

Klimaindikatoren aus der Wetterküche der Südhemisphäre: zum Gletscherwandel in Patagonien und auf Feuerland

Christoph Schneider (Aachen)

1 Lage und klimatische Rahmenbedingungen des Raumes

Mit den Räumen Patagonien und Feuerland wird der stürmische und kühle Süden Südamerikas angesprochen (Abb. 1). Dieses dünn besiedelte und wenig erschlossene „*fin del mundo*“ schiebt sich als nach Süden hin immer schmaler werdender Keil in sonst nur von Wassermassen eingenommene Breiten. Während Patagonien und Feuerland im Westen (Pazifik), im Süden (Drakestraße) und im Osten (Atlantik) durch die angrenzenden Ozeane klar begrenzt sind, gibt es nach Norden keine einheitliche räumliche Abgrenzung. In Argentinien rechnet man die vier Provinzen Santa Cruz, Chubut, Rio Negro und Neuquén zu Patagonien, was in etwa mit der physisch-geographischen Abgrenzung durch den Rio Colorado übereinstimmt, wie sie von SCHELLMANN (2003) vertreten wird. Auf chilenischer Seite werden die XII. Region (Magallanes) und die XI. Region (Aisén) sowie Teile der X. Region (De los Lagos) südlich von Puerto Montt zu Patagonien gezählt. Naturräumlich lässt sich Patagonien in drei Teileinheiten gliedern:

1. Ganz im Westen findet sich die westliche Küstenzone mit ihren Inseln, Kanälen und Fjorden im Vorfeld der Anden, welche die südliche Fortsetzung der Küstenkordillere Mittelchiles darstellt.
2. Das eigentliche Andenorogen beinhaltet die beiden großen Inlandeisfelder des Nördlichen (NPI) und des Südlichen (SPI) Patagonischen Inlandeises zwischen 40°S und 52°S. Südlich des Gran Campo Nevado und der Magellanstraße bei 53°S löst sich dieser Teil wiederum in eine Vielzahl von Inseln auf.
3. Im Osten schließen sich zumeist auf argentinischem Staatsgebiet weite Tafelländer an, die sich nach Osten zu einer flachen Küstenzone absenken und ein ausgesprochenes Trockengebiet mit teilweise wüstenhaftem Charakter darstellen.

Eine ausgezeichnete Darstellung der physischen Geographie Feuerlands enthält TUHKANEN et al. 1990.

Kein anderer Raum außerhalb der Antarktis reicht so weit nach Süden in die Zone permanenter Westwinde zwischen 40°S und 60°S. Aus diesem Grunde bergen vor allem das südliche Patagonien und Feuerland eine weltweite Sonderstellung im Hinblick auf die Untersuchung von Klima und Klimawandel der Südhemisphäre.

Da das Andenorogen zumindest in Patagonien ungefähr senkrecht zur Hauptwindrichtung West liegt, ergibt sich eine klare Differenzierung mit einer niederschlagsreichen Westseite, die zur Ausbildung des magellanischen Moorlandes führt und den extrem niederschlagsreichen und teilweise vergletscherten Gebirgskämmen mit einem Jahresniederschlag von z. T. deutlich über 10 000 mm (vgl. SCHNEIDER et al. 2003), den daran nach Osten im Lee des Gebirges anschließenden Waldgürteln und der sich daran nach Osten anschließenden patagonischen Steppe, die weitestgehend auf argentinischem Territorium liegt (vgl. SCHMIDTHÜSEN 1957).

Die klimatische Sonderstellung des südlichen Patagonien in der Allgemeinen Zirku-

