

Schnee im Klimawandel

Snow and Climate Change

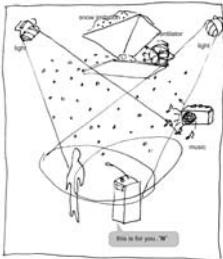
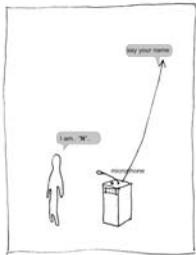
REINHARD BÖHM

Einleitung

Eines der in der aktuellen öffentlichen Debatte über den Klimawandel im Zentrum des Interesses stehenden Klimaelemente ist das Wasser. In einem Gebirgsland wie Österreich mit seiner starken Verbundenheit mit dem alpinen Tourismus steht dabei das Wasser in seiner festen Form im Vordergrund – sei es das Eis der Gletscher, sei es der Schnee der Skipisten. Es liegt nahe zu erwarten, dass die Menge und die Länge des Vorkommens von Schnee in dem erwarteten künftigen wärmeren Klima, zu dem seit einigen Jahrzehnten nun wir selbst beitragen, abnehmen werden. Da den langfristigen Klimatrends kurzfristige Schwankungen, Pendelungen auf allen Zeitskalen und auch extreme Ausreißer überlagert sind, ist jedoch weder das zweifelsfreie Erkennen von Trends, noch deren prozentuelle Zuordnung zu den Kategorien „natürlich“ und „anthropogen“ (=menschlich verursacht) einfach durchzuführen. Und auch die genauen Wirkungs-Mechanismen im vielfach verflochtenen, positiv und negativ rückgekoppelten Klimasystem sind noch nicht zur Gänze verstanden. Gerade der Niederschlag und hier speziell die Unterscheidung in die feste und flüssige Phase machen noch gehörige Probleme in der Klimasimulation, auch wenn diese in den leistungsfähigsten Rechenanlagen laufen, die zu Recht die Bezeichnung „Supercomputer“ tragen.

Introduction

One of the most widely discussed climate elements in the current debate on climate change is water. In a mountainous country like Austria, where alpine tourism plays a major role, interest is focused on water in its solid form – as ice of glaciers, or as snow on the ski-slopes. It is obviously to be expected that the amount of snow and the duration of its availability will decrease with ongoing global warming, a phenomenon to which humankind has contributed in recent years. Long-term climate trends are subject to temporary variations, oscillations on all time-scales and extreme outliers making both the recognition of certain trends and their classification by percentages in categories of ‘natural’ and ‘anthropogenic’ (man-made) anything but simple. Moreover, what effects these mechanisms have on the highly intricate climate systems has not yet been completely understood – particularly because it is full of self-intensifying or self-stabilizing processes. It is, above all, precipitation, and in this particular case the differentiation between the solid and liquid phases which continue to cause climate simulation considerable problems, even when the most efficient computers, known appropriately enough as ‘super computers’, are employed.



Vadim Fishkin
snow_snow
2000
Installation / Audio und Computer
System, Ventilator, Polyfoam

Courtesy: Galerie Gregor Podnar, Laibach/Berlin

Es soll hier ein kurzer und damit notwendigerweise unvollständiger Versuch unternommen werden, die Grundmechanismen des Klimas und vor allem die der Rolle des Wassers im Klimasystem zu skizzieren und einige daraus folgende empirische Tatsachen über deren vergangene Veränderungen darzustellen und zu diskutieren. Im Vordergrund wird dabei naturgemäß der Alpenraum, im speziellen Kitzbühel stehen. Der kontinentale und globale Background wird dabei allerdings nicht zu vernachlässigen sein, da er die Rahmenbedingungen für das absteckt, was regional und lokal das Klima beeinflusst. Für diejenigen der Leser dieser Zeilen, die weiter in die Tiefe gehen wollen, ist am Schluss ein Verzeichnis für weiterführende Literatur angegeben. Ich kann nur dazu ermuntern, dieses auch zu nutzen, vor allem aus einem Grund: Beim Klimawandel handelt es sich um ein naturwissenschaftliches Thema, das allerdings seit einigen Jahren sehr von einer recht emotionalen öffentlichen Debatte zugedeckt ist, die für rationale Argumente kaum Raum lässt. Gerade diese sollten aber beim Verstehen Wollen der Natur im Vordergrund stehen, nicht das für wahr Halten von Glaubensdogmen über „die Klimakatastrophe“, über „Schuld“ und „Buße“ wenn es doch um „Ursachen und Wirkungen“ einer Veränderung unserer Umwelt und um deren möglichst rationale Bewältigung gehen sollte.

An den Anfang unserer Betrachtung sei die Klimawandelkurve schlechthin gestellt: diejenige der Temperatur. Zwar ist das Klima mehr als die Temperatur allein – Sonnenschein, Bewölkung, Wind, Feuchte und natürlich der Niederschlag stellen die Grundelemente der breiten Palette dar, auf der sich das Klima manifestiert. Im Hinblick darauf, dass wir uns zurzeit Sorgen über die beobachtete und auch für die Zukunft erwartete Erwärmung machen, macht es trotzdem Sinn, sich zunächst diese Rahmenbedingung für den „Klimawandel“ anzusehen. Auf den Ort Kitzbühel bezogen wurden mit Hilfe der Vergleichsreihen einer alpenweiten Klimadatenbank die für Kitzbühel und den Hahnenkamm selbst nur für wenige Jahrzehnte direkt gemessenen Klimadaten auf einen wesentlich längeren Zeitraum ausgedehnt. Das ist möglich, da der Großraum Alpen zu denjenigen Gebieten der Erde gehört, die am reichsten mit langfristigen Klimadaten gesegnet sind. Bis 1760 reicht die „instrumentelle Periode“ hier zurück – in globaler Abdeckung sind historische Klimamesswerte ledig-

This article is a brief and thus necessarily incomplete attempt to provide an overview of the basic mechanisms of our climate and, above all, to trace the role of water in this climate system. Various resulting empirical facts with reference to past changes will also be presented and discussed. Naturally, the focus will be on the alpine region and, of course, Kitzbühel. Nevertheless, the continental and global background will certainly not be neglected, since it provides the framework for those phenomena influencing the climate on a local and regional level. For readers wishing to delve further into this subject a list of additional literature can be found at the end of this article. I can only encourage readers to make use of this, for one reason above all: climate change is a scientific question and in recent years it has been the subject of a highly emotional public debate in which rational arguments have barely had a hearing. Yet it is precisely reason which should govern the wish to understand nature, and not a dogmatic belief in the 'climate catastrophe', in 'guilt' and 'punishment'. We are dealing with the causes and effects of a change in our environment and we should deal with this problem rationally.

First we must consider the climate change curve per se, i.e. that pertaining to temperature. Although climate is far more than simply temperature – sunshine, clouds, wind, humidity and, of course, precipitation are the basic elements of a wide range of factors in which climate manifests itself. Bearing in mind our current worries regarding both observations already made and the global warming expected for the future, it is nevertheless worthwhile considering the parameters in which 'climate change' takes place. As far as Kitzbühel itself is concerned, it was possible to extend the data for Kitzbühel and the Hahnenkamm, which has only been measured directly for a few decades, to cover a far longer time period thanks to the comparative series of a climate data-bank covering the whole alpine region. This was made possible by the fact that the alpine region is among those regions on earth for which long-term climate data is readily available. The 'instrumental period' dates back to 1760 there – historical climate data on a global basis is only available from the

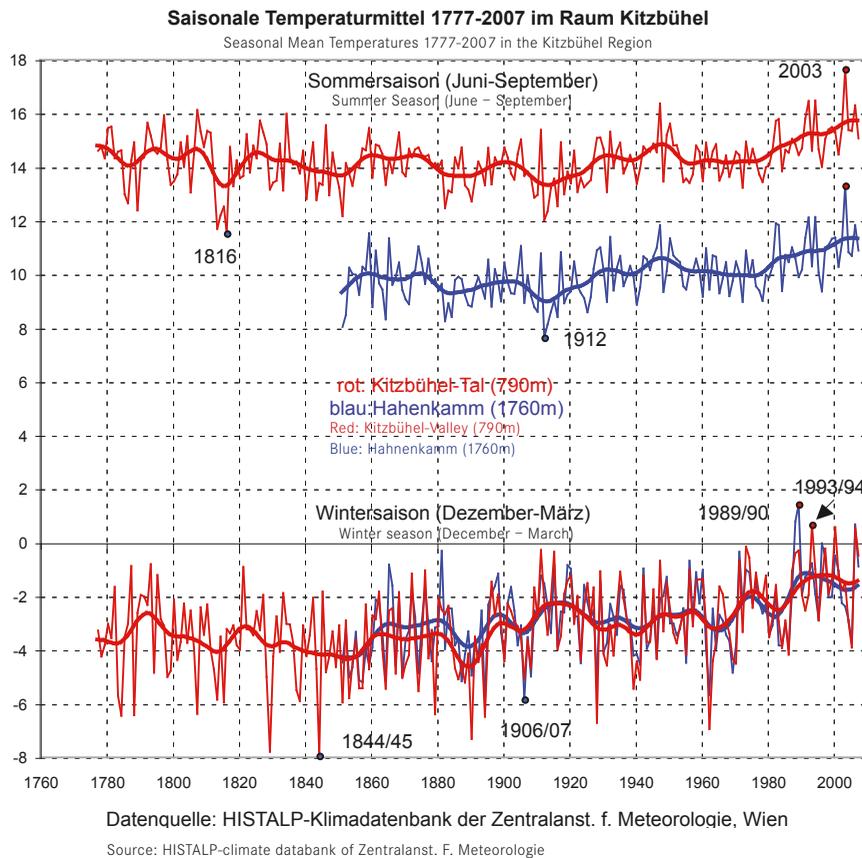


Abb.1.
Langjährigen Temperaturzeitreihen für Kitzbühel-Tal (790m, rot) und für den Hahnenkamm (1760m, blau) für die Sommersaison (Juni-September) und die Wintersaison (Dezember bis März).
Dünn: Einzeljahre, dick: 20jährig geglättet.
Kompositreihen aus (kürzeren) direkten Messungen vor Ort und den langen regionalen Klimareihen der HISTALP-Datenbank
Figure 1:
Long-term temperature time series for Kitzbühel-Valley (790m, red) and for the Hahnenkamm (1760m, blue) for the summer season (June - September) and the winter season (December - March).
Thin: individual years, thick: 20 years smoothed.
Composite series of the (shorter) direct local measurements and the long regional time series of the HISTALP-databank.

lich zurück bis in die 1850er Jahre vorhanden. Für die Täler in der Gegend Kitzbühels kann man den Temperaturverlauf zurück bis 1777 rekonstruieren, für die Berge über 1500m kommt man zurück bis 1851.

Die Rekonstruktion wurde für alle Monate des Jahres gemacht – in Abbildung 1 gezeigt werden die Mittel über die vier Sommermonate (Juni bis September) und die vier Wintermonate (Dezember bis März). Dies entspricht am ehesten den beiden Saisonen, die für den Sommer- und den Wintertourismus typisch sind, der ja für den Alpenraum generell und ganz besonders für eine Stadt wie Kitzbühel zu den Hauptantreibern der Wirtschaft zählt und damit zur Lebensgrundlage der Menschen in der Region wesentlich beiträgt. Die Abbildung zeigt jeweils die Einzeljahre bis herauf zum Sommer 2007

1850s onwards. The course of the temperature changes occurring in the valleys in the Kitzbühel region can be reconstructed back to 1777, for mountains over 1500m to 1851.

