaler Skala (Schladming und Kitzbühel, AMUNDSEN, links), sowie regional für die Bundesländer Steiermark und Tirol (SNOWREG, rechts). Die grauen Flächen stellen das Histogramm der Höhenverteilung in den Regionen dar (jeweils an der linken Ordinate).

Die geringsten Rückgänge der Saisonlänge werden auf Basis der SMHI – Realsierung erzielt, in welcher eine moderate Zunahme der Wintertemperatur mit zunehmendem Winterniederschlag einhergeht.

Auf der anderen Seite repräsentiert die C4I – Realisierung den mit Abstand stärksten Temperaturanstieg (> 3 °C in den Testsites Kitzbühel und Schladming), welcher trotz des zunehmenden Niederschlags zu einem Rückgang der Saisonlänge um 50 – 70 Tage führt, je nach Skala und verwendetem Modell. Die räumlichen Unterschiede zwischen den Gebieten auf beiden Skalen sind relativ gering und überwiegend auf die unterschiedlichen Höhenlagen zurückzuführen.



Zusammenfassend kann man die Ergebnisse aus CC-Snow für den Indikator Skisaisonlänge folgendermaßen formulieren:

Kitzbühel:

- METNO (+ 1.7 °C, + 10 % P)
 Abnahme der Skisaisonlänge, am stärksten in den Hochlagen (max. 3.5 Wochen)
- SMHI (+ 1.3 °C, + 4 % P) Abnahme der Skisaisonlänge, am stärksten in den Hochlagen (max. 3.5 Wochen)
- ICTP (+ 0.9 °C, 12 % P)
 Abnahme der Skisaisonlänge, am stärksten in den Hochlagen (max. 4 Wochen)
- C4I (+ 3.1 °C, + 10 % P)
 Abnahme der Skisaisonlänge, am stärksten in den Hochlagen (max. 9.5 Wochen)

Schladming:

- METNO (+ 1.8 °C, + 9 % P)
 Abnahme der Skisaisonlänge, am stärksten in den Hochlagen (max. 4 Wochen)
- SMHI (+ 1.4 °C, + 7 % P)
 Abnahme der Skisaisonlänge, am stärksten in den Hochlagen (max. 4 Wochen)
- ICTP (+ 0.9 °C, 10 % P)
 Abnahme der Skisaisonlänge, am stärksten in den Hochlagen (max. 5.5 Wochen)
- C4I (+ 3.3 °C, + 8 % P)
 Abnahme der Skisaisonlänge, am stärksten in den Hochlagen (max. 11.5 Wochen)

Tirol:

- METNO (+ 1.77 °C, + 9.6 % P) Abnahme der Skisaisonlänge, am stärksten in den Hochlagen (max. 8 Wochen)
- SMHI (+ 1.16 °C, + 6.4 % P)
 Abnahme der Skisaisonlänge, am stärksten in den Hochlagen (max. 6 Wochen)
- ICTP (+ 1.0 °C,-10.5 % P)
 Abnahme der Skisaisonlänge, am stärksten in den Hochlagen (max. 8 Wochen)
- C4I (+ 2.9 °C, + 16 % P)
 Abnahme der Skisaisonlänge, am stärksten in den Hochlagen (max. 13 Wochen)

Steiermark:

- METNO (+ 1.85 °C, + 8.5 % P)
 Abnahme der Skisaisonlänge, am stärksten in den Hochlagen (max. 10.5 Wochen)
- SMHI (+ 1.3 °C, + 9.3 % P)
 Abnahme der Skisaisonlänge, am stärksten in den Hochlagen (max. 8 Wochen)
- ICTP (+ 1.0 °C,-9.5 % P)
 Abnahme der Skisaisonlänge, am stärksten in den Hochlagen (max. 9.5 Wochen)
- C4I (+ 3.0 °C, + 14 % P) Abnahme der Skisaisonlänge, am stärksten in den Hochlagen (max. 13 Wochen)



3.3 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Im Projekt CC-Snow wurden die technischen Voraussetzungen geschaffen, ein Set von A1B Klimarealisierungen für zwei österreichische Regionen herunterzuskalieren und damit auf zwei unterschiedlichen Skalen Schneemodelle anzutreiben. Auf lokaler Skala wurde dazu das physikalisch basierte Prozessmodell AMUNDSEN eingesetzt, auf regionaler Skala das Konzeptmodell SNOWREG. Sie Simulationsrechnungen, die mit diesen beiden Modellen für vier verschiedene Realisierungen des A1B Szenarios durchgeführt wurden, zeigen sehr starke Veränderungen in den natürlichen Schneebedingungen auf beiden Skalen, sowohl der lokalen (Skigebiete Schladming und Kitzbühel), als auch der regionalen Skala (Steiermark und Tirol), obwohl das A1B Emissionsszenario nur eine moderate Erhöhung der Temperatur vorgibt. Die Ergebnisse der Indikatorenauswertung zeigen, dass z.B. die Skisaisonlänge v.a. in den höheren Regionen (2000 m – 2500 m) um mehrere Wochen zurückgeht. Eine Ausnahme stellt die SNOWREG-Modellierung für Tirol unter Verwendung der SMHI-Realisierung dar, welche bis in Höhen von etwa 2000 m eine vergleichsweise gering ausfallende Reduktion der Skisaisonlänge von nur einer Woche ergibt, und darüber sogar eine leichte Zunahme.

Die Ergebnisse des Projektes können verwendet werden, um Optionen zur Produktion von technischem Schnee in den Skigebieten zu entwickeln, und gemeinsam Kriterien für ökonomisch wie ökologisch nachhaltige Managementstrategien zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels zu entwickeln. CC-Snow setzt einen Markstein in der Modellierung der natürlichen Schneebedingungen unter historischen wie möglichen zukünftigen Schneebedingungen in österreichischen Skidestinationen. Klarer Forschungsbedarf besteht in der Berücksichtigung der Produktion von technischem Schnee im Rahmen der Modellierung, einem spannenden neuen Betätigungsfeld für die Schneehydrologie.