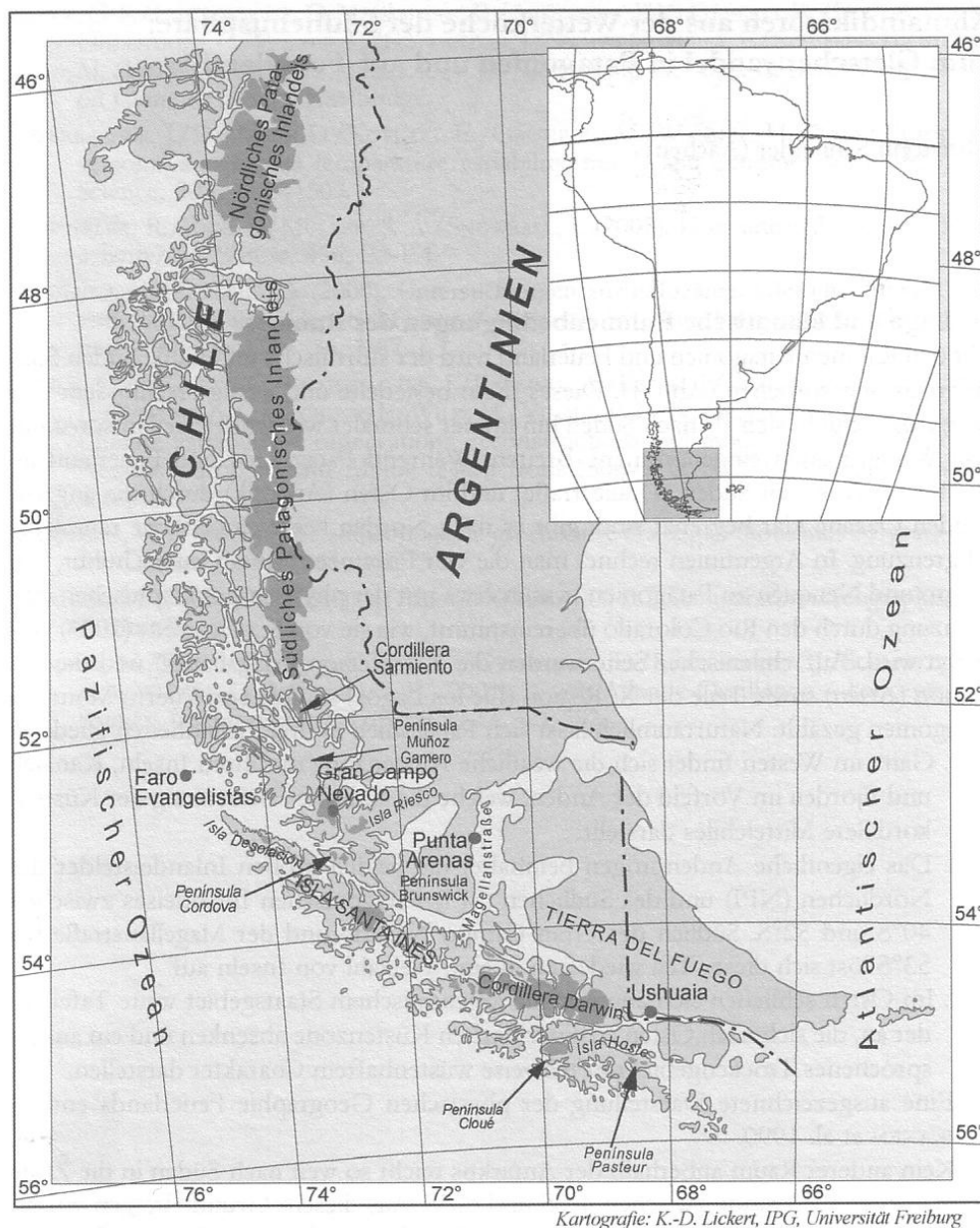


Abb. 1: Vergletscherung im südlichsten Südamerika

lation der Erde kann mit vier Kernaussagen (vgl. WEISCHET 1996) charakterisiert werden:

- Der eisbedeckte Kontinent Antarktis in Pollage stellt ganzjährig einen extremen Kältepol dar, wodurch vor allem im Sommer ein starkes Temperaturgefälle zwischen Polargebiet und Tropen entsteht. Dies drückt sich in einem hohen Druckgradienten aus, mit einer Drängung der Isobaren zwischen 40° und 60°S (antarktischer Akzent).
- Die zirkumpolare Westwinddrift ist deutlich stärker als auf der Nordhalbkugel ausgebildet. Hier kommt verstärkend das Fehlen großer Landflächen in den Ho-

hen Mittelbreiten der Südhalbkugel hinzu, was geringere Reibungswiderstände und einen zonaleren Verlauf des Jetstreams bedeutet (ozeanischer Akzent).

- Einzig die Südspitze Südamerikas und der äußerste Süden Neuseelands reichen so weit von Norden in diese ganzjährige Westwinddrift hinein und sind einer beständigen Abfolge von Zyklonen mit den dazugehörigen Fronten ausgesetzt.
- Jahreszeitliche Änderungen im Wettergeschehen werden in erster Linie durch die meridionale Verlagerung des Subtropenhochs über dem Ostpazifik sowie durch das sommerliche Hitzetief über Nordargentinien gesteuert. Der äußerste Süden bleibt davon aber weitestgehend unbeeinflusst und zeichnet sich durch ganzjährig relativ gleichbleibendes Klima unter permanentem Westwindregime aus.

Als weiterer Punkt zur Charakterisierung des Klimas von Patagonien müssen schließlich die extremen orographischen Effekte der Anden aufgeführt werden, die sich vor allem auf das Niederschlagsregime auswirken (vgl. ENDLICHER 1991, SCHNEIDER et al. 2003). Während in Faro Evangelistas an der pazifischen Westküste über 3000 mm Niederschlag pro Jahr fallen, sind es im Osten des Gebirges in Punta Arenas ebenfalls an der Magellanstraße unter 500 mm (vgl. Abb.1).

2 Klimavariabilität

Ein genereller Erwärmungstrend in Patagonien vor allem in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhundert, der im Süden stärker ausfällt als im Norden, lässt sich an den meisten Wetterstationen erkennen (ROSENBLÜTH et al. 1997). In den vergangenen Jahrzehnten lagen die Temperaturtrends im Südwesten Patagoniens zwischen 0,1 und 0,3 K/Dekade (vgl. Abb. 2).