The reconstruction has been made for every month of the year – figure 1 illustrates the means during the four summer months (June to September) and the four winter months (December to March). This corresponds best with the two seasons typical for summer and winter tourism. For the alpine regions in general and most especially for a town like Kitzbühel, tourism is one of the major driving-forces in the local economy and thus makes a vital contribution to the standard of living of the local population. Figure 1 shows the individual years as far as summer 2007 and winter 2007/8 (the thin lines) and the smoothed course (the thick lines).

bzw. zum Winter 2007/08 (die dünnen Linien) und den geglätteten Verlauf (die dicken Linien). Für Mathematiker sei gesagt, dass die Glättung mit einem Gaußschen Tiefpassfilter von 20 Jahren Filterweite vorgenommen wurde. Die geglätteten Verläufe der Kitzbüheler Temperaturkurven sind übrigens sehr ähnlich allen anderen aus dem Großraum Alpen, nur in den Einzeljahren oder Monaten gibt es größere regionale Unterschiede.

Sehr schön zu sehen ist in der Abbildung eine der Grundtatsachen aller Klimakurven, die zu den meisten Missverständnissen in der öffentlichen Klimadebatte führt: die starke kurzfristige Variabilität von Jahr zu Jahr (die dünnen Kurven), die viel stärker ausgeprägt ist als der langfristige Trend (die dicken Kurven). Das ist bei allen anderen Klimatelementen auch der Fall, weshalb die so oft gehörten Argumente wie „dieser warme (kalte) Winter ist ein Beweis für das tatsächliche Vorhandensein (für das Nicht-Vorhandensein) des Klimawandels“, oder „dieses Unwetter zeigt, dass das Klima immer extremer wird“, alles andere als stichhaltige Argumente sind.

Der langfristige Temperaturverlauf ist es, um den es in der Klimadebatte geht, nicht das statistisch zufällige Auf- und Ab von Jahr zu Jahr (Monat zu Monat, Tag zu Tag...). Dieser ist in den letzten 230 Jahren gekennzeichnet durch eine zunächst schwache Abkühlung in den ersten 100 bis 130 Jahren von ca. 1°C, die im 20. Jahrhundert von einer stärkeren Erwärmung um rund 2°C abgelöst worden ist. Generell war das 19. Jahrhundert kälter als das 20., den beschriebenen Jahrhunderttrends sind jedoch Pendelungen auf der Zeitskala von Jahrzehnten überlagert, die für Sommer und Winter unterschiedlich sind. So war die Periode mit den strengsten Wintern die 1890er Jahre, während die kühleren Sommer erst in den 1910er Jahren auftraten. Im Sommer wurde ein erstes Hauptmaximum in den späten 1940er- bis frühen 1950er Jahren erreicht – ganz typisch dafür ist der in der Abbildung zu sehende legendäre Sommer von 1947, von dem die Veteranen der Bergsteiger heute noch schwärmen. Er wurde erst wieder in den frühen 1980ern erreicht, und schließlich vom alpenweit außerordentlichen Sommer 2003 noch deutlich übertroffen. Wir nehmen heute an, dass der Sommer 1947 wohl der letzte für längere Zeit gewesen ist, der ein extremes Ereignis des natürlichen Klimas darstellte, während das Temperaturniveau

Mathematicians please note that the smoothing has been undertaken with a Gauss low pass filter of 20 years filter width. Moreover, the smoothed course of the Kitzbühel temperature curves share strong similarities with all other such curves in the Alpine region and regional differences only occur in individual years or months.

Figure 1 clearly highlights one of the basic factors of climate curves in general and which provokes the majority of misunderstandings in the public debate on climate change: the considerable variability from year to year (the narrow curves), are far more distinctive than the long-term trend (the thick curves). The same applies to all other climate elements and provides the basis for such frequently heard comments as 'this warm (cold) winter is proof of the existence (non-existence) of climate change', or 'this storm proves the climate is getting more and more extreme'. Such arguments are totally devoid of scientific validity.

In point of fact, it is the long-term temperature trend and not the statistically random high's and low's from year to year (month to month, day to day...) that counts in the climate debate. Over the past 230 years temperature trends have been characterised by slight cooling down of approximately 1°C in the first 100 to 130 years. In the 20th century this trend gave way to a considerable warming of some 2°C. Generally speaking, the 19th was colder than the 20th century. Nevertheless, the trends for the centuries described are superimposed by decadal scale oscillations which differ for summer and winter. Thus the period with the hardest winters was the 1890s, whilst the coolest summers first appeared in 1910s. A first maximum high in summer was recorded from the late 1940's to the early 1950's – the legendary summer of 1947, clearly visible in figure 1, is typical of this development and veteran mountaineers rave about it to this day. Comparable summers did not return until the early 1980s, and were clearly surpassed throughout the entire alpine region by the truly exceptional summer of 2003. It is currently believed that the summer of 1947 was probably the last to represent an extreme occurrence in the framework of the natural climate.

des Sommers 2003 bereits durch uns selbst mit verursacht worden ist.

Der Vergleich der (blauen) Hahnenkammkurven mit den (roten) vom 1000m tiefer liegenden Kitzbühel selbst zeigen einen beinahe identischen geglätteten Verlauf der dicken Kurven. Das heißt, die Erwärmung der Hochlagen verlief nicht stärker als die im Tal, wie oft behauptet wird. Dieser Befund gilt nicht nur für Kitzbühel-Hahnenkamm, sondern generell für den gesamten Großraum Alpen. Die Erwärmung im 20. Jahrhunderts betrug überall etwa 2°C – sowohl in Marseille, Regensburg, Mailand oder Wien, als auch an den höchsten alpinen Klima-Observatorien in 2500 bis 3500m Höhe von Zugspitze über Sonnblick bis Säntis und Jungfrau-joch.

Überraschen wird wohl das in der Abbildung sichtbare praktisch gleich hohe Temperaturniveau der Tal- und der Bergstation im Winter, während wir im Sommer den gewohnten Temperaturunterschied sehen. Auch in Kitzbühel treten im Winter oft die typischen Inversionslagen auf, wenn vor allem bei windschwachem Schönwetter sich im Tal stabile „Kaltluftseen“ bilden während die mittleren Höhenlagen um 1500m häufig sogar wärmer sind als der Talboden, über dem sich die (schwerere) Kaltluft ansammelt, oft noch zusätzlich durch eine Hochnebeldecke von der klaren und wärmeren Bergluft isoliert. Bei Durchzug einer Wetterfront, die Schnee bringt, durchmischen sich allerdings auch im Winter die Luftmassen, und es wird wieder kälter auf den Bergen und meist wärmer im Tal – weshalb auch im Winter der Niederschlag in den Bergen eher als Schnee fällt, als im Tal, obwohl es dort – über alle Tage gerechnet – gar nicht kälter ist.

Einige Grundtatsachen über das Wasser

In unserem Sonnensystem ist die Erde der einzige Planet, der an seiner Oberfläche, in seiner Luft-hülle und in seinen Ozeanen Wasser in allen drei Aggregatzuständen – fest, flüssig und gasförmig – beherbergt. Nur hier auf unserem Planeten erlauben das die Druck- und Temperaturverhältnisse, und es finden auch ständig Übergänge zwischen fest, flüssig und gasförmig statt. Diese Tatsache erschwert das Leben der Wetter- und Klimamodellere ungemein – eine Atmosphäre ohne Phasenübergänge, am besten ganz ohne Wasser wäre viel

On the other hand, humankind certainly made an effective contribution to the temperature levels reached during 2003.

The comparison of the (blue) Hahnenkamm-curve with that (red) of Kitzbühel, located 1000m lower, shows an almost identically smoothed course of the thick curves. This signifies that warming at high altitudes was not taking place faster than in the valleys, as is often stated. This observation is valid not only for Kitzbühel-Hahnenkamm, but for the alpine region in general. In the 20th century warming was everywhere measured at around 2°C – be it in Marseille, Regensburg, Milan or Vienna or at one of the highest alpine climate observatories at an altitude of 2500 to 3500m from Zugspitze via Sonnblick to Säntis and Jungfrau-joch.

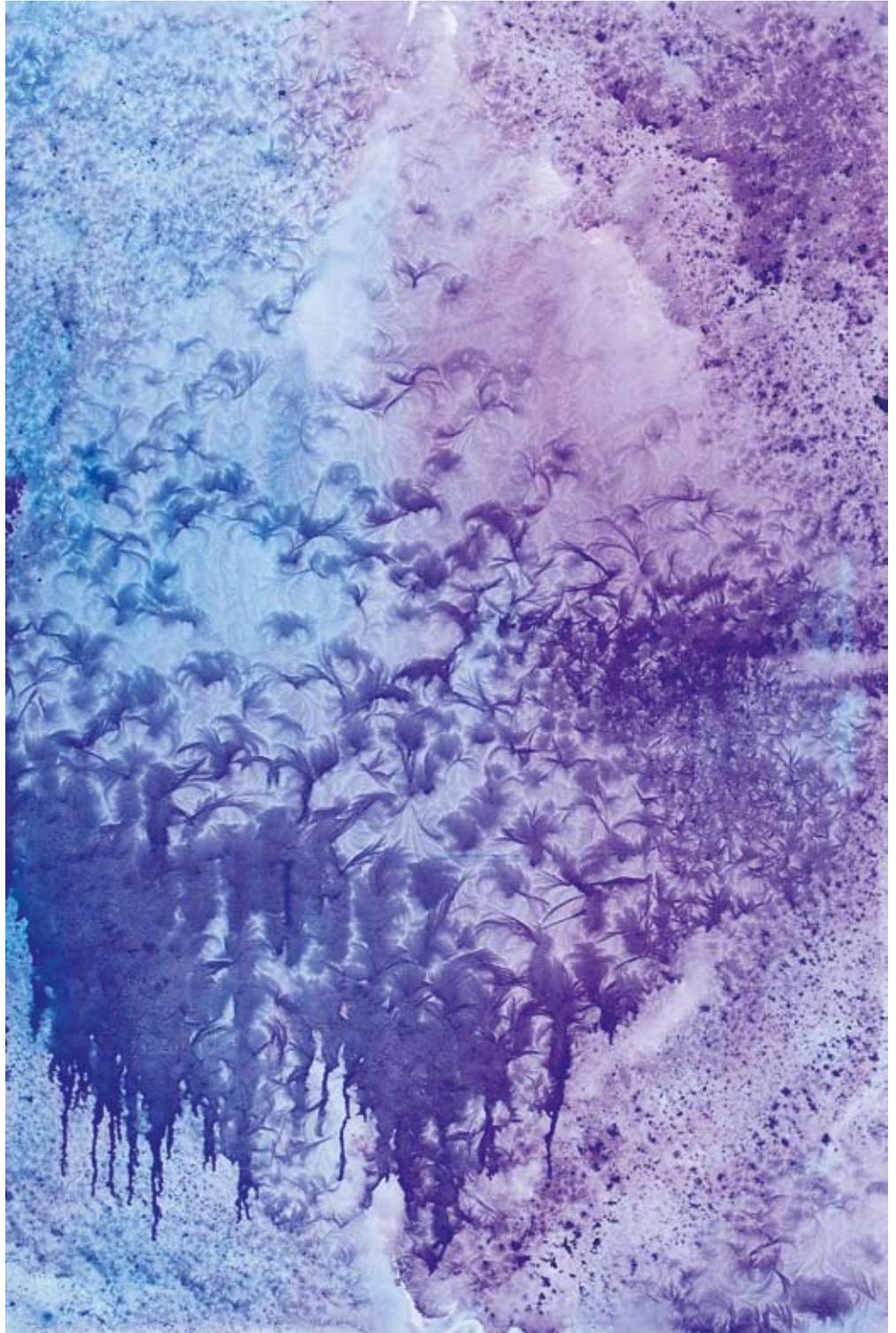
Figure 1 illustrates a surprising fact: the valley and the mountain station have practically the same temperature in winter, whilst in summer the customary difference in temperature is visible. Typical inversions also form in Kitzbühel in winter; this usually happens in good weather with practically no wind, when stable 'cold air pools' develop, whilst at medium altitudes around 1500m it is frequently warmer than in the valleys, over which heavy, cold air accumulates and is insulated by a high-fog cover from the clear and warmer mountain air. When a cold front comes bringing snow, the air masses mix thoroughly even in winter, and it becomes colder in the mountains and usually warmer in the valleys. For this reason, in winter precipitation in the mountains tends to fall as snow, rather than in the valleys, although it is – taking every day into consideration – by no means colder.