Zu den Schlüsselfragen für künftige Forschungsarbeiten gehören:

- Wie gut kann technische Schneeproduktion und reales Management moderner Skigebiete (Produktion technischen Schnees, Pistenpflege) mit detaillierter Modellierung der Schneedecke abgebildet werden (unter Berücksichtigung des einhergenden Wasser- und Energieverbrauchs)?
- Was sind die ökonomischen und regionalen Effekte zukünftiger natürlicher und technischer Schneebedingungen in der österreichischen Skitourismuswirtschaft?
- Was sind die ökologisch und ökonomisch nachhaltigsten Managementoptionen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels?
- Wie kann Wissen von Wissenschaftlern und Stakeholdern verschiedener Gesellschaftsbereiche kombiniert werden, um Qualität und Anwendbarkeit wissenschaftlicher Arbeit zu verbessern, Anpassungsfähigkeit zu generieren und Wissensproduktion mit Strategieentwicklung zu verbinden?
- Wie beeinflusst die Unsicherheit im Klimawandelsignal die Ergebnisse der Schneemodellierung sowie der ökonomischen und regionalen Analyse?

Um diesen Fragen nachzugehen, wurden bereits zwei Nachfolgeprojekte beantragt. Im derzeit laufenden Projekt CC-Snow II (2nd Call des ACRP, Projektlaufzeit: 01/2011–06/2012) wird ein gekoppeltes Modellsystem implementiert, welches das Klimawandelsignal durch die Modellierung natürlicher Schneebedingungen und technischer Schneeproduktion routet, und an die sozio-ökonomische und regionale Analyse weitergibt. Die ökonomischen Effekte des Klimawandels auf den Wintertourismus werden in diesem Projekt durch Berücksichtigung der



Übernachtungszahlen und Skifahrern auf mehreren zeitlichen und räumlichen Skalen untersucht. Dazu wird eine Kosten-Nutzenanalyse der technischen Beschneiung unter Klimawandelbedingungen mittels dynamischer Investmentmodelle durchgeführt.

Vor dem Hintergrund einer sowohl ökonomisch wie auch ökologisch nachhaltigen Entwicklung der österreichischen Skigebiete in den kommenden Jahrzehnten, und um mit den kommenden Herausforderungen des Klimawandels umgehen zu lernen, wäre es hilfreich, gemeinsam mit den Akteuren verschiedene Managementoptionen zum Betrieb der Skigebiete in gekoppelten, integrierten Simulationen testen zu können, und diese Optionen mit geeigneten Kriterien auf ihre Nachhaltigkeit für die Tourismusregion zu bewerten. Genau dies wurde im Projekt CC-Snow.net beantragt (4th Call des ACRP, aber nicht bewilligt), wo eine explizite, quantitative und räumlich verteilte Modellkette entwickelt hätte werden sollen, um eine Reihe von partizipativ erarbeiteten Managementoptionen mit ihren ökonomischen und regionalen Effekten zu testen. Gemeinsam mit den Stakeholdern sollten auch die Kriterien entwickelt werden, durch welche aus den Optionen nachhaltige Strategien werden können. Dazu würden auch Wasser- und Energieverbrauch der technischen Schneeproduktion mitgerechnet werden, und in eine Kosten-Nutzenanalyse der technischen Schneeproduktion einfließen. Die Bandbreite der A1B-Realisierungen aus den Projekten CC-Snow und CC-Snow II hätte für eine Abschätzung der Unter- und Obergrenze der Auswirkungen des Klimaänderungssignals eingesetzt werden können. Es ist vorgesehen, den CC-Snow.net-Antrag neu zu strukturieren und unter Berücksichtigung der Gutachterkommentare im nächsten ACRP-Call erneut einzureichen.



4 Methodik

4.1 Klimamodellierung

Um die gewünschten Eingabedaten für die Modellierung der Schneedecke bereitstellen zu können, wurden die Klimasimulationen des ENSEMBLES-Projektes im Hinblick auf die Veränderung der Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse in der Steiermark und Tirol untersucht (beispielhaft gezeigt für die Steiermark in Abb. 8).

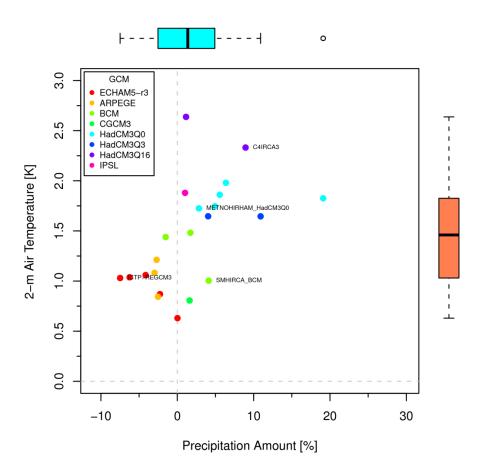


Abb. 8: Temperatur- und Niederschlagsveränderungen im Winterhalbjahr (November – April) für die Steiermark (2021–2050 verglichen mit 1971–2000). Daten aus den Modellläufen des ENSEMBLES-Projektes.

Die Modellrechnungen haben eine räumliche Auflösung von 25 m und sind auf dem A1B Emissions-Szenario basiert (Nakicenovic et al. 2000). Um einen repräsentativen Bereich möglicher zukünftiger Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse im Winterhalbjahr abzudecken (welche für die Entwicklung der Schneedecke entscheidend sind), wurden folgende Modellkombinationen ausgewählt:

- ICTP (RegCM3 regionales Klimamodell (RCM), angetrieben vom ECHAM5-r3 globalen Klimamodell (GCM)): geringfügige Erwärmung und trockenere Bedingungen
- SMHI (RCM: RCA, GCM: BCM): geringfügige Erwärmung und feuchtere Bedingungen
- METNO (RCM: HIRHAM, GCM: HadCM3Q0): mittlere Erwärmung, geringfügig feuchter
- C4I (RCM: RCA3, GCM: HadCM2Q16): starke Erwärmung, deutlich feuchter.



Die C4I – Realisierung mit ihrer starken Zunahme der Temperaturverhältnisse ist im Hinblick auf die Schneemodellierung wohl die extremste, während die SMHI-Realisierung eher gemäßigt ist und aufgrund der Zunahme der Niederschläge sogar zu verbesserten Schneebedingungen führen könnte, v.a. in den höher gelegenen Regionen der Testgebiete.