Patagonien und Feuerland liegen zentral in dem Abschnitt der Westwindzone, wo an der Drakestraße das ozeanische Signal der *El-Niño-Southern-Oscillation* (ENSO) mit der zirkumpolaren antarktischen Störung (*Antarctic Circumpolar Wave* – ACW; PETERSEN/WHITE 1998) in Wechselwirkung tritt (TURNER 2004). Zudem führt die Abschwä-

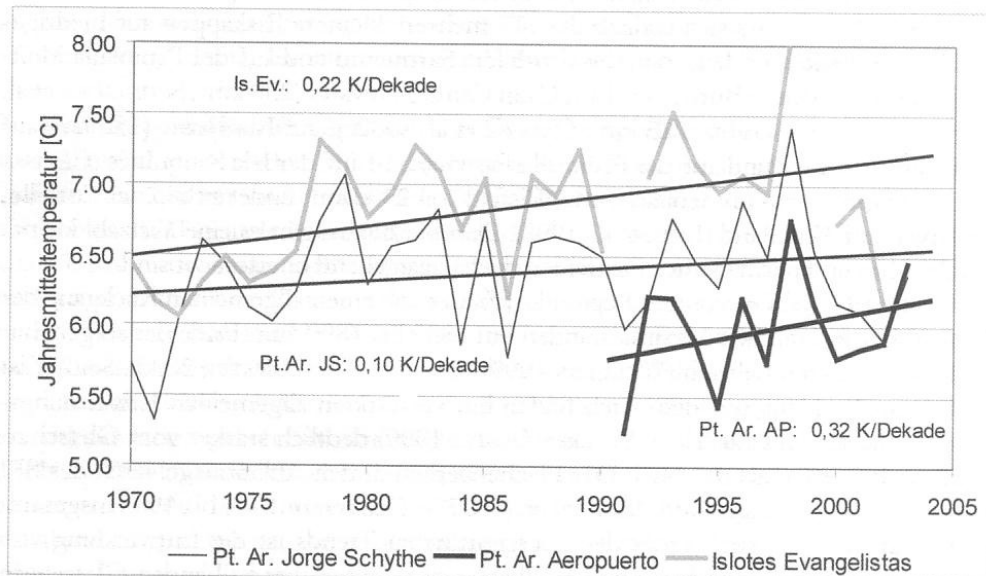


Abb. 2: Temperaturzeitreihen und lineare Trends der Stationen Faro Evangelistas, Punta Arenas Flughafen und Punta Arenas Jorge Schythe (Instituto Patagonia, Universidad de Magallanes)

chung sowohl der subpolaren Tiefdruckrinne über der Bellingshausensee als auch des subtropisch-randtropischen Hochdruckgürtels über dem Südostpazifik zu einer Abnahme des Zonalwindes und damit des Niederschlages an der Westseite des südlichen Patagonien während der ENSO Warmphase (negativer *Southern Oscillation Index* – SOI; SCHNEIDER/GIES 2004). Tatsächlich ergibt sich zwischen den Monatsmitteln des Niederschlages an der automatischen Wetterstation Gran Campo Nevado (53°S) und des SOI eine, auch unter Berücksichtigung der Autokorrelation in beiden Datenreihen, auf dem 95%-Niveau signifikante Korrelation von $r = 0,45$. Häufigere Blockierungen der Westwindströmung und Verlagerungen der Zugbahnen von Zyklonen nach Norden führen im nördlichsten Teil Westpatagoniens und im zentralen Chile gleichzeitig zum gegenteiligen Effekt, nämlich verstärkter Niederschläge bei negativem SOI (ACEITUNO 1988, RUTTLANT/FUENZALIDA 1991). Der mehrjährigen Variabilität durch ENSO überlagert ist eine generelle Verstärkung der südhemisphärischen Westwinddrift, was sich in einem positiven Trend des *Southern Hemisphere Annular Mode* (SAM), dem südhemisphärischen Pendant zur Arktischen Oszillation, in den vergangenen Dekaden ausdrückt (MARSHALL 2003).