Some Basic Facts about Water

In our solar system the earth is the only planet to have water on its surface, in its atmosphere and in its oceans. Water occurs in all three states of aggregation – solid, liquid and gaseous. It is only here on our planet that pressure and temperature conditions are such as to permit this and transitions between solid, liquid and gaseous are continuously taking place. These facts make life difficult for the creators of weather and climate models; an atmosphere without phase transitions, at best completely



Wilhelm Scherübl
Minusaquarell indigo
2003
Wasserfarben auf Papier
150 x 100 cm



Wilhelm Scherübl
Minusaquarell blau-violett
2006
Wasserfarben auf Papier
150 x 100 cm

einfacher zu verstehen, in mathematische Formeln zu fassen und vorherzusagen. Andererseits gäbe es natürlich ohne Wasser das Leben in der uns bekannten Form überhaupt nicht, und damit auch keine Meteorologen, Hydrologen und Glaziologen, die sich mit seiner Lebhaftigkeit und seinen drei Phasen abmühen müssen.

Ein physikalisches Detail der Phasenübergänge zwischen den drei Formen von Wasser ist wichtig für die Existenz der Gletscher, des Schnees und des Meereises, da es wesentlich zu deren Erhaltung beiträgt. Es sind recht bedeutende Energiemengen nötig, um Schnee oder Eis zu schmelzen (Schmelzwärme) und noch etwa siebenmal soviel, um sie direkt zu verdunsten (Sublimationswärme). Zusammen mit der „Albedo-Rückkopplung“ (davon später mehr), sorgen die Schmelz- und die Sublimationswärme für eine starke Selbsterhaltungsfähigkeit einer Schneedecke bzw. eines Gletschers. Wollen wir etwa ein kg Eis von -1°C auf 0°C erwärmen, benötigen wir dazu eine Energie von 4.2 kJ (kilojoule). Bei weiterer Energiezufuhr, beispielsweise an einem schönen Sommertag im Hochgebirge, steigt aber die Temperatur des Eises zunächst nicht weiter an. Es muss erst die 80-fache Energiemenge zum Schmelzen des Eises benutzt werden. Erst wenn das erledigt ist, braucht man wieder lediglich 4.2 kJ um 1 kg des nun flüssigen Wassers von 0° auf 1°C zu erwärmen. Wie der Energieumsatz an der Schnee- oder an einer Gletscheroberfläche tatsächlich aussieht, kann hier nicht weiter ausgeführt werden – eines sei nur erwähnt: Auch ein sehr sommerlicher Schönwettertag in den Hochalpen reicht nicht aus, um flächig 1 kg Eis pro dm^2 Gletscherfläche abzuschmelzen. Zum direkten Verdunsten von 1 kg Eis wäre sogar 540mal soviel Energie nötig als man benötigt um die Temperatur um 1°C zu erhöhen. Derartige Energiemengen stehen an Alpengletschern kaum zur Verfügung. Sublimation findet in nennenswerten Mengen typischerweise an tropischen Hochgebirgsgletschern statt. Speziell wenn die Luft sehr trocken ist, können dann etwa in den Anden oder auf dem mexikanischen Popocatepetl die spitzen Formen der Eisverdunstung erscheinen, die man Bűberschnee (spanisch „nieve de los penitentes“) nennt. Dreht dann der Wind und bringt feuchtere Luftmassen heran, in den Anden etwa aus dem Amazonastiefland, verschwinden die Penitentes wieder, und die Gletscheroberfläche wird wieder glatt.

without water would be far easier to understand, to express in mathematical formulae and to predict. On the other hand, without water there would be no life as we know it, and so no meteorologists, hydrologists or glaciologists who have to deal with its vivacity and its three phases. One physical detail of the phase transitions between the three forms of water is important for the existence of glaciers, snow and of ice in the oceans, since it is essential for their preservation. Considerable amounts of energy are necessary to melt snow or ice (melting warmth) and seven times as much energy is needed to turn them to vapour (sublimation warmth). Melting warmth and sublimation warmth are responsible, together with the 'albedo feedback' (more about that later), for the pronounced capacity for self-preservation of a snow-cover or glacier. Energy equivalent to 4.2 kJ (kilo joule) is needed to melt approx. one kilo of ice from -1°C to 0°C . If additional energy is provided, e.g. on a hot summer's day at a high altitude in the Alps, the temperature of the ice does not immediately rise any further. To make this happen, eighty times the amount of energy needed to melt the ice before. Once this has been achieved, only the original 4.2 kJ is necessary again to warm 1 kg of the now liquid water from 0° to 1°C . It is not possible to give a more detailed account here of what the energy-turnover on the surface of the snow or glacier actually looks like. One point must, however, be mentioned: even a hot summer's day in the Alps is not sufficient to melt 1 kg ice per dm^2 glacier surface. In fact, some 540 times the amount of energy needed to raise the temperature 1°C would be necessary in order to directly cause this 1 kg ice to evaporate. Quantities of energy of such proportions are seldom on hand on Alpine glaciers. Typically sublimation takes place to a considerable extent on glaciers on tropical high mountains. Above all, when the air is very dry it is possible, for example in the Andes or on Popocatepeti in Mexico, to see the pointed forms created by the evaporation of ice. These are known as 'penitents snow' (or 'nieve de los penitentes' in Spanish). Should the wind change, bringing with it more humid air masses, in the Andes from the Amazon plain, then the 'penitentes' disappear and the surface of the glacier becomes flat once more.



Tiina Itkonen
White Anorak
2002
c-print
80 x 95 cm

Courtesy: Galerie Kashya Hildebrand, Zürich

	Volumen Volume	Fläche Expanse		Fläche Expanse		Fläche Expanse	
		Sommer* summer* Winter* winter*		Sommer* summer* Winter* winter*		Sommer* summer* Winter* winter*	
	% des Gesamteises % of total ice	Millionen km ² million km ²		% der Erde % of the earth		% der Landoberfläche % of land	
Inlandeis Inland ice	98.5	16.0	16.0	3.4	3.4	10.8	10.8
Gletscher Glacier	0.2	0.5	0.5	0.1	0.1	0.3	0.3
Fluss und Seeeis Rivers and ocean ice	<0.1	0.1	1.0	<0.1	0.2	0.1	0.7
Schnee Snow	<0.1	7.0	47.0	1.5	9.9	4.7	31.6
gesamt Land Total land	98.7	24.0	65.0	5.0	14.0	16.0	43.0
Meereis Ocean ice	0.3	28.0	20.0	5.9	4.2		
gesamt Land + Meer Total land + ocean	99.0	51.6	84.5	4.9	13.6		
Boden Ground							
dauernd gefroren permanently frozen	0.9	25.0	25.0	5.3	5.3	16.8	16.8
jahreszeitlich gefroren seasonal freezing	<0.1	0.7	54.0	0.1	11.4	0.5	36.3

Tab.1:
Die Kryosphäre: Maßzahlen der Eismassen und der Eisflächen der Erde
Quelle: Slaymaker and Kelly, 2007

Tab.1:
The cryosphere: Measurements of the ice masses and the ice covered areas of the earth
Source: Slaymaker and Kelly, 2007

* die Namen der Jahreszeiten beziehen sich auf die Nordhemisphäre
* the names of the seasons relate to the northern hemisphere

Zusammen mit dem an sich geringen Wärmeleitvermögen von Schnee stellt die Phasenenergie eine Art Polster dar, der dafür sorgt, dass zwei Wärmequellen bei Schnee- oder Eisbedeckung von der Atmosphäre abgeschirmt werden: der Wärmestrom aus dem Erdinneren und der Wärmestrom aus dem Wasser des Ozeans, der im nördlichen Polarmeer zwischen Island und Norwegen wie auf einem Förderband viel Wärme aus südlichen Gegenden heranliefert. In beiden Fällen blocken Schnee und Eis diese Wärmequellen ab und wirken, solange sie bestehen, wie ein Thermostat für den „Kühlschrank Arktis“, oder im Kleinen für eine Schipiste auf einem Gletscher, auf dem sich die winterliche Schneedecke länger hält, als in der nicht eisbedeckten Umgebung, wo nicht nur die Sonne von oben, sondern auch der Bodenwärmestrom von unten an ihr „knabbern“.

The phase transition energy combined with the low heat-conducting capacity of snow creates a kind of pillow ensuring that when the earth is covered in snow or ice two sources of warmth are shielded from the atmosphere: the heat flow from inside the earth and the heat flow from the water in the oceans which supplies the Arctic Ocean between Iceland and Norway with considerable warmth from the south on a conveyor-belt system. In both cases, snow and ice block out these sources of warmth and act, for the duration of their existence, like a thermostat for the ‘Arctic refrigerator’, or, on a smaller scale for a ski-slope on a glacier where the winter snowcover lasts longer than in the surroundings where there is no ice-cover and where not only the sun from above, but also the ground heat flow ‘nibble away’ at it.



**Bildimpressionen
vom Wasser in seinen
verschiedenen Formen**
Photographic impressions
of water in its various forms

Wasser in der Atmosphäre: Im Nebel und über dem Nebelmeer (links: im Rauriser Urwald, rechts: Blick von der Fleißscharte nach Westen über das Mölltal zum Großglockner) Fotos: G. Weyss

Water in the atmosphere: in mist and above a sea of fog (left: in the Rauris forest. Right: looking west from the Fleißscharte across the Mölltal to the Grossglockner).
Photos: G. Weyss



Wasser auf dem Boden
Water on the ground
Fotos photos: G. Weyss



**Eis auf dem Boden: Im Vorland des
Goldbergkeeses in den Hohe Tauern
haben in einer Mainacht die tiefen Tem-
peraturen Eiskristalle entstehen lassen**
Fotos: G. Weyss

Ice on the ground: Foreland of the Goldberg glacier in the Hohe Tauern range where low night temperatures in May caused snow crystals to form
Photos: G. Weyss

Auch die vier „Sphären“ der Erde, auf, an und in denen wir leben, unterscheiden sich in erster Linie durch ihre Aggregatzustände. Die „Lithosphäre“, der Gesteinsmantel ist an seiner Oberfläche, die wir besiedeln, beinahe überall fest. Nur ganz selten und auf verschwindend kleinen Flächen kann kurzzeitig flüssiges Gestein bei Vulkanausbrüchen an die Erdoberfläche kommen. Zwei Drittel unseres Planeten werden von Wasser in meist flüssiger Form bedeckt. Nur kleine Teile der Ozeane sind in den Polargebieten von schwimmendem Eis bedeckt. Die Atmosphäre schließlich ist überwiegend gasförmig, und enthält nur verschwindend geringe Mengen von flüssigem Wasser (Wolken- und Regentropfen) aber auch von anderen flüssigen Stoffen (Schwefelsäure zum Beispiel) und auch von festem Wasser in Form von Schneekristallen, Hagel, Graupel oder Eiskörnern.

Alle Arten von Eis und Schnee fasst man zum Begriff der „Kryosphäre“ zusammen, abgeleitet aus dem griechischen Wort *krýos* für Kälte, Frost. Tabelle 1 zeigt einige Zahlen über die Größenverhältnisse von Schnee und Eis auf der Erde.

Beinahe das gesamte Eisvolumen der Erde (98.5%) ist in den beiden Inlandvereisungen Grönlands und der Antarktis enthalten. Auch die anderen Eismassen der Erde, die auf der Wasseroberfläche von Flüssen, Seen und der polaren Ozeane schwimmen und die im Boden enthalten sind, fallen volumsmäßig kaum ins Gewicht. Sie bedecken aber große Flächen, allerdings mit starken jahreszeitlichen Schwankungen. Vor allem das Meereis und die Schneedecke sind neben den Inlandvereisungen Grönlands und der Antarktis für das Erdklima von großer Bedeutung, wie wir gleich erfahren werden. Im Nordwinter z.B. sind rund 30% der Landoberfläche der Erde von Schnee bedeckt, im Südwinter nur 5%.