Für jede der Realisierungen wurden drei Typen von Simulationen analysiert: eine Wetter (hindcast)-Simulation für Validierungszwecke (1961–2000, RCM angetrieben durch die ERA-40 Re-Analyse, also "historisches Wetter" (Uppala et al. 2005)), eine Klima (Kontroll)-Simulation zur Generierung eines baseline-Klimas zum Vergleich mit der Szenario-Simulation, sowie die Szenario-Simulation selbst (im Fall der Klimasimulationen 1961-2000 bzw. 2021–2050 wurde das RCM angetrieben von einem globalen Klimamodell, für die Zukunft unter A1B Bedingungen). Letzteres repräsentiert ein mögliches zukünftiges Klima.

Die beiden in CC-Snow verwendeten Schneemodelle verlangen meteorologische Eingabedaten auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen, und auch verschiedene Parameter. Das regionale Modell SNOWREG benötigt Tageswerte von Temperatur und Niederschlag, während das lokale Modell AMUNDSEN zusätzlich relative Feuchte, Windgeschwindigkeit und die Globalstrahlung benötigt, und dies zumindest drei-stündlich (zur Abbildung der v.a. durch den Gang der Strahlung beeinflussten Energiebilanz der Schneeoberfläche). Die Prozessierung der Eingabedaten für die Schneemodellierung umfasste drei Schritte:

- 1. Die Szenario-, Kontroll- und hindcast-Läufe wurden unter Verwendung von ZAMG Stationsdaten auf Tagesbasis mit einer quantil-basierten, empirisch-statistischen Methode skaliert und fehlerkorrigiert. Für Temperatur und Niederschlag wurde diese Methode schon von Themeßl (2011) erfolgreich eingesetzt. Die Erweiterung der Methode für die anderen Parameter wurde von Wilcke et al. (2011) durchgeführt, und wird im Rahmen des Projektes CC-Snow II weiter analysiert und evaluiert.
- Da das lokale Schneemodell AMUNDSEN höher aufgelöste Eingabedaten (als Tageswerte) benötigt, wurde den downgescalten und korrigierten Tageswerten ein simulierter Tagesgang überlagert, so dass drei-stündliche Eingabedaten für AMUNDSEN resultieren.
- 3. Interpolation der meteorologischen Größen von der lokalen (Punkt-) auf die Skala der Schneemodelle (50 m bzw. 250 m Raster).

Die Methode des "quantile mapping" wurde erfolgreich für die modellierten Größen Luftdruck, relative Feuchte, Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung Windgeschwindigkeit angewendet. Danach wurde ein "split sample" – Test durchgeführt (Wilks 1995) und der verbleibende Fehler berechnet, um einen Einblick in die Genauigkeit der Methode zu bekommen. Dazu wurde eine Periode von 50 Jahren ausgewählt, das quantile mapping mit 25 Jahren kalibriert und mit den anderen 25 Jahren validiert. Beispielhaft sind in Abb. 9 die Fehler, gemittelt über die 25 Jahre, für den Niederschlag an den österreichischen ZAMG-Stationen dargestellt: links ohne, rechts mit Fehlerkorrektur. Für alle Stationen reduziert sich der Fehler signifikant durch die Korrektur. Verbleibende Fehler sind Auswirkungen der langfristigen Klimaänderung auf den Modellfehler zuzuschreiben und lassen sich mit empirisch-statistischen Methoden nicht korrigieren.



Bias of Winter Precipitation for Model METNO A1B

Model (80per criterion) minus Observation (80per criterion)

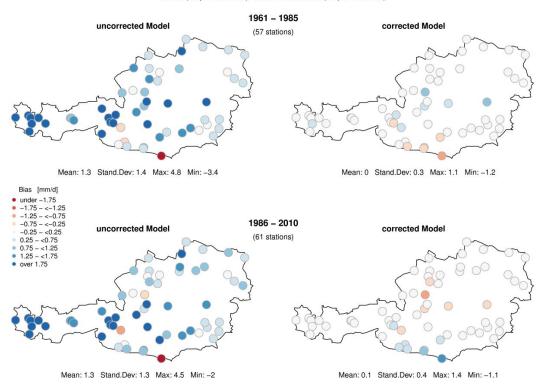


Abb. 9: Abweichungen des Winterniederschlags (November – April) der METNO-Realisierung von den Stationsdaten vor und nach der Fehlerkorrektur. Die Periode 1961-1985 ist mit Beobachtungen der Periode 1986-2010 kalibriert, und umgekehrt.

Als Beispiel für eine aus diesen korrigierten Daten interpolierte Klimatologie zeigt Abb. 10 die mittleren monatlichen Lufttemperaturen bzw. Niederschlag für die Steiermark (500 m Raster) für den Zeitraum 2041–2050 (METNO-Realsierung).

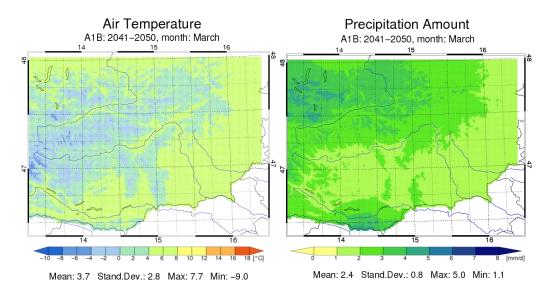


Abb. 10: METNO-Realisierung 2041–2050 (März-Mittelwerte). Mittlere Monatstemperatur bzw. –niederschlag in der Steiermark.



4.1 Lokale Schneemodellierung mit AMUNDSEN

Das physikalische Schneeprozessmodell AMUNDSEN (Alpine MUltiscale Numerical Distributed Simulation Engine, Strasser 2008) wird im Projekt CC-Snow zur Modellierung der historischen wie zukünftigen Schneedeckenverhältnisse für die beiden Testgebiete Schladming und Kitzbühel verwendet. Dazu werden für die historischen Rechnungen Stationsdaten verwendet, und für sowohl historische als auch Zukunftsläufe kommen die skalierten und fehlerkorrigierten regionalen Klimamodellierungen zum Einsatz.