3 Gletscher und Gletscherwandel in Patagonien und Feuerland

Zwischen 46°S und 51°S ragen weite Teile der Anden über die klimatische Schneegrenze auf, so dass sich dort die beiden Eisfelder SPI (13 300 km²) und NPI (4000 km²) ausbilden konnten, die zusammen die drittgrößte Eismasse der Welt bilden (CASASSA et al. 2002a; vgl. auch Abb. 1). Dabei handelt es sich trotz der gebräuchlichen Bezeichnung *hielo continental* um kein Inlandeis kontinentalen Ausmaßes. Allerdings ist die Vergletscherung in einigen Bereichen reliefübergeordnet, so dass sie sich deutlich von einer typischen Gebirgsvergletscherung unterscheidet. Die Plateaus, aus denen oft nur einzelne Nunatakker aufragen, speisen zahlreiche Auslassgletscher, die meist in proglaziale Seen, teilweise auch in pazifische Fjorde kalben (CASASSA et al. 2002b, RIVERA et al. 2002). Im Bereich der Magellanstraße liegt die klimatische Schneegrenze bei nur noch 700 m ü. d. M., so dass sich südlich des SPI mehrere kleinere Eiskappen auf niedrigeren Gebirgsstöcken finden, so in der Cordillera Sarmiento und auf der Península Muñoz Gamero am Monte Burney und am Gran Campo Nevado (250 km²; SCHNEIDER et al. 2005a), auf Isla Riesco (ca. 215 km²; CASASSA et al. 2002c), auf Isla Hoste (150 km² auf der Península Cloué und auf der Península Pasteur) und auf der Isla Santa Inés (CASASSA 1995). Ein großes zusammenhängendes Eisfeld von 2300 km² findet sich in der Cordillera Darwin auf Feuerland (LLIBOUTRY 1998). Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl kleiner Kargletscher und permanenter Firnfelder, die weitestgehend unerforscht sind.

Seit ca. 1940 gibt es von der Region Luftbilder, die einen allgemeinen Rückgang der Vergletscherung seit den Maximalständen um 1850 bis 1890 zum Ende der so genannten Kleinen Eiszeit belegen (WENZENS 1999, HARRISON/WINCHESTER 2000). Seither ist das SPI im Einklang mit dem nach Süden hin verstärkten allgemeinen Erwärmungstrend (ROSENBLÜTH et al. 1997, WARREN/ANIYA 1999) deutlich stärker vom Gletscherückgang betroffen als das NPI. Der Flächenverlust in den Ablationsgebieten des SPI betrug nach Schätzungen von ANIYA et al. (1997) im Zeitraum 1944 bis 1985 insgesamt ca. 140 km² bis 380 km². Trotz des übergeordneten Trends ist die Entwicklung von Gletscher zu Gletscher sehr unterschiedlich. Insbesondere bei kalbenden Gletschern wird die Veränderlichkeit maßgeblich von topographischen Faktoren bestimmt (WARREN/ANIYA 1999). RIGNOT et al. (2003) bestimmen den volumetrischen Verlust der 63

größten Gletscher von SPI und NPI aus dem Vergleich von digitalen Geländemodellen älterer kartographischer Aufnahmen und neuer Geländedaten der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) und kommen dabei zu dem Schluss, dass sich gegenüber vorangegangenen Jahrzehnten die Höhenabnahme der Gletscher von ca. 1 m/a um mehr als das Doppelte erhöht hat, was damit einem Beitrag zum Anstieg des Weltmeeresspiegels um $0,105 \pm 0,011$ mm/a entspricht. Dabei ist der beobachtete Gletscherwandel größer als Temperaturanstieg und Niederschlagsabnahme im Bereich der beiden Inlandeise erwarten lassen, was auf zusätzliche eisdynamische Effekte und verstärkte Kalbungsprozesse hinweist.

Insgesamt zeigen die Gletscherschwankungen der beiden Patagonischen Eisfelder eine deutliche Korrelation mit Niederschlagsdaten (WINCHESTER/HARRISON 1996). Für ihre zukünftige Entwicklung besonders wichtig sind daher die mittlere südliche Lage des Südostpazifikhochs und Lage und Stärke der Westwindzone, die das nordwärtige Ausgreifen und die Intensität der außertropischen Niederschläge steuern.

Eine Luftbilddauswertung von Aufnahmen aus den Jahren 1943, 1984 und 1993 belegt, dass in der Cordillera Darwin südlich und westlich exponierte Gletscher kaum Veränderungen an der Gletscherzunge aufweisen, während nördlich und östlich exponierte Gletscher einen geringen Rückzug der Gletscherzungen erkennen lassen (HOLMLUND/FUENZALIDA 1995). Eine neuere Untersuchung am Ventisquero Marinelli, dem größten Auslassgletscher der Cordillera Darwin, dokumentiert allerdings einen erheblichen Rückzug der Gletscherzunge, der sich zum Ende des letzten Jahrhunderts auf ca. 790 m/a dramatisch beschleunigt hat (PORTER/SANTANA 2003). Die Autoren schreiben den beobachteten Gletscherwandel aber eher dem Zusammenspiel von Fjordgeometrie und Kalbungsprozessen als dem moderaten Temperaturtrend im Bereich der Cordillera Darwin zu. STRELIN/ITTURASPE (2005) weisen für eine Reihe von Kargletschern der Cordillera Fueguina Oriental nahe Ushuaia einen sich zum Ende des 20. Jahrhunderts beschleunigenden Gletscherrückgang nach, der in Übereinstimmung mit einem Erwärmungstrend und einer Abnahme der Niederschläge in Ushuaia steht. Durch die Lage im Lee der Cordillera Darwin steht die Niederschlagsabnahme in Übereinstimmung mit einer Verstärkung der zirkumpolaren Westwinde bzw. dem SAM (vgl. Kap. 2).