Die Albedo-Rückkopplung

Einer der wirksamsten Einflüsse von Schnee- und Eisflächen auf das Klima (vor allem, wenn sie großflächig vorhanden sind, wie in den Polargebieten) besteht in dem Unterschied des für Schnee und Eis starken, für Wasser oder aperes Land geringeren Reflexionsvermögens der Energie-Einstrahlung von der Sonne. Man nennt diesen „Weißegrad“ einer Oberfläche auch „Albedo“, nach dem lateinischen Wort „*albus*“ für weiß. Ist die Erdoberfläche mit Schnee bedeckt, wird 70 bis 90, in Extremfällen

The earth's four 'spheres', on, in and by which we live, also vary primarily according to their state of aggregation. The lithosphere, the stone mantle on the surface which we occupy is hard almost everywhere. Only very rarely and in extremely small areas does liquefied rock reach the surface of the earth for short periods when a volcano is active. Two thirds of our planet is covered with water, mostly in a liquid form. Only small parts of the oceans in the polar regions are covered with floating ice. The atmosphere is mainly gaseous and comprises only tiny amounts of liquid water (clouds and rain drops) as well as of other liquid materials (sulphuric acid, for example), and also from solid water in the form of snow-crystals, hail, sleet or ice grains.

Ice and snow of any kind is referred to as 'cryosphere', a term derived from the Greek word *krýos*, meaning cold, frost. Table 1 illustrates the ratio of snow and ice on the earth.

Almost the entire volume of the earth's ice (98.5%) is contained in the two inland ice masses in Greenland and the Antarctic. The other masses of ice on the earth floating on the rivers, lakes and the Arctic and Antarctic Oceans or contained in the ground, are of scarce importance as far their volume is concerned. Even so they cover large areas, all be it with marked seasonal fluctuations. The ice in the oceans and the snowcover are, beside the inland ice masses in Greenland and the Antarctic, of major importance for the earth's climate. During the northern winter, for example, some 30% of the earth's land surface is covered by snow, during winter in the south this is only 5%.

The Albedo Feedback

One of the most effective ways in which expanses of snow and ice influence climate (above all, when they occur in large expanses as in the Arctic and Antarctic) results from the different capacities for reflecting the energy of the sun's radiation. This is more powerful in the case of snow and ice and weaker in water or snow-free ground. This is known as the 'degree of whiteness' or as 'albedo', a term derived from

sogar beinahe 100% der eingestrahnten Sonnenenergie von der Sonne zurückgeworfen und fällt somit als Wärmequelle aus. Auch schneefreie Eisflächen reflektieren noch, je nach dem Reinheitsgrad des Eises, 15 bis 50% der einfallenden Strahlung, mehrjähriger Schnee (Firn), wie er in polaren Gebieten und weiter südlich im Hochgebirge vorkommen kann, 40 bis 70%. Jedenfalls reflektieren alle Arten von Schnee und Eis deutlich mehr als aperen Oberflächen, die durchwegs zumindest 80% der Einstrahlung aufnehmen (absorbieren).

Besonders markant ist der Unterschied zu einer wenig bewegten Wasseroberfläche, deren Albedo bei nur 5% liegt. Der typische Zustand von polaren Meeren, besonders von denen um die Antarktis, ist aber der mit schaumgekrönten und sturmgepeitschten Wellen. Bezeichnenderweise werden diese geographischen Breiten von 40° bis 60° Süd auch „Roaring Forties“, „Howling Fifties“ und „Screaming Sixties“ genannt. Das kann die Albedo des Ozeans bis auf beinahe 15% erhöhen. Aber auch in diesen Fällen besteht immer noch ein deutlicher Unterschied zu schnee- oder eisbedeckten Flächen, die sich damit selbst vor einem Abtauen schützen.

the Latin *albus*, meaning 'white'. Where the earth's surface is covered in snow, from 70 – 90 %, in extreme cases nearly 100%, of the solar energy received is reflected by the sun, thereby losing its ability to act as a source of warmth. Snow-free ice surfaces also reflect, depending on the degree of purity of the ice, 15% to 50% of the incoming radiation. Snow lasting over a period of years (firn), as, for example, in the polar regions and further south at high altitudes, reflects 40 to 70%. At all events, all types of snow and ice reflect considerably more powerfully than snowfree surfaces, which always absorb at least 80% of the radiation. The difference to calm water surfaces which have an albedo of only 5%, is especially noteworthy. Yet, typically, the polar oceans, especially in the Antarctic, are characterised by white-crested, storm driven waves. It is not surprising, then, that the geographical latitudes between 40° and 60° S are nicknamed the 'Roaring Forties', 'Howling Fifties' and 'Screaming Sixties'. This increases the albedo of the ocean to almost 15%. Nevertheless, in these cases, too, a clear difference still exists to the snow or ice covered surfaces which protect themselves from melting with it.

Oberfläche Surface	Albedo Albedo von bis from to
trockener Schnee dry snow	80–97%
schmelzender Schnee melting snow	66–88%
Firn firn	43–69%
reines Eis pure ice	34–51%
leicht verschmutztes Eis slightly dirtied ice	26–33%
stark verschmutztes Eis extremely dirtied ice	15–25%
schuttbedecktes Eis ice covered in debris	10–15%
Tundra tundra	5–15%
Taiga taiga	6–19%
eisfreier Ozean ice-free ocean	3–14%

Tab.2. Albedo verschiedener Oberflächen (prozentuelle Rückstrahlung der kurzwelligen direkten und diffusen Einstrahlung). Das Foto des mittleren Keesbodens des Goldbergkeeses im Sonnblickgebiet (Hohe Tauern) zeigt verschiedene Oberflächen mit unterschiedlicher Albedo. Sehr weißer Neuschnee, ist von Altschnee, mehrjährigen Firnschichten und aperem Gletschereis durch deutlich erkennbare Linien getrennt. Diese „Schichtogiven“ stellen so etwas wie Jahrringe eines Gletschers dar.

Quellen: Paterson, 1994 (Zahlenwerte der Tabelle), W. Schöner, 2005 (das Foto)



Tab 2. Albedo of various surfaces (reflection in per cent of the direct and diffuse incoming radiation). The photo of the middle glacier floor of the Goldbergseekees in the Sonnblick area (Hohe Tauern) shows various surfaces with differing albedo. Extremely white new snow is separated by clearly recognisable lines from old snow, firn-layers built up over a number of years and aper glacier ice. These "Ogives" represent something akin to the tree-rings of a glacier.

Sources: Patterson, 1994 (Numerical values in the table), W. Schöner, 2005 (the photo)

Kommt es aus irgendeinem Grund, z.B. wie gerade jetzt durch den anthropogenen Treibhauseffekt, zu einer globalen Erwärmung und damit auch in den Polargebieten zu einem zunächst leichten Rückgang der Schneebedeckung und vor allem des Meereises, steht dort sprunghaft mehr Sonnenenergie zur Erwärmung zur Verfügung, und es wird lokal bis regional noch wärmer, als in anderen Gebieten des Globus, wo schon bisher kaum Schnee und Eis vorkam. Dadurch werden die aperen Gebiete noch größer und der Prozess schaukelt sich zur positiven „Albedo-Rückkopplung“ auf, einem selbstverstärkenden Effekt, der das Klima destabilisiert. Umgekehrt funktioniert die Albedo-Rückkopplung übrigens genauso - sie ist ein wesentlicher Bestandteil unseres Verständnisses, wie Eiszeiten entstehen.

Niederschlag – ein komplexer Prozess

Der nach der Temperatur gleich an zweiter Stelle der Aufmerksamkeit am Klima stehende Niederschlag ist ein vergleichsweise komplexerer Vorgang, dessen Entstehungslogik wir aber aus einigen physikalischen Grundbausteinen ableiten können. Wir wissen, dass es bei jeder Temperatur einen maximalen Wasserdampfgehalt gibt, bei dessen Erreichung Kondensation oder Sublimation stattfindet, also flüssiges Wasser oder Eis entstehen. Man spricht dann von 100% relativer Feuchte. Weiters wissen wir, dass dieser „Sättigungspunkt“ bei kälterer Luft viel früher erreicht wird, als bei warmer. Zusätzlich sagt uns ein anderer Grundbaustein, dass sich die Atmosphäre nach oben zu im allgemeinen abkühlt und zu guter Letzt müssen wir noch in Rechnung stellen, dass in der realen Atmosphäre permanent Wind weht, der nicht nur Luft transportiert, sondern auch den in ihr enthaltenen Wasserdampf.

Um diesen Wasserdampf zur Kondensation zu bringen, also aus dem gasförmigen Wasser flüssiges oder auch festes Wasser zu machen, muss lediglich die Temperatur der Luft abgesenkt werden. Das geschieht zum Beispiel in einer klaren Herbstnacht durch die starke Abkühlung in bodennahen Luftschichten, wodurch Nebel entstehen kann, eine dichte Ansammlung kleiner Tröpfchen von einem Durchmesser zwischen einem Hundertstel und einem Zehntel Millimeter.

Should for any reason, e.g. due to the current man-made greenhouse effect, global warming take place, whereby in the polar regions at first a slight decline in the snowcover and, above all, in the ocean ice occurs, then suddenly more solar energy is available for warming and it becomes locally or regionally warmer than in other parts of the globe, where snow and ice had hardly existed previously. In this way, the snowfree regions increase in size and the process builds itself up into a positive Albedo feedback. This effect is self-intensifying and destabilises the climate. Conversely the albedo feedback functions in the same way – it plays an essential role in our understanding of how the ice-ages came about.

Precipitation – a Complex Process

Next to the temperature, the second most important component of climate is precipitation. This involves a comparatively complex process, but the logic of its genesis can be deduced from a number of basic physical components. We know that at every temperature a specific maximum water evaporation content exists and when this is reached condensation or sublimation takes place, i.e. running water results. We then speak of 100% relative moisture. In addition we know that this 'saturation point' is reached earlier when the air is cold than when it is hot. A further basic component tells us that, generally speaking the atmosphere grows cooler with increasing altitude. Last but not least, we must remember that in the real atmosphere a wind permanently blows and that this not only transports air, but also the water vapour in the air. In order to make this water vapour condense, i.e. to produce liquid or solid water from water in its gaseous form, it is only necessary for the air temperature to sink. This happens, for example, in clear autumn nights when the layers of air near the ground cool down drastically. Thus mist or fog is able to develop, a dense collection of small droplets measuring between a hundredth and a tenth of a millimetre.

Zu ergiebigem Niederschlag führen allerdings derartige flache Nebelbänke nicht. Dazu bedarf es eines anderen Vorganges: dem der Hebung von Luftmassen, bei der sie sich ausdehnen und abkühlen und in einer bestimmten Höhe das „Kondensationsniveau“ erreichen. Da bei der Kondensation viel Energie (die Phasenenergie) frei wird, würde ein entstehendes winziges Wolkentröpfchen sofort wieder verdunsten, wenn die Phasenenergie nicht an ein bereits bestehendes größeres Tröpfchen oder an ein anderes Teilchen (z.B. ein Staubteilchen) abgeleitet werden kann. Teilchen in dieser Funktion werden von den Meteorologen „Kondensationskerne“ genannt und sind von fundamentaler Bedeutung für die Wolkenbildung. Wolken bestehen aus Eiskristallen oder aus flüssigen Tröpfchen, die durch ihre Größe von einem bis zwei hundertstel Millimeter gerade noch in der Luft schweben. Die zur Bildung der Tröpfchen vorausgesetzte Hebung der Luft, also eine Vertikalbewegung nach oben, hält auch noch die größeren Tropfen von einem halben bis mehr als einem Millimeter Durchmesser in Schwebelage, die durch Anlagerung oder Zusammenfließen der kleineren entstehen.