AMUNDSEN wurde spezifisch für die Verhältnisse in Gebirgsregionen konzipiert und berücksichtigt den Einfluss der lokalen Topographie auf die mikrometeorologischen Verhältnisse im Modellgebiet. Das in IDL ("interactive data language", http://www.exelisvis.com/ProductsServices/IDL.aspx) implementierte Modell umfasst die folgenden Module:

- Berechnung topographischer Parameter aus dem digitalen Geländemodell (DEM)
- Simulation kurz- und langwelliger Strahlungsflüsse unter Berücksichtigung von Topographie, Schatten und Wolkenbedeckung (Corripio 2003, Greuell et al. 1997)
- Parameterisierung der Schneealbedo unter Berücksichtigung von Schneealter und Temperatur (Rohrer 1992)
- Berechnung der Schneeschmelze mit entweder einem Energiebilanz-Ansatz (Strasser et al. 2008), oder einem verbesserten Temperaturindex-Modell, welches Strahlung und Albedo mit einbezieht (Pellicciotti et al. 2005)
- Modellierung von Schnee-Wald-Interaktion (Interzeption, Sublimation, Schmelze unter Berücksichtigung eines modifizierten Bestandesklimas (Liston and Elder 2006, Strasser et al. 2008, 2011)
- Simulation gravitativer Schneerutschungen (Gruber 2007)
- Simulation von wind-induziertem Schneetransport (Warscher et al. 2011)
- Berechnung von Szenario-Inputdaten mit Hilfe eines stochastischen Wettergenerators (Strasser 2008)
- Berechnung der aktuellen Evapotranspiration (Allen et al. 2005)

Zur Verwendung des Modells im Projekt CC-Snow wurden eine Reihe von Modellerweiterungen und –anpassungen durchgeführt. Die Wichtigsten sind:

- Implementierung eines flexiblen Mechanismus zum Starten bzw. Beenden von Modell-Läufen zu beliebigen Zeitpunkten, für transiente Modell-Läufe und flexible Ausgabe von Saisonergebnissen
- Flexibles Anpassen des Zeitschrittes für die Modellierungen (ein-stündlich, zwei-stündlich oder drei-stündlich). Vergleichsrechnungen haben ergeben, dass die Ergebnisse aus den dreistündlichen Modell-Läufen kaum von korrespondierenden, stündlich berechneten Ausgaben abweichen
- Flexible Auswahl der modellierten Region durch Spezifikation in Parameter-files, welche auch alle anderen einstellbaren Steuerungsoptionen beinhalten
- Lesen uns Schreiben von NetCDF Format wurde ergänzt (erhebliche Reduktion des Datenvolumens)
- Implementierung der Indikatoren (saisonale Ausgabe), siehe Tabelle 1
- Erweiterung um tägliche Ausgabe von Schneehöhen zum Vergleich mit dem regionalen Schneemodell



- Re-Design des Modellkerns zur Unterscheidung von Neuschnee, Altschnee und Firn sowie Gletschereis, und Entwicklung einer Schnittstelle für technische Schneeproduktion. Berechnung von Schneedichte und -höhe (zum Vergleich mit entsprechenden Messungen)
- Verbesserung der Interpolationsroutine zur Berücksichtigung von Stationen, welche außerhalb des Testgebietes liegen, sowie Ergänzung um monatliche Fixgradienten für die Höhenabhängigkeit der einzelnen meteorologischen Parameter
- Einbau der Berechnung der Feuchttemperatur zum Abschätzen der Möglichkeit bzw. Effizienz technischer Beschneiung.

Die Analyse der zukünftigen Feuchttemperaturverhältnisse und damit der Bedingungen zur Produktion technischen Schnees ist Inhalt einer derzeit in Bearbeitung befindlichen Master-Arbeit. Es zeigt sich, dass sich die Möglichkeiten effizienter technischer Schneeproduktion für alle vier A1B-Realisierungen deutlich reduzieren werden (Anzahl der Stunden guter Beschneibarkeit), wobei sich der Zeitraum für mäßig effiziente Beschneibarkeit als Konsequenz daraus verlängern wird.

Neben der eigentlichen Modellentwicklung wurden eine Vielzahl von Eingabedaten aufbereitet und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt, u.a.:

- Hochaufgelöste digitale Geländemodelle (DEMs) für die beiden Testgebiete, Auflösung 50 m
- Meteorologische Stationsdaten (Korrektur, Konvertierung in passendes Format)
- Landnutzungsdaten sowie Pistengeometrien (auf DEMs projiziert)

Die ersten Modell-Läufe wurden mit Stationsdaten als Input gerechnet und decken die Periode 1985–2011 ab. Sobald die Klimamodell-Ausgaben zur Verfügung standen, wurden die entsprechenden hindcast (1961–2000)- und Klimamodell-Läufe (1961–2050) gerechnet.

Zum Vergleich verschiedener räumlicher Interpolationsverfahren wurde von P1 ein hochauflösender Kriging-Algorithmus implementiert. Dieser Ansatz ist sehr rechenintensiv, daher wurde er nur exemplarisch angewandt (1981–1990 für den hindcast-Lauf, 1981–1990 und 2041–2050 für den Szenario-Lauf nur ein RCM (METNO) und nur für das Testgebiet Schladming). Für Temperatur und Niederschlag sind Vergleichsergebnisse in Abb. 11 dargestellt.

Es ergeben sich nur geringe Unterschiede mit einer Tendenz zu höheren Niederschlagssummen in den mit dem meteorologischen Präprozessor von AMUNDSEN interpolierten Werten. Als Beispiel zeigt Abb. 12, wie sich solche Unterschiede auf die Schneemodellierungen auswirken können. Wie erwartet liefert AMUNDSEN mit den vom Präprozessor interpolierten Niederschlägen eine geringfügig längere Skisaisondauer.