4 Klimasensitivität der Gletscher am Gran Campo Nevado

Das Gran Campo Nevado (GCN) bildet eine isolierte Eiskappe auf der Península Muñoz Gamero ca. 200 km südlich des SPI. Das Gletscherinventar auf der Grundlage von Orthofotos und digitalem Geländemodell des GCN ergibt eine Eisfläche bestehend aus 27 zusammenhängenden Einzugsgebieten mit einer Gesamtfläche von 200 km² und weiteren einzelnen Kar- und Talgletschern von zusammen 53 km². Das GCN wies in den 60 Jahren von 1942 bis 2002 einen Flächenverlust von im Mittel 2,4 % je Dekade auf (SCHNEIDER et al. 2005a). Der Vergleich des aus Luftbildern abgeleiteten Geländemodells von 1984 und des SRTM Geländemodells von 2000 ergibt eine Eiszunahme im Akkumulationsgebiet und eine starke Ausdünnung der Eiskappe im Ablationsgebiet (Abb. 3). Dies muss dahingehend interpretiert werden, dass neben dem positiven Temperaturtrend und trotz verstärkter ENSO in den letzten 20 Jahren eine Niederschlagszunahme aufgetreten ist, die in den oberen Lagen (über ca. 800 m ü. d. M.), wo die Ablation nur noch einen geringen Anteil an der Massenbilanz einnimmt, zu einem Massenzuwachs in der Höhe geführt hat.

Ein anhand von Ablationsmessungen an eing Bohrten Stangen in den Jahren 2000–

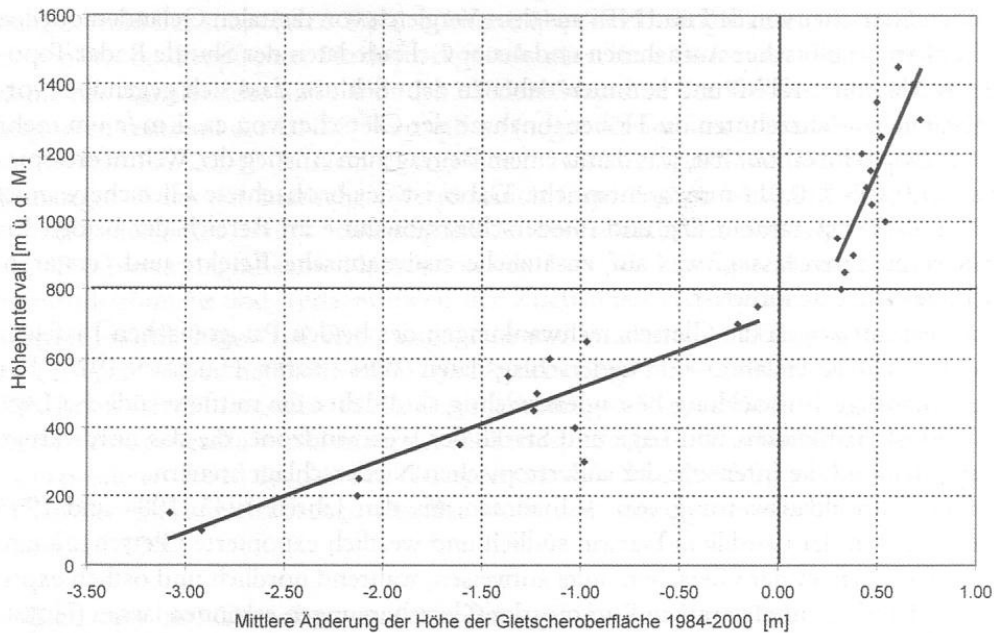


Abb. 3: Mittlere jährliche Höhenänderung der Gletscheroberfläche des GCN zwischen 1984 und 2000, abgeleitet aus dem Vergleich digitaler Geländemodelle (Bearbeitung: Marco Möller, RWTH Aachen)

2003 kalibriertes Gradtagmodell (vgl. OHUMRA 2001, Hock 2003) für den Auslassgletscher Glaciar Lengua des GCN mit einem Gradtagfaktor von 7,01 mm/(K·Tag) (SCHNEIDER et al. 2005b) wurde mit Hilfe der mittleren Abnahme der Temperatur (0,63 K/100 m) und der Zunahme des Niederschlages ($N_h = N_0(1 + 0,0005 h)$) mit der Höhe auf der Basis des Geländemodells zu einem Oberflächenmassenbilanzmodell erweitert (vgl. BRAITHWAITE/ZHANG 2000, JÓHANNESSON et al. 1995). Es ergibt sich für die Jahre 2000 bis 2003 eine im Mittel negative Massenbilanz von -1,0 m Wasseräquivalent (weq) pro Jahr. Das Massenbilanzmodell legt nahe, dass die Gletscherhöhenänderungen entsprechend Abb. 3 in erster Abschätzung eine Temperaturzunahme um 0,5-0,8 K und eine Niederschlagszunahme um ca. 5 % erfordern. Damit stehen Massenbilanzmodell und topographische Analyse des Gletscherwandels in guter Übereinstimmung mit dem positiven Temperaturtrend (vgl. Abb. 2) und einer Verstärkung des Zonalwindes entsprechend des positiven Trends der SAM (vgl. Kap. 2), da die Verstärkung des Zonalwindes zu höheren orographisch bedingten Niederschlägen im Bereich des Gebirgskammes führt.