Was aber erzeugt die Aufwärtsbewegung? Dazu gibt es in der Erdatmosphäre zwei unterschiedliche Vorgänge. Der erste tritt an heißen, feuchten Sommertagen auf, wenn der Boden ähnlich einer Herdplatte die Luft erhitzt und diese aufzusteigen beginnt. Dieser Vorgang, den man „Konvektion“ nennt, führt zu Haufenwolken bis hin zu Gewitterwolken mit großer Vertikalstreckung. Die entstehenden „konvektiven Niederschläge“ sind kurz aber heftig und typisch für die Tropen, wo die steil einfallende Sonnenstrahlung besonders effektiv den Boden erwärmt. Konvektive Prozesse kommen aber auch dann zustande, wenn kalte polare Luftmassen über wärmere, südlichere Land- oder Meeresoberflächen streichen. Die Satellitenbilder zeigen bei konvektiven Vorgängen zellenförmige Wolkenstrukturen, die unsere FernsehmeteorologInnen gerne mit blumigen Ausdrücken wie „Leopardenfell“ oder „Fleckerlteppich“ bezeichnen, je nachdem aus welchem Teil des deutschen Sprachraums sie kommen.

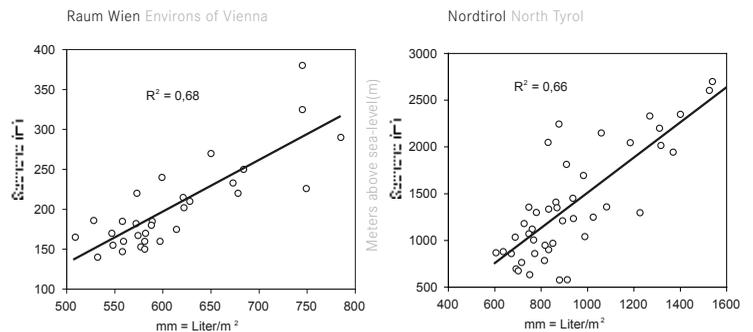
Flat banks of mist or fog of this kind do not, however, lead to abundant precipitation. For this to occur a different process is necessary: the rising air masses cause these to expand and cool and at a certain height they reach ‘condensation level’. Since condensation sets free a large amount of energy (latent energy), a tiny cloud droplet would immediately evaporate again, if this energy could not be redirected to an already existing larger droplet or another particle (e.g. dust particle).

Meteorologists refer to particles with this function as ‘condensation nuclei’ which are of fundamental importance for cloud formation. Clouds consist of ice crystals or liquid droplets, which due to their size of between one and two-hundredths of millimetre just manage to remain suspended in the air. The upwardly moving air is a precondition for the development of the droplets and also holds suspended the larger droplets of half to more than a millimetre in diameter resulting from accumulation or confluence of the smaller ones.

What does the upwards movement actually produce? Two different processes in the earth’s atmosphere play a role here. The first occurs on hot, humid summer days, when the ground, not unlike a hotplate, heats the air which begins to rise. This process is called convection and leads to the formation of cumulus clouds and to thunder clouds with a large vertical extension. The resulting ‘convective precipitation’ is brief but heavy and typical of the tropics, where the steep angle at which the sun’s rays reach the earth warm the ground extremely effectively. These processes also occur when cold polar air masses move over warmer, more southerly land masses or oceans. Satellite images produced during convective processes show cell-like cloud structures.

Abb.2. Niederschlagszunahme mit der Höhe im Raum Wien (links) und im Norden Tirols (nördlich 47°N). Punkte: Mittlere Messdaten 1961-1990 aus dem österreichischen Klimamessnetz, Geraden: Lineare Regression. R²: der durch das Modell der linearen Kurve erklärte Anteil der Gesamt-Variabilität (1=alles, 0=gar nichts wird durch das Modell erklärt)

Figure 2. Increase in precipitation according to altitude in Vienna and environs (left) and in North Tyrol (north of the 47°N). Points: mean measurement data 1961 - 1990 from the Austrian climate measurement network, straight lines: linear regression. R²: the linear curve of the model explains the share of the total variability (1=all, 0=nothing at all) which is explained by the model).



Großräumige Wolkenbänder und Wolkenfelder entstehen im zweiten Fall, dem des „advektiven“ oder auch Frontalniederschlags. Hier bewirken großräumige Luftströmungen das Aufeinandertreffen von Luftmassen unterschiedlicher Temperatur, die auch unterschiedliche Dichte haben. Somit wird in jedem Fall die dichtere Kaltluft unter die weniger dichte Warmluft geschoben und dabei großräumig Luft angehoben und abgekühlt, womit wir wieder am Ausgangspunkt der Kondensation und Wolkenbildung sind. Die Hebung geht im Fall einer Kaltfront (=kalte Luft verdrängt warme) abrupter vor sich und verstärkt noch bereits existierende konvektive Vorgänge im Bereich der Warmluft vor der Front.

Warmfronten (warme Luft verdrängt kalte) gestalten sich eher ausgeglichener, dafür aber großflächiger und breiter. Typische Warmfrontbewölkung ist schichtförmig, typischer Warmfrontniederschlag weniger intensiv, dauert dafür länger. Generell findet aufsteigende Luftbewegung in Tiefdruckgebieten statt, absinkende in Hochdruckgebieten, weshalb die grobe Zuordnung nach dem Schema

In the second case, i.e. 'advective' of frontal precipitation, extensive bands of clouds are formed. Here extensive currents of air cause air masses of differing temperatures and densities to collide. In all cases the denser cold air is pushed under the less dense warm air, whereby air rises and is cooled over an extensive area. And this brings us back to the starting-out point of condensation and cloud building. In the case of a cold front (= cold air displaces warm air) the upward movement takes place more abruptly and intensifies the convective processes already existing in the vicinity of the warm air before the arrival of the front.

Generally-speaking warm fronts are more balanced, but they cover larger areas and are wider. Typical warm front clouds take on the form of layers, and typical warm front precipitation is less intensive, but lasts longer. Upwards movements of air usually take place in low pressure areas, downwards movements in high pressure areas. Low pressure = bad weather, high pressure = good weather is a useful rule

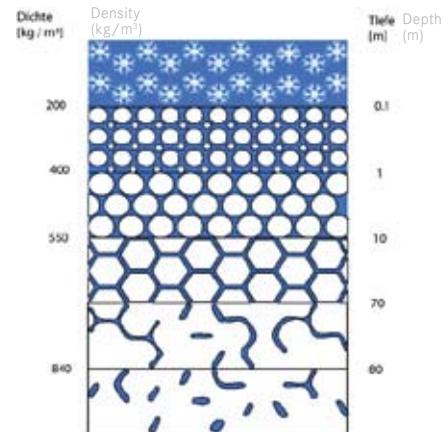


Abb.3.

Umwandlung von Schnee zu Eis durch Druck der überlagernden Schneeschichten und durch Schmelzen und Wiedergefrieren. Erst bei einer Dichte von rund 770 kg/m^3 gibt es keinen Luftaustausch mehr zwischen den nun abgekapselten Luftbläschen – nun ist die Luft konserviert, und kann in einem Eisbohrkern Auskunft über die frühere chemische Zusammensetzung der Atmosphäre geben, etwa über den Gehalt an Treibhausgasen. Das Foto rechts zeigt den Colle Gnifetti (4450m Seehöhe) in der Gipfelregion des Monte Rosa. Hier wurden zahlreiche Bohrkern in den dort kalten Gletscher gebohrt und als Klima- und Chemiekalender verwendet. Im Hintergrund Zumstein (4563m) und Dufour-Spitze (4634m), der höchste Gipfel der Schweiz
Foto: D. Wagenbach, September 2005

Figure 3: Transition of snow to ice caused by superimposed layers of snow and by melting and re-freezing.

Not until a density of approx. 770 kg/m^3 is reached does the exchange of air between the encapsulated air bubbles cease – now the air is preserved, and, in an ice drill-core, can provide information about the former chemical composition of the atmosphere, for example about the contents of greenhouse gases. The photo on the right shows the Colle Gnifetti (4450m above sea-level) among the peaks of Monte Rosa. Numerous drill-cores were drilled into the cold glacier and used as a climate and chemical calendar.

In the background Zumstein (4563m) and Dufour-Spitze (4634m), the highest peak in Switzerland.

Photo: D. Wagenbach, September 2005

Tief = Schlechtwetter, Hoch = Schönwetter ganz brauchbar ist. Trotzdem gibt es natürlich auch von dieser einfachen Regel zahlreiche Ausnahmen, wie etwa den herbstlichen Hochnebel, der sich bei uns in den Ebenen und Flusstälern speziell bei stabilen Hochdrucklagen einzunisten pflegt, oder der oft als „Zwischenhoch“ bezeichnete Warmluftsektor mit Schönwetter in dem Abschnitt eines Tiefdruckgebietes zwischen einer Warmfront und einer nachfolgenden Kaltfront.

Der Prozess der Wolken- und Niederschlagsbildung wird noch verstärkt, wenn quer zur Strömungsrichtung eine Berg- aber auch schon eine Hügelkette die Strömung noch zusätzlich zwingt aufzusteigen. Im Luv (der Anströmseite) und über den höchsten Erhebungen des Gebirges kommt es zu besonders starken Niederschlägen, im Lee (der windabgewandten Seite) zur Abschwächung oder zum gänzlichen Aufhören des Niederschlages, wenn sich die fallende Luft hier wieder erwärmt und die Tropfen schnell verdunsten. Aus diesem Grund sind Gebirge, vor allem an ihrer dem Wind zugewandten Seite, immer auch Klimazonen mit erhöhtem Niederschlag. Umgekehrt ist es in der Hauptwindrichtung gesehen hinter Gebirgszügen besonders trocken, wie etwa in der Westwindzone östlich der nordamerikanischen Rocky Mountains, oder in Tibet, im Lee des Himalaya.

In den beiden Diagrammen der Abbildung 2 ist der Zusammenhang des Jahresniederschlages mit der Seehöhe für zwei Regionen Österreichs dargestellt. Man erkennt den deutlichen Zusammenhang in der zu erwartenden Art, wobei vielleicht der starke Einfluss der Hügel des Wienerwaldes überrascht, die im Raum Wien den Niederschlag von 500mm im Marchfeld bis gegen 800mm im Westen der Stadt ansteigen lassen. Wir erkennen aber auch die Grenzen der in der Klimatologie sehr beliebten Methode, derartige Zusammenhänge in einfache Formeln zu fassen. Im Fall unserer Höhenabhängigkeit des Niederschlages wurde die Punktlinie in eine gerade Linie verwandelt – eine besonders bequeme Art für die mathematische Weiterverwendung, die „lineare Regression“ genannt wird. Die beiden Zahlenwerte unter „ R^2 “ sagen uns, wie viel an Information wir durch diese „Linearisierung“ verloren haben. Das lineare Modell für Wien liefert 68%, das für den Norden Tirols 66% der gesamten vorhandenen Variabilität des Niederschlages, wie er vom Messnetz erfasst wird.

of the thumb. There are, however, numerous exceptions to this simple rule, for example, high-fog in autumn, which in our part of the world frequently settles on expanses of flat land and in river valleys especially during periods of stable high pressure. Another example is an intermediate high-pressure system, which in fact is the warm air sector with fair weather in a section of low pressure between a warm front and the cold front behind.

The process by which clouds and precipitation are formed is intensified when a chain of mountains or even hills are at an oblique angle to the direction of the current forcing the current to rise further. Especially heavy precipitation takes place on the weather side and over the highest elevation of the mountain, whilst on the lee-side (facing away from the wind) precipitation is weakened or stops completely when the falling air warms up again here and the droplets evaporate quickly. For this reason mountains, above all on the side facing the wind, are always climate zones with high precipitation. Conversely, behind the mountains facing away from the main direction of the wind, it is particularly dry, as, for example, in the west wind zone east of the north American Rocky Mountains or in Tibet on the lee-side of the Himalayas.