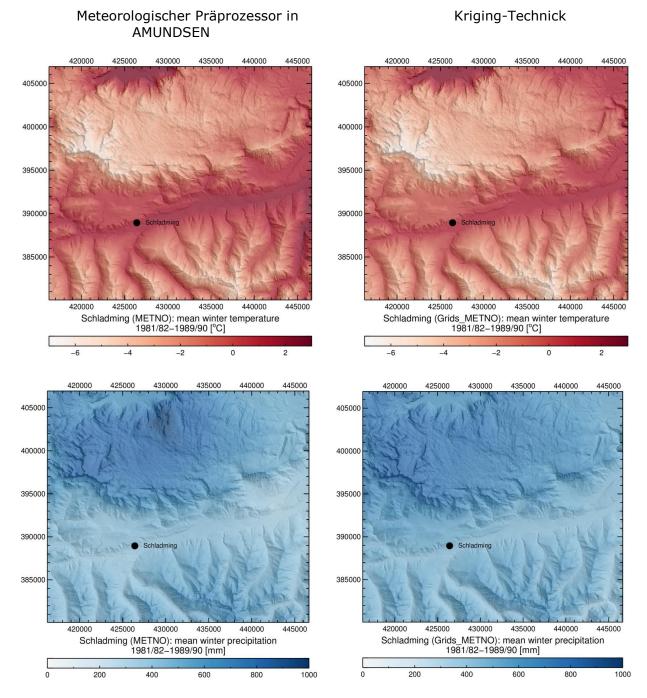


Abb. 11: Skalierte METNO- (Klimamodus) Wintertemperatur (oben) und -niederschlag (unten) (November-April) für das Testgebiet Schladming (1981/82–1989/90) berechnet mit dem meteorologischen Präprozessor in AMUNDSEN (links) und mittels kriging (rechts).



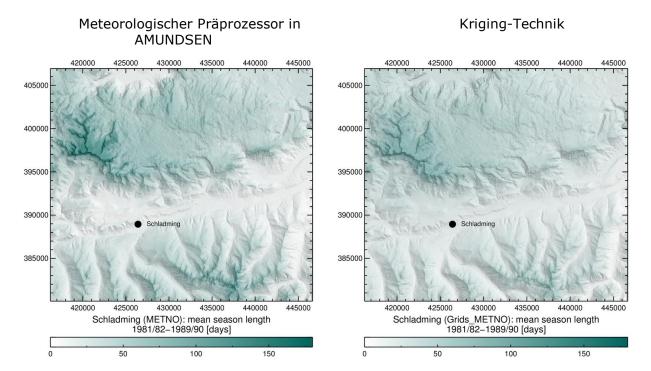


Abb. 12: Mittlere Skisaisonlänge (November-April) im Testgebiet Schladming für die Periode 1981/82–1989/90 berechnet auf Basis der METNO-Klimatologie mit den Interpolationsroutinen von AMUNDSEN (links), sowie mittels Kriging (rechts).

Eine Validierung des Modells AMUNDSEN wurde durch Vergleich mit Stationsmessungen durchgeführt (laufende Masterarbeit), sowie durch Vergleich mit Schneeflächen aus Satellitendaten. Abb. 13 zeigt die modellierte Schneedecke vom 25. März 2003 (links) im Vergleich zum Muster der Schneebedeckung, wie es aus Landsat-Daten abgeleitet werden kann (rechts).

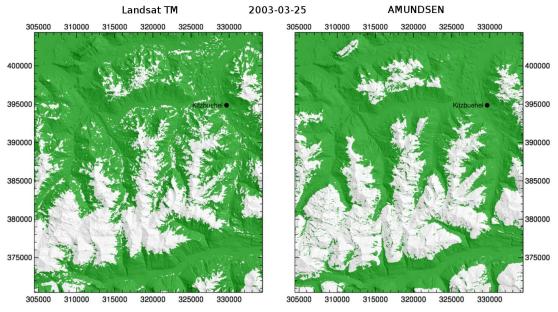


Abb. 13: Schneedeckenmuster für das Testgebiet Kitzbühel in Tirol am 25. März 2003. Links: modelliert mit AMUNDSEN. Rechts: aus Landsat-Daten abgeleitet.



Die Modellergebnisse decken sich gut mit dem fernerkundeten Muster. Der Vergleich legt nahe, dass das Modell die für Auf- und Abbau der Schneedecke relevanten Prozesse korrekt abbildet und damit gut zur Simulation der alpinen Schneedecke geeignet ist.

4.2 Regionale Schneemodellierung mit SNOWREG

SNOWREG, ein Konzeptmodell zur Simulation der Schneedecke auf regionaler Skala, wird in CC-Snow für die Modellierung der historischen und möglichen zukünftigen Schneebedingungen in den Bundesländern Tirol und Steiermark eingesetzt. Das Modell, basierend auf dem Grad-Tag Ansatz, wurde 1999 von Hannes Kleindienst (P3 in CC-Snow) entwickelt, zunächst zur Abschätzung des Schneedeckenzustandes und von Schmelzraten während schneeschmelzbedingter Hochwasserereignisse.

SNOWREG verwendet gemessene Werte von Temperatur und Niederschlag auf Tagesbasis, um die Schneehöhe, das Schneewasseräquivalent und eine Reihe anderer Parameter zu simulieren. Unter Verwendung eines digitalen Geländemodells kann SNOWREG als flächenverteiltes Schneemodell mit Auflösung zwischen 250 m bis 1000 m verwendet werden. Die meteorologischen Eingabegrößen für die flächenmäßige Anwendung werden durch eine IDW-Interpolation von den Orten der Messung auf das Modellraster gerechnet. In CC-Snow wurde SNOWREG dem Workflow angepasst und hinsichtlich der Performanz verbessert. Weiterentwickelt wurden außerdem die Eingabeprozedur, das Datenhandling mittels Datenbank und die Ausgabemöglichkeiten. Zusätzlich wurde eine graphische Benutzerschnittstelle geschaffen. Die wesentliche Neuerung ist die Kopplung mit einer relationalen Datenbank, welche die Ausgabedaten archiviert und managt, sowie die Indikatoren berechnet.

Da SNOWREG ein Konzeptmodell ist, muss es kalibriert werden. Der dazugehörige Workflow, welcher in CC-Snow implementiert wurde, ist in Abb. 14 illustriert.