Um die Sensitivität der Massenbilanz am Glaciar Lengua im Hinblick auf Schwankungen von Temperatur und Niederschlag näher zu untersuchen wurde ein Ansatz von OERLEMANS/Reichert (2000) sowie OERLEMANN (2001) verfolgt. Dabei wird die Massenbilanz (B) eines Einzeljahres (m) als mittlere, ausgeglichene Massenbilanz (B_{ref}) und jährlicher Abweichung davon (ΔB_m) dargestellt:

$$\Delta B_m = B_m - B_{ref}$$

Der variable Term ΔB ergibt sich aus zwei Termen, die einmal den summierten Effekt der Abweichungen der Lufttemperatur (T_k) der zwölf Einzelmonate (k) vom Referenzjahresgang der Lufttemperatur ($T_{ref,k}$) und zum Zweiten den summierten Ef-

fekt der Abweichung des Monatsniederschlags (P_k) vom Jahresgang des Referenzjahres ($P_{ref,k}$) betrachten.

$$\Delta B_m = \sum_{k=01}^{12} \left[C_{T,k} (T_k - T_{ref,k}) + C_{P,k} \left(\frac{P_k}{P_{ref,k}} - 1 \right) \right] + H_m$$

Die zu bestimmenden Koeffizientenmatrizen $C_{T,k}$ und $C_{P,k}$ ergeben multipliziert mit der Abweichung des Klimatelements im betrachteten Monat die Abweichung der Massenbilanz vom Referenzjahresgang. Dabei wird nur der lineare Anteil also der erste Term einer theoretischen Taylorentwicklung betrachtet und alle nichtlinearen Anteile werden im Term H_m approximiert. H_m wird bei den weiteren Betrachtungen vernachlässigt. Entsprechend der Taylorentwicklung ergeben sich die Koeffizienten der Matrizen für Temperatur und Niederschlag aus den Gradienten der Änderung der Massenbilanz (B) bei entsprechender Änderung des Klimatelements im betrachteten Monat (k) zu

$$C_{T,k} = \frac{\partial B}{\partial T_k} \approx \frac{B_{k,T+1} - B_{k,T-1}}{2} \quad \text{und} \quad C_{P,k} = \frac{\partial B}{\partial \left(\frac{P_k}{P_{ref,k}} \right)} \approx 10 \cdot \frac{B_{k,P=1,1} - B_{k,P=0,9}}{2}$$

Der Jahresgang der Temperatur und des Niederschlages bei ausgeglichener Massenbilanz (B_{ref}) ergibt sich, in dem das Temperaturregime im Zeitraum so lange durch Addition eines konstanten Wertes verändert wird, bis die modellierte Massenbilanz im Referenzzeitraum ausgeglichen ist. Am Glaciar Lengua erhält man ausgehend vom Gradtagmodell eine ausgeglichene Massenbilanz für den Zeitraum 2000/01 bis 2002/03 bei einem Versatz von -0.446 K. Abb. 4 zeigt die Charakteristik der Koeffizientenmatrix $C_{P,k}$ und $C_{T,k}$ für die drei Gletscher Hintereisferner (Österreich), Nigardsbreen (Norwegen) und Franz-Josef-Glacier (Neuseeland) im Vergleich zum Glaciar Lengua. Zur bes-

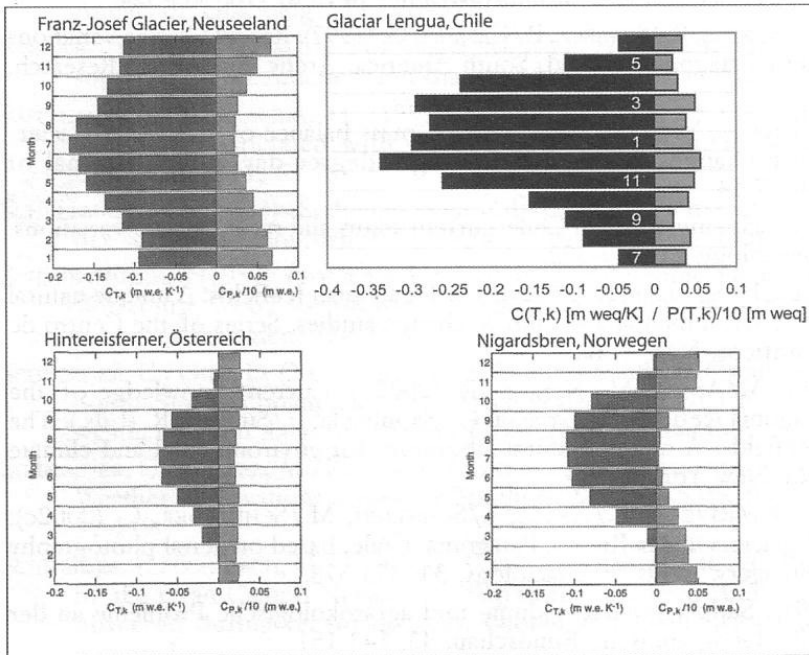


Abb. 4:
Klimasensitivitätsmatrix von Franz-Josef-Gletscher, Glaciar Lengua, Nigardsbreen und Hintereisferner (verändert und ergänzt aus: Oerlemans/Reichert 2000)