Both diagrams in figure 2 illustrate the connexion between annual precipitation and height above sea-level for two regions of Austria.

A clear connexion is recognisable, as was expected, although the powerful influence of the hills of the Vienna woods is perhaps somewhat surprising. These hills cause the fact that precipitation in Vienna and its environs increases from 500mm in the Marchfeld to some 800mm in the west of the city. We are also aware that the method of expressing connexions such as these in simple formulae so popular in climatology has its limits. In this case where precipitation is dependent on altitude, the scattered station value have been transformed into a straight line. This is especially useful if we wish to make further use of it in a mathematical context better known as 'linear regression'. The two numerical values under R^2 tell us how much information has been lost through this 'linearisation'. The linear model for Vienna provides 68%, for North Tyrol 66% of the total variability in precipitation, based on the data provided by the measurement network.

Aus Schnee wird Gletschereis

Die Umwandlung (Metamorphose) von Schnee zu Eis ist ein langsamer Prozess in Abhängigkeit von Temperatur und Druck. Der Druck wird durch die überlagernden Schneeschichten erzeugt, die Temperatur ergibt sich aus der Energiebilanz. Je älter eine Schneeschicht ist, desto tiefer kommt sie zu liegen, und desto größer wird der Überlagerungsdruck. Schnee, der älter als ein Jahr ist, wird in der Glaziologie als Firn bezeichnet, ist also nicht identisch mit dem umgangssprachlichen Begriff „Firn“ oder „Firnschnee“. Die Tiefe beziehungsweise die notwendige Umwandlungszeit von Schnee zu Firn und dann zu Eis ist in den Polargebieten viel länger als auf den Gletschern der Alpen. In den Alpen ist im Sommer die Schmelzmetamorphose (Schmelzen und Wiedergefrieren) sehr intensiv und die Umwandlung von Neuschnee zu Altschnee findet innerhalb von Tagen statt. Im Summit-Bereich des Grönländischen oder des antarktischen Eisschildes ist die Metamorphose ausschließlich eine Folge der Druckumwandlung und dauert Jahrzehnte bis Jahrhunderte.

Durch die Umwandlung von Schnee zu Eis wird der Anteil der Luft (im Diagramm blau) im Firn und im Firneis (weiß) immer geringer. So hat Neuschnee meist eine Dichte von 100-200 kg/m³ (also ca. 80-90% sind Luft, nur 10-20% sind Eiskristalle), das Gletschereis jedoch besitzt im Endstadium der Metamorphose eine Dichte von rund 900 kg/m³. Bei der Umwandlung von Schnee zu Eis bleiben die Bestandteile des Niederschlags und der Luft im Eis erhalten. Der Austausch mit der umgebenden Luft und innerhalb der Schneedecke kann noch über viele Jahre stattfinden, so lange bis die Zwischenräume zwischen den Eiskristallen als völlig abgeschlossene Luftbläschen konserviert sind. Die Metamorphose führt dadurch zu der typisch schichtförmigen Struktur von Firn und Gletschereis. Diese schichtweise Ablagerung macht man sich bei der Analyse von Eisbohrkernen zu Nutze. Man kann aus den eingeschlossenen Luftbläschen in den einzelnen Schichten des Bohrkerns die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre aus der Vergangenheit, aber auch Paläotemperaturen über das Isotopenverhältnis des Sauerstoff- und der Wasserstoffatome des Eises selbst bestimmen. Derartige Klimakalender aus Bohrkernen gibt es nicht nur aus Grönland und der Antarktis, auch

Snow becomes Glacier Ice

The transformation (metamorphosis) of snow to ice is a slow process dependent on temperature and pressure. The pressure is produced by superimposed layers of snow, the temperature results from the energy balance. The older a layer of snow is, the lower it lies and the greater the pressure of the superimposed snow. Glaciologists refer to snow which is older than a year as 'firn'. This, is however, not identical with what is referred to colloquially 'firn' or 'firn snow'. The depth or rather the period of transformation of snow to firn and then to ice is far longer in the polar regions than on the Alpine glaciers. In the Alps the melt metamorphosis (melting and re-freezing) is very intensive in summer when transformation from new snow to old snow may take place within a few days. In the summit regions of the ice cap in Greenland or in the Antarctic, this metamorphosis ultimately results from the transformation of pressure and lasts decades or even centuries.

Due to the transition from snow to ice the share of the air (blue in the diagram) becomes increasingly less in firn and firn ice (white). Thus new snow generally has a density of 100-200 kg/m³ (i.e. approx. 80-90% is air, only 10-20% ice crystals). On the other hand glacier ice has a density of some 900 kg/m³ during the final stages of metamorphosis. As the snow is transformed into ice, the components of precipitation and air are preserved in the ice. The interchange with the surrounding air and within the snowcover can continue over many years, i.e. until the space between the ice crystals is preserved as a completely encapsulated air-bubble. Thus the metamorphosis results in the typical layer-like structure of firn and glacier-ice. This preservation in layers is used in the analysis of drill-cores. On the basis of the air-bubbles encapsulated in the individual layers of the drill-core we can determine both the chemical composition of the of the atmosphere in the past. Paleo-temperatures can also be determined with reference to the isotope ratio of the oxygen and hydrogen atoms of the ice. This kind of climate calendar in drill-cores does not only exist in Greenland and the Antarctic, drill-cores are also used for

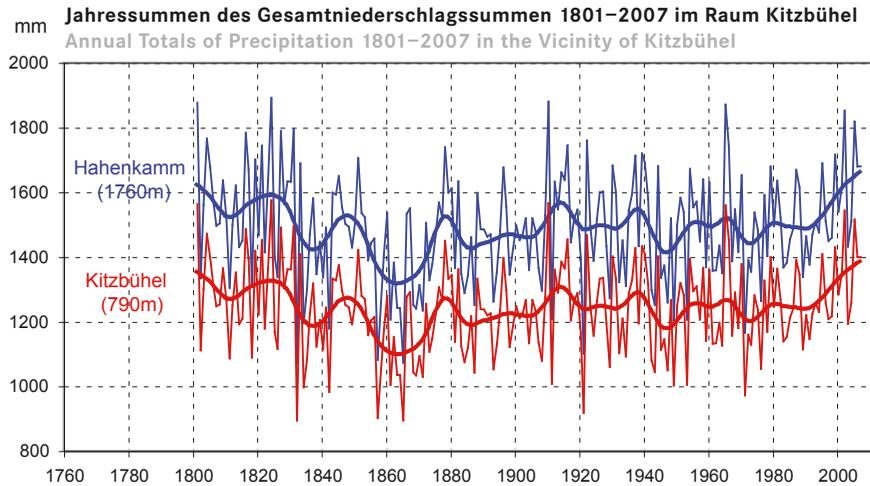


Abb. 4.
 Langjährigen Niederschlagszeitreihen für Kitzbühel-Tal (790m, rot) und für den Hahnenkamm (1760m, blau).
 Dünn: Einzeljahre, dick: 20jährig geglättet.
 Dargestellt sind die Gesamtniederschlagssummen der jeweiligen 4 Monate in mm (1mm entspricht 1 Liter/m²).
 Compositreihen aus (kürzeren) direkten Messungen vor Ort und den langen regionalen Klimareihen der HISTALP-Datenbank

Fig. 4.
 Precipitation time-series over a long-period for Kitzbühel-valley (790m red) and for the Hahnenkamm (1760m, blue).
 Thin: single years, thick: 20 years smoothed.
 The total sum of precipitation of the 4 months in question in mm (1mm corr. to 1 litre/m²).
 Composite series of (shorter) direct measurements on the spot and the long regional climate series of the HISTALP-databank.

solche aus den Alpen werden für die Rekonstruktion der Paläoklimatologie der Alpen verwendet. Jedoch muss es sich um kaltes Gletschereis handeln, da ein Schmelzen die chemischen Bestandteile verlagern oder „auswaschen“ würde. Alpine Eisbohrkerne werden daher ausschließlich aus den höchsten Regionen der Westalpen geborgen und wissenschaftlich untersucht.

200 Jahre Schnee und Regen in Kitzbühel und auf dem Hahnenkamm

Kehren wir nach dem kurzen Exkurs über einige Wirkungsmechanismen über das Klima wieder zurück zu seinen Schwankungen, wie wir sie in den letzten Jahrzehnten und Jahrhunderten der „instrumentellen Periode“ gemessen haben. Nachdem dabei am Anfang die Temperatur im Vordergrund gestanden war, wollen wir nun zum Schluss dem Niederschlag Aufmerksamkeit schenken. Wieder soll Kitzbühel als Beispiel dienen, wobei allerdings in diesem Fall betont werden muss, dass, anders als bei der Temperatur, die Niederschlagstrends

the reconstruction of the paleo-climatology of the Alps. Nevertheless, cold glacier-ice must be used, since melting would redistribute or 'wash out' the chemical components. Alpine ice drill-cores are therefore only extracted and studied scientifically at the highest peaks of western Alps.

200 Years of Snow and Rain in Kitzbühel and on the Hahnenkamm

Following this brief digression on some of the mechanisms affecting climate, we now turn our attention back to climatic variations as they have been measured during the past decades and centuries of the 'instrumental period'. After having dealt in some detail with temperature, we want finally to focus on precipitation. Once again Kitzbühel will be taken as an example. It is important to note here that contrary to the case with temperature, precipitation trends even within the relatively small area represented by the Alps are by no means homogeneous. Thus in the northwest of Alps (France, Switzerland, South Germany, West Austria) a general trend

auch innerhalb eines doch relativ kleinen Gebietes, wie es der Alpenraum darstellt, alles andere als einheitlich sind. So beobachten wir im Nordwesten des Alpenbogens (Frankreich, Schweiz, Süddeutschland, Westösterreich) seit etwa 150 Jahren einen generellen Trend zu immer feuchteren Verhältnissen, im Südosten hingegen (Kärnten, Untersteiermark, Slowenien, Kroatien, Bosnien-Herzegowina, Ungarn) einen gegenläufigen Trend zu weniger Niederschlag. Die Grenze zwischen diesen gegenläufigen Trends ist relativ scharf ausgeprägt, Kitzbühel liegt noch im Gebiet mit steigendem Niederschlagstrend, ein vergleichbarer Wintersportort wie Bad Kleinkirchheim in Kärnten, der in der Luftlinie nur etwa 120km entfernt ist, hat bereits langfristig fallenden Niederschlag.

towards increased precipitation has been observed over the past 150 years, whereas in the southeast (Carinthia, lower Styria, Slovenia, Croatia, Bosnia-Herzegovina, Hungary) records indicate a trend towards less precipitation. The borderline between these two contrary trends is relatively clearly defined. Kitzbühel is located in the area where there is a trend towards increasing precipitation; a comparable winter-sports resort in Carinthia, Bad Kleinkirchheim, which is only some 120 km from Kitzbühel as the crow flies, is already experiencing a long-term decrease in precipitation.