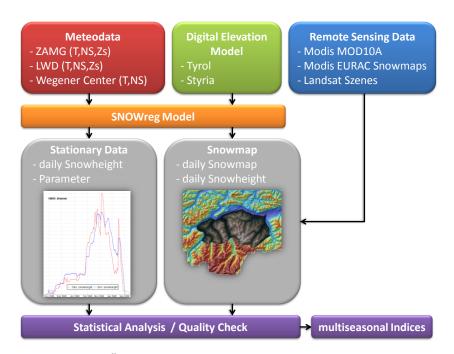


Abb. 14: Schematischer Überblick über den Workflow beim Kalibrieren und Anwenden des regionalen Schneemodells SNOWREG.



Um bestmögliche Ergebnisse zu produzieren, ist der Workflow in folgende drei Verarbeitungsschritte aufgeteilt:

- Stations-basierte Modellierung/Kalibrierung mit gemessenen Daten (lokale Skala)
- Flächenverteilte Modellierung und Validierung mit Schneedeckenkarten aus Satellitendaten
- Flächenverteilte Modellierung anhand von Realisierungen des A1B Szenarios

Ein entscheidender Schritt vor der Anwendung von SNOWREG mit Szenario-Daten ist die Kalibration. Sie geht Hand in Hand mit der Validierung der Ausgaben basierend auf Vergleich mit Punkt- und Flächenmustern, Qualitätsanalyse und der Anpassung von Modellparametern an die im Untersuchungsgebiet herrschenden Verhältnisse.

Im ersten Schritt wird das Modell an gemessenen Stationsdaten durch Kalibration der Schmelzfaktoren optimiert. Ein Beispiel so einer Gegenüberstellung berechneter mit gemessenen Daten ist in Abb. 15 dargestellt.

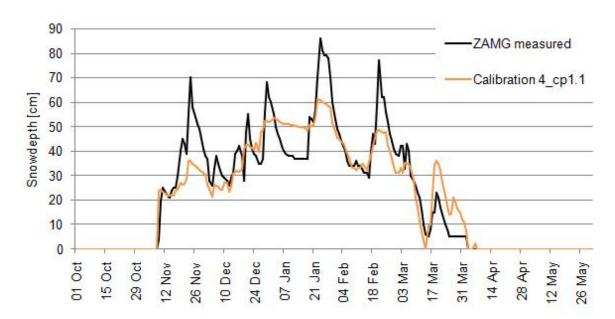


Abb. 15: Gemessene und mit SNOWREG modellierte Schneehöhe an der Station Reutte in Tirol für den Winter 1999/2000. Daten von der ZAMG.

In SNOWREG werden die meteorologischen Stationsdaten auf alle Rasterzellendes Untersuchungsgebiets interpoliert und tägliche Schneehöhen und Wasseräquivalente generiert. Für jedes Pixel der täglich verfügbaren Schneekarten wird eine 1st and 2nd order Fehleranalyse gerechnet, um die Über- oder Unterschätzung der simulierten Schneeverteilung im Vergleich zu den Satellitendaten zu quantifizieren. In Abb. 16 ist die Häufigkeitsverteilung täglicher Über- bzw. Unterschätzung der gemessenen Werte abgebildet, ausgedrückt als Prozentwerte. Die gelbe Kurve wurde auf Tagesbasis durch Summation der 1st and 2nd order Fehler gerechnet. Der linke Graph illustriert einen Vergleich zwischen SNOWREG-Ergebnissen und dem EURAC snow cover product, während sich der rechte auf die MOD10A Schneekarten bezieht. Diese Ergebnisvergleiche zeigen, dass SNOWREG mit den gewählten Parametern gut geeignet ist, die Entwicklung der Schneedecke in den CC-Snow Testgebieten verlässlich abzubilden.



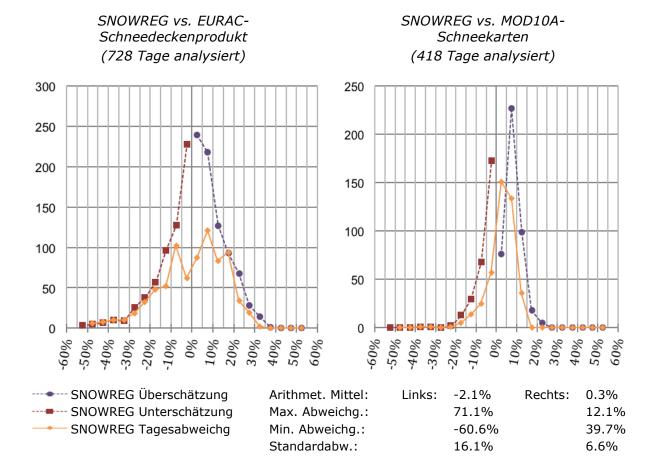


Abb. 16: Häufigkeitsverteilung der SNOWREG Über- und Unterschätzung der Scheedeckenmächtigkeit im Vergleich mit dem EURAC Schneedeckenprodukt (links) und den MOD10A Schneekarten (rechts) (Winter 2002/03–2008/09).

Zusätzlich wurde, wie für AMUNDSEN, ein visueller Vergleich der modellierten SNOWREG-Ergebnisse mit einer aus Landsat-Daten abgeleiteten Schneedeckenkarte, und auch mit den MODIS-Schneeprodukten, durchgeführt. Die vier Muster in Abb. 17 repräsentieren als Beispiel die Schneebedeckung des 25. März 2003 für den östlichen Teil Tirols.

Sowohl die Landsat- abgeleitete, als auch die aus den MODIS-Daten abgeleitete Schneebedeckung zeigen sehr gute Übereinstimmung mit den SNOWREG-Ausgaben. Zur Überprüfung der Notwendigkeit für eine zusätzliche Kalibrierung über die Ergebnisse des lokalen Schneemodells AMUNDSEN wurde ein Vergleich der lokalen und regionalen Schneemodellierung für Kitzbühel und der METNO-Meteorologie durchgeführt (siehe Abb. 18). Mit einem Pearson-Koeffizient von 0.93 für die 90-jährige Periode zeigen die beiden Schneemodelle eine hohe Übereinstimmung. Demnach können realistische SNOWREG-Ergebnisse für die Bundesländer-Skala Tirol und Steiermark ohne weitere Kalibration erwartet werden.