seren Vergleichbarkeit sind Sommer- und Winterhalbjahr bei den beiden südhemisphärischen Gletschern Franz-Josef-Glacier und Glaciar Lengua um ein halbes Jahr verschoben.

Die Sensitivität bezüglich der Variationen der Temperatur am Glaciar Lengua weist einen ähnlichen Jahresgang auf wie am Franz Josef Glacier. Diese beiden Gletscher weisen eine hohe Sensitivität bezüglich Temperaturverschiebungen auch für die Wintermonate auf, was die hohe Maritimität an beiden Standorten belegt. Alle anderen von OERLEMANS/REICHERT (2000) untersuchten Gletscher sind in weniger humiden und weniger ozeanischen Klimaten gelegen und haben keine entsprechend ausgeprägte Sensitivität bezüglich der Wintertemperaturen. Am Glaciar Lengua ist die Temperatursensitivität in den Jahren 2000/01 bis 2002/03 etwas asymmetrisch mit hoher Sensitivität vor allem auch im Herbst (März und April). Darüber hinaus sind die Werte der Temperatursensitivität am Glaciar Lengua absolut fast doppelt so hoch wie am Franz Josef Glacier. Das Klimaregime in den südwestlichen patagonischen Anden ist also noch extremer als im Süden Neuseelands mit höherem mittlerem Niederschlag (vgl. Kap. 1) und daraus resultierend höherem Massenumsatz.

Danksagung

Die Arbeiten am Gran Campo Nevado wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (Fördernummer Schn 680 1/1) finanziert. Der Autor dankt PD Dr. Rolf KILIAN, Trier, für die langjährige wissenschaftliche Zusammenarbeit und Koordination der Projektgruppe. Die verwendeten Klimadaten wurden von Ing. Ariel SANTANA, Punta Arneas, und Prof. Dr. Gino CASASSA, Valdivia, bereitgestellt.

Literatur

- ACEITUNO, P. (1988): On the functioning of the southern oscillation in the South American Sector. Part I: Surface Climate. *Monthly Weather Review*, 116, 505-524.
- ANIYA, M./SATO, H./NARUSE, R./SKVARCA, P./CASASSA, G. (1997): Recent Glacier Variations in the Southern Patagonia Icefield, South America. *Arctic and Alpine Research*, 29, 1-12.
- BRAITHWAITE, R. J./ZHANG, Y. (2000): Sensitivity of mass balance of five Swiss glaciers to temperature changes assessed by tuning a degree-day model. *Journal of Glaciology*, 46, 7-14.
- CASASSA, G. (1995): Glacier inventory in Chile: current status and recent glacier variations. *Annals of Glaciology*, 21, 317-322.
- CASASSA, G./SPULVEDA, F./SINCLAIR, R. (2002a): The Patagonian Icefields: A unique natural laboratory for environmental and climate change studies. Series of the Centro de Estudios Científicos. New York.
- CASASSA, G./RIVERA, A./ANIYA, M./NARUSE, R. (2002b): Current knowledge of the southern Patagonia icefield. In: Casassa, G./Sepulveda, F./Sinclair, R. (Eds.): *The Patagonian icefields: A unique natural laboratory for environmental and climate change studies*. New York, 67-83.
- CASASSA, G./SMITH, K./RIVERA, A./ARAOS, J./SCHNIRCH, M./SCHNEIDER, C. (2002c): Inventory of glaciers in isla Riesco, Patagonia, Chile, based on aerial photography and satellite imagery. *Annals of Glaciology*, 34, 373-378.
- ENDLICHER, W. (1991): Südpatagonien – klima- und agrarökologische Probleme an der Magallanstraße. *Geographische Rundschau*, 43, 143-151.