Abb.5. Langjährigen Niederschlagszeitreihen für Kitzbühel-Tal (790m, unteres Diagramm) und den Hahnenkamm (1760m, oberes Diagramm). Dünn: Einzeljahre, dick: 20jährig geglättet. Dargestellt sind die Gesamtniederschlagssummen (hellblau), der Schneeniederschlag (dunkelblau) und der Regen (grün), der jeweiligen 4 Monate in mm (1mm entspricht 1 Liter/m², beim Schneefall entspricht 1mm Wasserwert im Schnitt 1cm Neuschneezuwachs). Compositreihen aus (kürzeren) direkten Messungen vor Ort und den langen regionalen Klimareihen der HISTALP-Datenbank

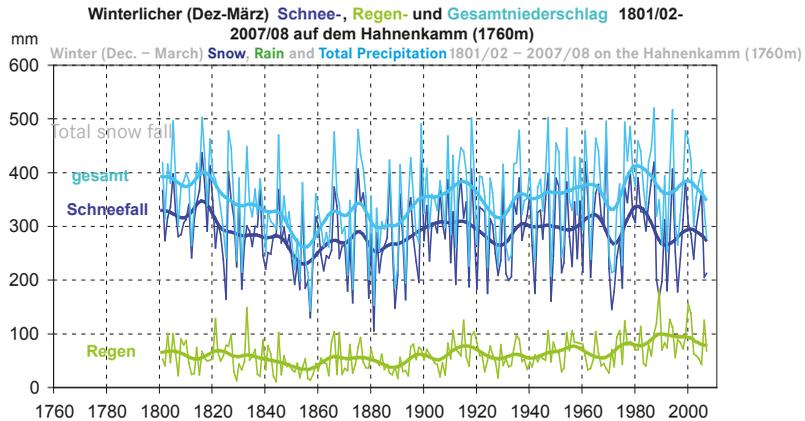
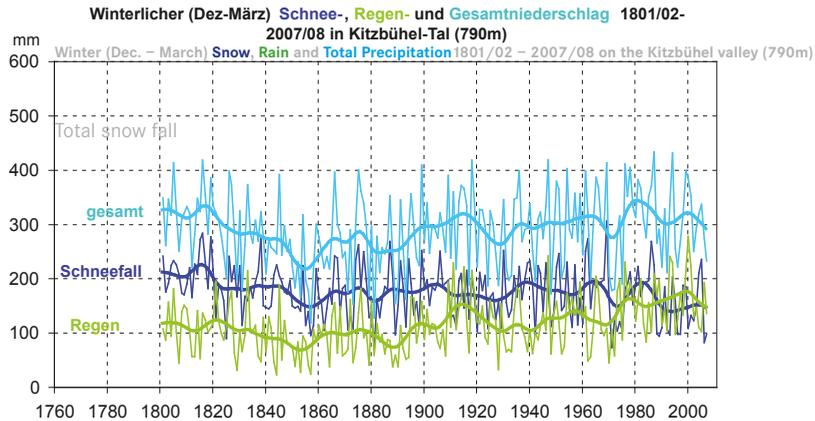


Fig. 5. Long-term total precipitation series for Kitzbühel valley (790m, lower diagram) and the Hahnenkamm (1760m, upper diagram). The following are illustrated: thin: single years, thick: 20 years smoothed. Total precipitation (light blue), snow fall (dark blue) and rain (green) during the relevant 4 months in mm (1 mm corr. 1 litre/m², during snow falls to 1mm water value corresponds on average 1 cm additional new snow). Composite series from (shorter) direct measurements on the spot and the long regional climate series of the HISTALP-databank



Es würde also deutlich mehr Platz beanspruchen als hier vorhanden ist, um den komplizierten räumlichen Mustern der Niederschlagstrends gerecht zu werden. Das gilt noch in verstärktem Maß, wenn nicht nur der Gesamtniederschlag analysiert wird, sondern auch noch seine feste (Schnee) und flüssige Komponente (Regen). Gerade in einem Gebirgsland kommt es durch die Höhengliederung der Temperatur zu kleinräumig unterschiedlichen Trends des Schneefalls, wie gleich gezeigt werden wird. Nehmen wir also die nun besprochenen Schnee-Trends im Raum Kitzbühel als das was sie sind – Manifestationen eines nicht nur zeitlich sondern auch räumlich stark variablen Klimatelements für einen ganz speziellen Ort, der nicht repräsentativ für andere Gegenden des Alpenraums sein muss.

Bei der Gesamtmenge des Niederschlages, die für Abb. 4 wieder aus den kürzeren Kitzbüheler- und Hahnenkamm-Messreihen und den längeren aus der Region Alpen-Nord kombiniert worden sind, fällt zunächst auf, dass sowohl die langfristigen Jahrhunderttrends, als auch die überlagerten dekadischen Schwankungen weitestgehend parallel verlaufen. Nur die Gesamtmenge ist auf dem Hahnenkamm um rund 20% höher, eine Tatsache, die wir bereits kennengelernt haben (Abb. 2). Im frühen 19. Jahrhundert gab es reichlich Niederschlag in der Region, was mit zu den starken Gletschervorstößen in den Hochalpen beigetragen hat, die in den 1810er Jahren begannen und um 1850 zur größten Gletscherausdehnung seit mehreren Jahrtausenden geführt hat. Diese Vorstoßphase wurde jedoch in den trockenen 1850er und 1860er Jahren unmittelbar von einem bedeutenden Rückzug der Gletscher abgelöst, der mit Unterbrechungen in den 1910er und in den 1960er und 70er Jahren bis heute andauert.

Seit den trockenen 1860ern steigen auch die Niederschläge wieder an – Kitzbühel gehört also offenbar zu dem Gebiet des Alpenraumes, in dem es seit 150 Jahren langsam immer feuchter wird. Zu Beginn des 21. Jahrhunderts wurde wieder das hohe Niederschlagsniveau erreicht, das auch vor 200 Jahren in der Region geherrscht hat. Dass das nicht unbedingt mehr Schnee und damit auch wachsende Gletscher bedeutet, liegt am gleichzeitigen Temperaturanstieg, den wir bereits aus Abb. 1 kennen.

Unfortunately, it is impossible to do justice to the complicated spatial patterns of the precipitation trends within the limits of this article. This is true to an even greater extent when not only total precipitation, but also its solid (snow) and liquid (rain) components are analysed. In mountainous regions, above all the temperature stratification according to altitude, results in variations in the snowfall trend within very small areas, as will be shown in the following. Thus we should take the snow trends for the Kitzbühel area for what they are: manifestations of a climate element for a specific location which is subject to considerable temporary and spatial variations, and not necessarily representative for other Alpine regions.

In the case of total precipitation, in figure 4 combining again the shorter series of measurements for Kitzbühel and Hahnenkamm and the longer series from the northern alpine region, it becomes immediately apparent that both the long-term century-trends and the superimposed decade-variations to a very great extent run parallel. Only the total precipitation is some 20% higher on Hahnenkamm - fact that we have already encountered (fig. 2). During the early 19th century precipitation in the region was plentiful and contributed to the considerable advance of the glaciers then. However, this period was followed by a period of extensive retreat directly resulting from the dry 1850s and 1860s. Apart from short pauses, this trend continued in the 1910s, the 1960s and from the 1970s to the present. Precipitation has been once more on the increase since the dry 1980s – Kitzbühel therefore belongs to that region of the Alps where humidity has been increasing over the past 150 years. At the start of the 21st century the high level of precipitation prevailing in the region 200 years ago had once again been reached. The fact that this does not necessarily imply snow and growing glaciers follows from the simultaneous rise in temperatures already noted in figure 1.

Wenn Fragen des Schneereichtums oder der Gletscheränderungen interessieren, muss der Gesamtniederschlag in seine feste und seine flüssige Phase unterteilt werden, also in Schneefall und Regen. Für die Wintersaison (wieder Dezember bis März) wurde das getan und in Abb. 5 dargestellt. Es wurden dazu wieder direkte kürzere Zeitreihen von täglichen Beobachtungen der Niederschlagsart mit den langfristigen Temperatur- und Gesamtniederschlagsreihen kombiniert. Die hellblauen Kurven des Gesamtniederschlags entsprechen in ihrem Langzeitverlauf etwa denen, die wir aus Abb. 4 für das gesamte Jahr bereits kennen – also Niederschlagsrückgang von einem hohen anfänglichen Niveau auch in der Wintersaison zu sehr trockenen Wintern in der Mitte des 19. Jahrhunderts, und in der Folge ein lange anhaltender Trend zu mehr Winterniederschlag. Allerdings finden wir im Winter nicht den für das Gesamtjahr gegebenen kräftigen Anstieg der letzten 15-20 Jahre – dieser findet in den anderen Jahreszeiten statt. Diese Charakteristik ist sowohl für die Tallage, als auch für den Hahnenkamm zu erkennen.

Wie zu erwarten, ist diese Ähnlichkeit der Entwicklung im Tal und auf dem Berg für den festen Bestandteil des Niederschlags, also den Schnee, nicht mehr gegeben. Auf dem Hahnenkamm finden wir noch einen nur leicht gebremsten Jahrhunderttendenz zu mehr Schneefall, der um 1980 seinen Höhepunkt erreicht hat. Mehr als 300cm Neuschnee ist damals im Schnitt pro Winter gefallen, ähnlich viel wie im frühen 19. Jahrhundert. Ein leichter Rückgang auf etwas weniger als 300cm ist in den letzten 25 Jahren zu erkennen, der aber mehr mit dem Rückgang der Niederschlagsgesamtmenge zu tun hat, als in dieser Höhenlage mit dem Temperaturanstieg – das Temperaturniveau bei Niederschlag reicht hier immer noch aus, um überwiegend Schnee zu produzieren, auch wenn ein leichter Anstieg des Regens schon zu erkennen ist. Deutlich stärker ist der Einfluss des Temperaturanstieges auf die Menge des Schneefalls 1000m tiefer in Tallage zu sehen (unteres Diagramm der Abb. 5. Hier wird der steigende Gesamtniederschlagstrend sogar in einen Rückgang des Schneefalls umgewandelt. In den milden Phasen um 1970 und in den 1990er Jahren fiel etwa um 50cm weniger Neuschnee in den vier Monaten der Wintersaison, das ist gegenüber dem sehr günstigen „Normalzustand“ der 1940er, 50er und 60er Jahre immerhin ein Rückgang um etwa 20%.

If we focus on the amount of snow or variations in glaciers, then we must subdivide the sum of total of precipitation into its solid and liquid phases, i.e. into snowfall and rain. This was done for the winter season (December to March) and illustrated in figure 5. Once again direct, shorter time-series from daily observations of the type of precipitation were combined with total precipitation series. As far as their long-term course is concerned, the light blue curves of the total precipitation correspond to a certain extent with those illustrating the year as whole in figure 4, i.e. as a decrease in precipitation from a higher level even during the winter season, at the start, to extremely dry winters in the middle of the 19th century, and as a consequence to an ongoing trend towards increased precipitation in winter. Nevertheless, the powerful increase over the whole year of the past 15 – 20 years, is not found in winter, but in other seasons of the year. This is characteristic of both the low-land and the Hahnenkamm.

As is to be expected, this similarity between the development in the valley and on the mountain is no longer given for the solid component of precipitation, i.e. snow. On the Hahnenkamm we still find a century-trend, which has only slowed down minimally, towards more snow. This trend was most powerful around 1860 when more than 300 cm of new snow fell each winter on average, as in the early 19th century. A small decrease to just under 300 cm has been recorded during the past 25 years. Given the altitude this has more to do with the decrease in total precipitation than with rising temperatures. The temperature level during precipitation is always sufficient to produce, above all, snow, although a small increase in rainfall cannot be ignored. It is clear from the lower diagram in figure 5 that the influence of rising temperatures on the amount of snow fall 1000m lower down in the valley is clearly visible. The increasing total precipitation trend is, in fact, transformed here into a decrease in snow fall. In the mild weather phases around 1970 and in the 1990s approximately 50 cm less new snow fell during the four months of the winter season.



Roman Signer
Schneefleck (2-teilig)
1979
Fotografie auf Barytpapier
49 x 63 cm
ed.10 (KHM#3026)

Courtesy: Häusler Contemporary, München

Die rasante Entwicklung des Alpinen Skitourismus hat also genau in diesen an sich sehr günstigen Jahrzehnten stattgefunden, als der „Rohstoff“ des natürlichen Schneefalls reichlich vorhanden war – vor allem in den Höhenlagen und auch im Vergleich zu früheren Zeiten, als auch das natürliche Klima nicht immer 200cm Neuschnee im Tal und 300cm auf dem Hahnenkamm angeboten hatte.