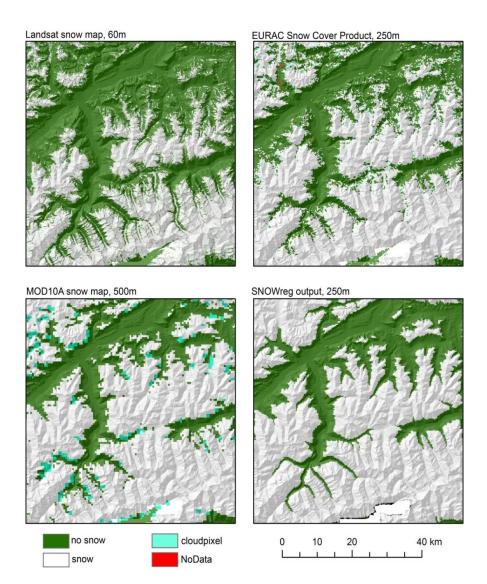


Abb. 17: Schneedeckenmuster des regionalen Schneemodells SNOWREG im Vergleich mit Landsat-, MODIS- und EURAC- abgeleiteten Schneedeckenkarten (25. März 2003).

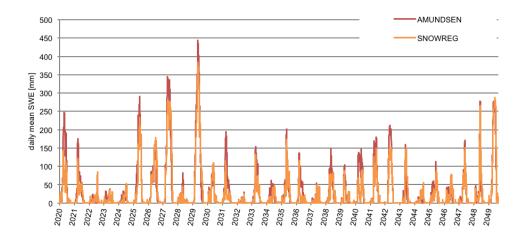


Abb. 18: Modellierte Schneedecke für die Kitzbühel-test site, im Vergleich AMUNDSEN und SNOWREG.



5 Arbeits- und Zeitplan

Das Projekt mit seinen vier Partnern wurde nach folgendem Zeitablaufplan abgewickelt (Abb. 19):

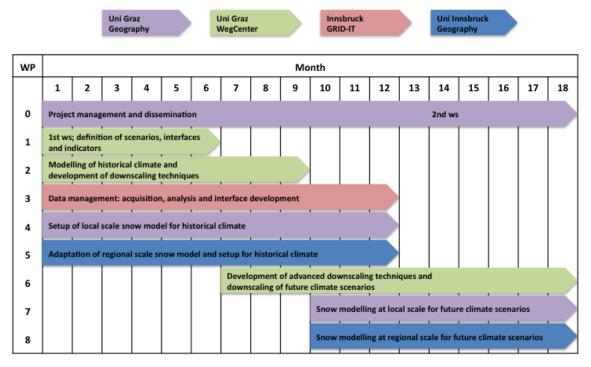


Abb.19: CC-Snow Projekt workflow plan (Gantt-Diagramm) für die vier Partner und 18 Monate Projekt-Laufzeit.



6 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Folgende Präsentationen des Projektes wurden auf der EGU 2011 in Wien vorgestellt:

- Hanzer, F., Strasser, U., Marke, T., Warscher, M., Hynek, B., Olefs, M. and Schöner, W. (2011): Latest developments of the Alpine snowcover model AMUNDSEN: new modules, projects and perspectives. Geophysical Research Abstracts, Abstracts of the European Geosciences Union General Assembly 2011, Vienna.
- Ortner, F., Schajer, P., Hanzer, F., Marke, T. and Strasser, U. (2011): Snow cover trends in Tyrol and Styria (Austria) over the last decades. Abstracts of the European Geosciences Union General Assembly 2011, Vienna.
- Schajer, P., Ortner, F., Hanzer, F., Marke, T. and Strasser, U. (2011): Climate trends in Tyrol and Styria (Austria) during the last decades. Geophysical Research Abstracts, Abstracts of the European Geosciences Union General Assembly 2011, Vienna.
- Strasser, U., Gobiet, A., Stötter, J., Kleindienst, H., Zimmermann, F., Steininger, K. and Prettenthaler, F. (2011): CC-Snow-an interdisciplinary project to investigate climate change effects on future snow conditions and winter tourism in Tyrol and Styria (Austria). Geophysical Research Abstracts, Abstracts of the European Geosciences Union General Assembly 2011, Vienna.

Im Rahmen der ACRP-Veranstaltung "Klimafolgenforschung in Österreich: Aktuelle Projekte im Überblick" am 18. Mai 2011 wurde das Projekt von Thomas Marke and Robert Steiger vorgestellt:

Marke, T. and Steiger, R. (2011): CC-Snow – Effects of Climate Change on Future Snow Conditions in Tyrol and Styria, Klimafolgenforschung in Österreich: Aktuelle Projekte im Überblick, Vienna.

Folgende weitere Konferenzabstracts wurden publiziert:

- Wilcke, R.A.I., Gobiet, A., Mendlik, T. and Themeßl, M.J. (2011): Multiparameter Error Correction and Downscaling of Regional Climate Models. EMS Annual Meeting Abstracts Vol. 8, EMS2011-230.
- Wilcke, R.A.I., Gobiet, A., Mendlik, T. (2012): Physical Consistency of Multi-Parameter Error-Correction and Downscaling of Regional Climate Models. International Conference on End User Needs for Regional Climate Change Scenarios
- Wilcke, R.A.I., Mendlik, T., Gobiet, A. (2012): Physical Consistency of Multi-Parameter Error-Correction and Downscaling of Regional Climate Models. EGU General Assembly Vol. 14, EGU2012-2934
- Steiger, R., Marke, T., Osebik, D., Töglhofer, C., Kleindienst, H., Wilcke, R. and Strasser, U. (2011b): CC-Snow: an interdisciplinary project to investigate climate change effects on



winter tourism in Tyrol and Styria (Austria). Abstracts of the "International Tourism Sustainability Conference", Mauritius.