- HARRISON, S./WINCHESTER, V. (2000): Nineteenth- and twentieth-century Glacier Fluctuations and Climatic Implications in the Acro and Colonia Valleys, Hielo Patagonico Norte, Chile. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 32, 55-63.
- HOCK, R. (2003): Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of Hydrology*, 282, 104-115.
- HOLMLUND, P./FUENZALIDA, H. (1995): Anomalous glacier responses to 20th century climatic changes in Darwin Cordillera, southern Chile. *Journal of Glaciology*, 41, 465-473.
- JÓHANNESSON, T./SIGURDSSON, O./LAUMANN, T./KENNETT, M. (1995): Degree-day glacier mass-balance modelling with applications to glaciers in Iceland, Norway and Greenland. *Journal of Glaciology*, 41, 345-358.
- LLIBOUTRY, L. (1998): Glaciers of the wet Andes. In: Williams, R. S./Ferrigno, J. (eds.): *Glaciers of South America*. U.S. Geological Survey Professional Paper, (1386)1. Washington, I148-I206.
- MARSHALL, G. J. (2003): Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses. *Journal of Climate*, 16, 4134-4143.
- OERLEMANS, J. (2001): *Glaciers and climate change*. Tokyo.
- OERLEMANS, J./REICHERT, B. K. (2000): Relating glacier mass balance to meteorological data by using seasonal sensitivity characteristic. *Journal of Glaciology*, 46, 1-6.
- OHMURA, A. (2001): Physical basis for the temperature-based melt-index method. *Journal of Applied Meteorology*, 40, 753-761.
- PETERSON, R. G./WHITE, W. B. (1998): Slow oceanic teleconnections linking the Antarctic Circumpolar Wave with the tropical El Nino-Southern Oscillation. *Journal of Geophysical Research*, 103, 24573-24583.
- PORTER, C./SANTANA, A. (2003): Rapid 20th Century retreat of Ventisquero Marinelli in the Cordillera Darwin Icefield. *Anales Instituto Patagonia*, 31, 17-16.
- RIGNOT, E./RIVERA, A./CASASSA, G. (2003): Contribution of the Patagonia Icefields of South America to sea level rise. *Science*, 302, 434-437.
- RIVERA, A./ACUNA, C./CASASSA, G./BROWN, F. (2002): Use of remotely sensed and field data to estimate the contribution of Chilean glaciers to eustatic sea-level rise. *Annals of Glaciology*, 34, 367-372.
- ROSENBLÜTH, B./FUENZALIDA, H./ACEITUNO, P. (1997): Recent temperature variations in southern South America. *International Journal of Climatology*, 17, 67-85.
- RUTLLANT, J./FUENZALIDA, H. (1991): Synoptic aspects of the central Chile rainfall variability associated with the southern oscillation. *International Journal of Climatology*, 11, 63-76.
- SCHHELLMANN, G. (2003): Südpatagonien. Gletschergeschichte in einem Trockengebiet der südhemisphärischen Mittelbreiten. *Geographische Rundschau*, 55, 22-27.
- SCHMIDTHÜSEN, J. (1957): Probleme der Vegetationsgeographie. Deutscher Geographentag Würzburg, 29.07.–05.08.1957. Tagungsbericht und wissenschaftliche Abhandlungen. Wiesbaden, 72-84.
- SCHNEIDER, C./GIES, D. (2004): Effects of El Nino-Southern Oscillation on southernmost South America precipitation at 53°S revealed from NCEP-NCAR reanalyses and weather station data. *International Journal of Climatology*, 24, 1057-1076.
- SCHNEIDER, C./GLASER, M./KILIAN, R./SANTANA, A./BUTOROVIC, N./CASASSA, G. (2003): Weather observations across the Southern Andes at 53°S. *Physical Geography*, 24, 97-119.
- SCHNEIDER, C./SCHNIRCH, M./ACUÑA, C./CASASSA, G./KILIAN, R. (2005a): Glacier inventory of the Gran Campo Nevado Ice Cap in the Southern Andes and glacier changes observed during recent decades. *Global and Planetary Change*. Provisionally accepted.

- SCHNEIDER, C./KILIAN, R./GLASER, M. (2005b): Energy balance in the ablation zone during the summer season at the Gran Campo Nevado Ice Cap in the Southern Andes. *Global and Planetary Change*. Provisionally accepted.
- STRELIN, J./TURRASPE, R. (2005): Recent evolution and mass balance of Cordón Martial Glaciers, Cordillera Fuegoina Oriental. *Global and Planetary Change*. Provisionally accepted.
- TUHKANEN, S./HYVÖNEN/KUOKKA, J./STENROOS, S./NIEMELÄ, J. (1990): Tierra Del Fuego as a Target for Biogeographical Research in the Past and Present. *Anales Instituto Patagonia, Serie Ciencias Naturales*, 19, 5-107.
- TURNER, J. (2004): El Nino-Southern Oscillation and the Antarctic. *International Journal of Climatology*, 24, 1-31.
- WARREN, C./ANIYA, M. (1999): The calving glaciers of southern South America. *Global and Planetary Change*, 22, 59-77.
- WEISCHET, W. (1996): Regionale Klimatologie Teil 1 – Die Neue Welt. Stuttgart.
- WENZENS, G. (1999): Fluctuations of outlet and valley glaciers in the Southern Andes (Argentina) during the Past 13,000 years. *Quaternary Research*, 51, 238-247.
- WINCHESTER, V./HARRISON, S. (1996): Recent oscillations of the San Quintin and San Rafael glaciers, Patagonian Chile. *Geografiska Annaler*, 78, 35-49.