Mittlerweile fällt allerdings aus von uns selbst mit verursachten Gründen im Ort Kitzbühel (wie in vielen anderen Alpentälern) in den vier Monaten der Wintersaison bereits etwa gleich viel Regen wie Schnee, und es ist zu erwarten, dass dieser Trend sich auch im Rest des 21. Jahrhunderts fortsetzt. In diesem kurzen Überblick fehlt bei weitem der Platz, um auf die Zukunft des Klimas einzugehen, nicht zuletzt deshalb, weil gerade beim Niederschlag und insbesondere wenn es um die lokale Klimaentwicklung geht, der exakte „Fahrplan“ in die Zukunft des Wintertourismus von den Klimamodellen bei weitem noch nicht geliefert werden kann. Der hier besprochen Rohstoff des natürlichen Schneefalls wird zweifellos weiterhin knapper werden, da mit einem (von den Modellen bereits präziser berechenbaren) Temperaturanstieg auch für den Rest des 21. Jahrhunderts gerechnet werden muss. Vor allem die starken Schwankungen von Saison zu Saison (und auch die steigende Nutzung der Pisten durch immer mehr Skifahrer) haben ja die Tourismusindustrie in den Alpen bereits seit längerer Zeit auf die Erzeugung von künstlichem Schnee setzen lassen. Dadurch konnten die Unsicherheiten durch die Kurzfristvariabilität des Klimas gut abgepuffert werden – man vergleiche nur die hier zu sehenden Schwankungen des natürlichen Schneeangebots von typischerweise plus-minus 50% von Saison zu Saison mit den doch recht stetigen Kurven der Auslastung der Lifte oder der Übernachtungszahlen, bei denen ja Änderungen um geringe Prozentbeträge typisch sind.

This, in fact, is equivalent to a decrease of 20% against the extremely favourable ‘normal conditions’ of the 1940s, 1950s and 1960s. The rapid development of winter-sports tourism in the Alps took place precisely during these favourable decades, when the ‘raw-material’ of natural skiing was more than plentiful. This is above all true of the higher altitudes and also in comparison with previous years when the natural climate did not always guarantee 200 cm of fresh snow in the valley and 300 cm on the Hahnenkamm.

We are ourselves partly to blame for the fact that in the meantime in the town of Kitzbühel (as in other alpine valleys) just as much rain as snow falls during the four months of the winter season and it is to be assumed that this trend will continue during the remainder of the 21st century. There is no space in this short overview to discuss the future of the climate, not least because in the case of precipitation and more particularly when we are dealing with local climate development, we are still a long way from being able to provide an exact ‘timetable’ for the future of winter tourism on the basis of the models currently available. The raw material in the form of natural snow fall discussed here will doubtless become increasingly scarce, due to the increase in temperature (forecast according to precise climate models) for the remainder of the 21st century. Above all, the considerable seasonal variations from season to season (as well the ever-increasing numbers of skiers on the slopes) have made the manufacture of artificial snow vital for the alpine tourism industry for a considerable number of years already. Thus the uncertainties caused by short-term climate variations can well be avoided. It is worth comparing the variations in the availability of natural snow seen here of typically plus-minus 50% from season to season with the steady curve showing increasing use of the ski-lifts or overnight stays, where low-percentage changes are typical.



Via Lewandowsky
Schneekrater
2008

Da die Schneeerzeugung an die Lufttemperatur gekoppelt ist, könnte die Wissenschaft heute schon seriöse Abschätzungen liefern, wie sich deren Möglichkeiten im Verlauf des 21. Jahrhunderts entwickeln werden. Vor den einfachen und plakativen „Hausnummern“ wie „unter 1500m kein Skilauf mehr in 20 Jahren“ oder „bei einem globalen Temperaturanstieg um 2° sperren die Hälfte der Skigebiete der Alpen zu“ sei allerdings gewarnt. Zu unterschiedlich und zu kompliziert sind die lokalen Gegebenheiten, und sorgfältige ingenieurmässige Anwendung des bereits vorhandenen Fachwissens wurde bisher nur in ganz wenigen Einzelfällen gemacht. Die Wissenschaft wäre dazu bereits in der Lage, allerdings nicht in der luftig-leichten Art der diversen meist sehr inhaltsarmen Hochglanzbroschüren mit den verdächtig runden Zahlen und angeblich so einfachen Zusammenhängen. Wenn die nötige Zeit und Arbeitsmenge investiert würden, könnte ein neuer, rationalerer Zugang zu den Veränderungen im Zusammenhang mit dem auf uns zukommenden Klimawandel zweifellos mehr Sinn machen, als die entbehrlichen und vordergründigen Hahnenkämpfe zwischen „Klimabewegten“ und „Klimaleugnern“. Im Fall des in diesem Aufsatz im Vordergrund stehenden Klimatelements Schnee wird es sich in erster Linie um möglichst rationale Problembewältigung handeln. Auf anderen Gebieten wie etwa, um beim Tourismus zu bleiben, bei einer in Zukunft sicher steigenden Attraktivität der kühleren Alpen für hitzegeplagte Bewohner der europäischen Großstädte im Sommer könnten durchaus neue Chancen erwachsen.

Nicht jede Änderung von Rahmenbedingungen ist automatisch eine zum Schlechteren, wenngleich die öffentliche Meinung das zu glauben scheint. Eine hochentwickelte Zivilisation wie die unsere täte allerdings gut daran, rational auf Änderungen zu reagieren, sie zunächst genau zu analysieren, versuchen Vermeidbares zu vermeiden und sich auf Unvermeidbares möglichst gut vorzubereiten. Im Fall des Klimawandels werden Vermeidungsstrategien nur Teilerfolge bringen können, auf den verbleibenden Rest des Wandels sollten wir uns einstellen, Probleme offensiv angehen und neue Chancen nutzen. Die Naturwissenschaft kann durch ein tieferes Verständnis der Natur zu diesem rationalen Zugang beitragen – vielleicht hat dieser kurze Aufsatz dazu auch einen Mosaikstein geliefert.

The manufacture of snow is dependent on the air temperature mainly and scientists are currently in a position to provide well-founded respective estimates concerning possible developments of this element in the course of the 21st century. However, we must warn against oversimplified statements based on random figures, such as, 'in 20 years' time there will be no more skiing below 1500m' or 'if the global temperature goes up by 2 degrees celsius half of the ski-resorts in the Alps will have to close down'. The local circumstances are too varied and too complicated to permit such simplification and a careful, scientific use of the data available has been exceedingly rare up till now. Science is in a position to do this, although not in the light and breezy manner of the various brochures, high on gloss and low on substance, with their suspiciously rounded off figures and apparently simple cause-effect reasoning. Time, effort and an innovative, rational approach in the face of current and future climate-related changes are more effective than the petty squabbling between those who bury their heads in the sand and the prophets of doom. Snow, the climate element foregrounded in this article, requires a completely rational approach to overcoming problems. There is no doubt that Europe's urban masses will gladly seek refuge from the sweltering cities in the cooler alpine regions, thus providing new tourism opportunities for alpine resorts in a warming world.

Not every change is automatically a change for the worse, even though public opinion likes to think so. A highly developed civilisation such as ours would be well advised to react to these changes rationally, first of all to analyse them, attempt to avoid the avoidable and to prepare as well as possible for the unavoidable. In the case of climate change, avoiding strategies will only result in limited success. We must adjust our lifestyles to cope with the problems remaining. Thanks to its profound understanding of nature science can contribute to this rational process – perhaps this short article has provided another small puzzle-stone in the mosaic.

Nachsatz

Dieser Beitrag basiert auf dem gemeinsamen Fachwissen und den Daten der Klima- und Gletscherforschungsgruppe der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Ihnen (Ingeborg Auer, Manfred Ganekind, Christine Gruber, Johann Hiebl, Bernhard Hynek, Anita Jurkovic, Christine Kroisleitner, Christoph Matulla, Alexander Orlik, Wolfgang Schöner, Gernot Weyss) gilt mein Dank für die immer offene und interessante Zusammenarbeit, Gernot Weyss, Wolfgang Schöner und Dietmar Wagenbach (IUP-Heidelberg) für die Überlassung Ihrer Fotos. Insbesondere wurden hier die folgenden drei Publikationen aus jüngster Zeit verwendet. Alles, was hier nur kurz skizziert und nicht voll ausdiskutiert werden konnte, ist dort genauer und schlüssiger ausgeführt:

- Auer I, Böhm R, Jurkovic A, Lipa W, Orlik A, Potzmann R, Schöner W, Ungersböck M, Matulla C, Briffa K, Jones PD, Efthymiadis D, Brunetti M, Nanni T, Maugeri M, Mercalli L, Mestre O, Moisselin J-M, Begert M, Müller-Westermeier G, Kveton V, Bochnicek O, Stastny P, Lapin M, Szalai S, Szentimrey T, Cegnar T, Dolinar M, Gajic-Capka M, Zaninovic K, Majstorovic Z, Nieplova E, 2007. HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760-2003. *International Journal of Climatology* 27: 17-46
- Böhm R, Schöner W, Auer I, Hynek B, Kroisleitner C, Weyss G, 2007. Gletscher im Klimawandel – Vom Eis der Polargebiete zum Goldbergekies in den Hohen Tauern. ZAMG-Morava, Wien, 111 Seiten. ISBN: 3-20001-013-0
- Böhm R, 2008. Heiße Luft, Reizwort Klimawandel – Fakten-Ängste-Geschäfte. Edition Vabene, Wien-Klosterneuburg, 261 Seiten. ISBN: 3-85167-213-8

Zur generellen Vertiefung und weiterführenden Information kann empfohlen werden:

- Auer I, Böhm R, Mohl H, Potzmann R, Schöner WP, Skomorowski P, 2001. ÖKLIM – Digitaler Klimaatlas Österreichs. CD-ROM, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien
- Barry RG, 1992. *Mountain Weather and Climate*. Routledge, 402 Seiten
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007 – The Physical Science Basis*. Working Group I Contribution to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 996 Seiten
- Paterson WSB, 1994. *The Physics of Glaciers*. Pergamon, 480 Seiten
- Ruddiman WF, 2008. *Earth's Climate – Past and Future*. Freeman & Company, New York, 465 Seiten
- Slaymaker O and Kelly REJ, 2007. *The cryosphere and global environmental change. Environmental systems and global change series*, Blackwell Publishing, Oxford, UK, 261 Seiten

Postscript

This article is based on the results of research and data information supplied by the Climate and Glacier Resrach Group at the Central Institute of Meteorology and Geo-dynamics. I am extremely grateful to the members of this group for the open and interesting collaboration (Ingeborg Auer, Manfred Ganekind, Christine Gruber, Johann Hiebl, Bernhard Hynek, Anita Jurkovic, Christine Kroisleitner, Christoph Matulla, Alexander Orlik, Wolfgang Schöner, Gernot Weyss). I also owe my thanks to Gernot Weyss, Wolfgang Schöner and Dietmar Wagenbach (IUP-Heidelberg) for allowing me to use their photographic material.

Above all, the following three very recent publications have proved extremely useful and those points only touched on briefly in this article are treated with greater precision there.

Schließlich noch drei Beispiele von kontroversen Positionen aus der aktuellen öffentlich-politischen Klimadiskussion:

- Vom überzeugten Retter der Welt:
Gore A, 2006. *Eine unbequeme Wahrheit*, Riemann TB, 325 Seiten. ISBN: 3-57050-078-1
- Vom bissigen Kritiker der Weltretter:
Crichton M, 2006. *Welt in Angst*. Goldmann TB, 608 Seiten. ISBN: 3-44246-304-6
- Vom Schalk, der sich zwischen all den tierisch ernstesten Kombattanten im Klimakrieg tummelt:
Lomborg B, 2008. *Cool It!* DVA, 272 Seiten. ISBN: 3-42104-353-5
- Und schließlich ein selbstkritischer Beitrag aus der Publizistik über die Rolle der Medien in der Klimadebatte:
Post S, 2008. *Klimakatastrophe oder Katastrophenklima?* Verlag Reinhard Fischer, 207 Seiten. ISBN: 3-88927-446-5