Seit April 2010 ist am Wegener Center for Climate and Global Change (P1) eine Dissertation in Bearbeitung. Die Kandidatin Renate Wilcke bearbeitet die Arbeit mit dem Titel:

"Optimal Statistical Downscaling and Climate Model Error Correction – A Data assimilation Parameterisation and Error Characteristics of Climatological Informations in Downscaling of Regional Climate Modeling"

Drei Masterarbeiten wurden im Rahmen des Projekts am Institut für Geographie (Universität Graz) initiiert:

• Titel: "Temperature and precipitation trends in Styria and Tyrol"

Student: Philipp Schajer

Status: fertig

Arbeitstitel: "Validation of the snow model AMUNDSEN for Tyrol and Styria"

Student: Florian Ortner Status: in Bearbeitung

• Arbeitstitel: "Scenarios of future snow conditions in Styria and Tyrol"

Student: Claudia Egger Status: in Bearbeitung

Eine Masterarbeit wurde im Rahmen des Projekts am Institut für Geographie (Universität Innsbruck) initiiert:

• Titel: "Tyrolean Alps Snow Cover Scenarios-Derived from a multisource calibrated degreeday snow model"

Student: Hansjörg Ragg

Status: fertig

Die Projektergebnisse wurden auf der EGU 2012 in Wien präsentiert, und werden jetzt in einem internationalen, peer-reviewed journal publiziert:

Strasser, U., Marke, T., Hanzer, F., Ragg, H., Kleindienst, H., Wilcke, R. and Gobiet, A.: A1B scenario simulations of future natural snow conditions in Tyrol and Styria (Austrian Alps).

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.



7 Literatur

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Smith, M., Raes, D. and Wright, J.L. (2005): FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions. In: J. Irr. Drain. Eng., Vol. 131, No. 1, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(2).
- Blöschl, G. (1999): Scaling issues in snow hydrology. In: Hydrol. Process., 13(14–15), 2149–2175.
- Christensen, J.H. und Christensen, O.B. (2007): A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. In: Clim. Change, 81, doi:10.1007/s10584-006-9228-x.
- Corripio, J.G. (2003): Vectorial algebra algorithms for calculating terrain parameters from DEMs and solar radiation modelling in mountainous terrain. In: Int. J. Geogr. Inf. Sci., 17(1), 1-23.
- Cline, D., Elder, K. und Bales, R. (1998): Scale effects in a distributed snow water equivalence and snowmelt model for mountain basins. In: Hydrol. Process., 12, 1527–1536.
- Greuell, W., Knap, W. und Smeets, P. (1997): Elevational changes in meteorological variables along a midlatitude glacier during summer. In: J. Geophys. Res., 102(22), 25941–25954.
- Gruber, S. (2007): A mass-conserving fast algorithm to parameterize gravitational transport and deposition using digital elevation models. In: Water Resour. Res., 43, W06412, doi:10.1029/2006WR004868.
- Hewitt, C.D. und Griggs, D.J. (2004): Ensembles-based predictions of climate changes and their impacts. In: Eos, Transact., Amer. Geophys. Un. 85, 566.
- Klemes, V. (1990): The modelling of mountain hydrology: the ultimate challenge. In: IAHS Publ., 190, 29–43.
- Liston, G.E. (2004): Representing subgrid snow cover heterogeneities in regional and global models. In: J. Climate, 17(6), 1381–1397.
- Liston, G.E. und Elder, K. (2006): A Distributed Snow-Evolution Modeling System (SnowModel). In: J. Hydromet., 7(2), 217–234.
- Loibl W., Beck A., Dorninger M., Formayer H., Gobiet A. und Schöner W. (Eds.) (2007): reclip:more research for climate protection: model run, evaluation, project summary report. ARC-sys. Wien.
- Mauser, W. und Ludwig, R. (2002): GLOWA-DANUBE A research concept to develop integrative techniques, scenarios and strategies regarding global changes of the water cycle. In: Beniston, M. (ed.) (2002): Climatic Change: Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management. Advances in Global Change Research. 10. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht and Boston, 171–188.
- Nakicenovic, N. und Svart, R. (2000): Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000. p. 599 pp. http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf.
- Rohrer, M.B. (1992): Die Schneedecke im Schweizer Alpenraum und ihre Modellierung. Zuer. Geogr. Schriften, 49, 178 p, Zürich.
- Strasser, U. (2008a): Die Modellierung der Gebirgsschneedecke im Nationalpark Berchtesgaden. Modelling of the mountain snow cover in the Berchtesgaden National Park, Berchtesgaden National Park research report, Nr. 55, Berchtesgaden.
- Strasser, U., Bernhardt, M., Weber, M., Liston, G.E., und Mauser, W. (2008b): Is snow sublimation important in the alpine water balance? In: The Cryosphere, 2, 53–66.
- Strasser, U., Warscher, M. und Liston, G.E. (2011): Modelling snow-canopy processes on an idealized mountain, J. Hydrometeor., Vol. 12, No 4, 663-677, doi: 10.1175/2011JHM1344.1.



- Themeßl, M.J., Gobiet, A. und Leuprecht, A. (2011): Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. International Journal of Climatology. August 2011, Vol. 31, 10, pp. 1530-1544.
- Pellicciotti, F., Brock, B., Strasser, U., Burlando, P., Funk, M. und Corripio, J. (2005): An enhanced temperature-index glacier melt model including shortwave radiation balance: development and testing for Haut Glacier D'Arolla, Switzerland, J. Glaciol., Vol. 51, Nr. 175, 573-587.
- Uppala, S.M. et al. (2005): The ERA-40 re-analysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 131, 2005, Vol. Part B, 612, pp. 29661-3012.
- van der Linden, P. und Mitchell, J.F.B. (2009): ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Exeter: Met Office Hadley Centre, 2009.
- Wilcke, R. et al. (2011): Multiparameter Error Correction and Downscaling of Regional Climate Models. [Abstract]. s.l.: EMS Annual Meeting, 2011. Vol. 8. EMS2011-230.
- Wilks, D.S. (1995): Statistical Methods in Atmospheric Science. San Diego, London: Academic Press, 1995.
- Warscher, M., Marke, T., Hanzer, F., Strasser, U., Kunstmann, H., Hynek, B., Olefs, M., Schöner, W., Sailer, R. und Stötter, J. (2011): A terrain-based parameterization for the effect of wind-induced snow redistribution in Alpine terrain, Abstracts of the European Geosciences Union General Assembly 2011, Wien.
- WMO (1986): Intercomparison of models of snowmelt runoff. Operational Hydrology Report 23. World Meteorological Organization, Genf.