

# SCHADSTOFFKONZENTRATIONSMESSUNGEN IN DER WINTERSCHNEEDECKE VON WURTENKEES UND GOLDBERGKEES

## Ergebnisse des ALPTRAC Teilprojektes SNOSP

Wolfgang Schöner, Michael Staudinger und Hans Puxbaum

### 1. Erläuterungen zur Motivation des ALPTRAC-Teilprojektes SNOSP

Die vorliegende Arbeit untersucht die Ionenkonzentration in einer hochalpinen winterlichen Schneedecke und wurde im Rahmen des Projektes ALPTRAC durchgeführt. ALPTRAC (High Alpine Aerosole and Snow Chemistry Study), ein Teilprojekt von EUROTRAC<sup>1</sup>, beschäftigt sich mit dem Vorkommen, der Umwandlung und der Deposition von Schadstoffen in einer hochalpinen Umwelt und gliedert sich in vier Forschungsschwerpunkte:

#### *SNOSP (Alpine Wide Snow Sampling Program):*

Über die ganzen Alpen verteilt werden jährlich an ungefähr 10 bis 15 hochgelegenen Meßstellen (über 3000 m Seehöhe) Schneeproben der gesamten Winterakkumulation genommen und hinsichtlich der wichtigsten Ionen analysiert, um die geographische Verteilung und die zeitliche Änderung von Schadstoffen zu erfassen. Die Probennahme und Auswertung wird von insgesamt sieben Forschergruppen aus allen Alpenländern durchgeführt.

#### *CORE:*

Zur Untersuchung der Luftverschmutzung in den letzten 100 Jahren werden an einzelnen Stellen in den Alpen Bohrkerne gezogen und chemisch sowie physikalisch analysiert.

#### *ALASS:*

ALASS untersucht die Wechselwirkungen zwischen Luft-, Wolken- und Schneechemie, das heißt die Einbindung der Schadstoffe (atmosphärische Gase und Partikel) in den Niederschlag und die anschließende Deposition.

#### *SNOWMET:*

Die Ergebnisse der Konzentrations- und Depositionsmessungen werden meteorologisch interpretiert, sowie alle Meßorte klimatologisch charakterisiert.

Die vorliegende Arbeit beinhaltet Ergebnisse des Forschungsschwerpunktes SNOSP und behandelt im wesentlichen Untersuchungen am Goldberg- und Wurtenkees. Diese Gletscher wurden einerseits auf Grund ihrer östlichen Lage im Bereich der Alpen (als östlichster Meßpunkt für den alpenweiten Vergleich) und andererseits wegen ihrer Nähe zum Sonnblickobservatorium gewählt. Auf dem Sonnblickobservatorium werden eine Vielzahl von luftchemischen, meteorologischen und Niederschlagsmessungen durchgeführt, die für die Interpretation der Schadstoffmessungen der Schneedecke wichtig sind.

---

<sup>1</sup> EUROTRAC (European Experiment on Transport and Transformation of Environmentally Relevant Trace Constituents in the Troposphere over Europe) ist ein Umweltprojekt von EUREKA. Näheres dazu siehe Puxbaum (1991).

An diesen Gletschern wurden im Rahmen des SNOSP-Programmes Schneeproben genommen und hinsichtlich der wichtigsten Schadstoffe untersucht. Unter dem Begriff Schadstoffe werden in dieser Arbeit die wichtigsten Anionen ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  und  $\text{Cl}^-$ ) verstanden, die für die „Versauerung“ der Schneedecke verantwortlich sind. Gemessen wurden im Rahmen dieser Arbeit jedoch alle wichtigen anorganischen Ionenkomponenten, die einerseits eine Ionenbilanzierung ermöglichen und andererseits auch Puffereffekte erfassen lassen.

Zwei Fragen drängen sich in diesem Zusammenhang auf:

- a) warum wird die Schadstoffbelastung der Schneedecke gemessen (und nicht die Schadstoffbelastung von Neuschnee, Regen, Nebel etc.)
- b) warum werden die Schneeproben im Hochgebirge genommen (was einen sehr hohen logistischen und finanziellen Aufwand erforderlich macht).

Messungen der Schadstoffbelastung einer hochalpinen Schneedecke bieten mehrere Vorteile: Wie bereits vorher erwähnt, hat Schnee die Eigenschaft, atmosphärische Gase und Teilchen (und somit auch Schadstoffe) während seiner Bildung und Ablagerung an sich zu binden und schließlich am Boden witterungsbedingt schichtförmig zu deponieren. Solange der abgelagerte Schnee (die Schneedecke) nicht schmilzt, bleibt die Konzentration der meisten Ionenkomponenten in der Schneedecke konserviert. Umgekehrt ist es jedoch auch möglich, aus der Schadstoffkonzentration der einzelnen Schneesichten auf die Belastung des Herkunftsgebietes des Niederschlages zu schließen. In kalten Gebieten (Polargebiet, hochalpine Gebiete) kann man daher auf Grund der Konservierung der Schadstoffe durch die Entnahme von Proben oder Bohrkernen und geeigneten Datierungsmethoden frühere Schadstoffkonzentrationen bestimmen (siehe z. B. Wagenbach et al., 1988). Die Schadstoffkonzentration in der Schneedecke beinhaltet neben der nassen Deposition auch die trockene Deposition, die aber für die meisten Schadstoffe einer hochalpinen Schneedecke prozentual nur einen geringen Anteil ausmacht (siehe z. B. Cadle und Muhlbaier-Dasch, 1987).

Im Fall der Alpengletscher kann man für Seehöhen über 3000 m in der Periode November bis März Schmelzfreiheit, bzw. für die gesamte winterliche Akkumulationsperiode höchstens nur sehr geringfügiges Schmelzen der Schneedecke annehmen, weshalb auch hier die Ionenkonzentrationen in der Schneedecke konserviert bleibt. Dies ermöglicht es, am Ende des Winters Schneeproben zu ziehen und so die Schadstoffbelastung im Niederschlag für die gesamte Winterperiode zu bestimmen. Weil in diesen großen Seehöhen während des Winters praktisch jeder Niederschlag in Form von Schnee fällt und in Abhängigkeit von Witterungsperioden schichtweise abgelagert wird, bildet sich somit ein durchgehendes Archiv der Schadstoffkonzentration für diese Zeitperiode. Eine möglichst ungestörte Schneeakkumulation wäre für die Untersuchungen am günstigsten, was jedoch im Hochgebirge nicht vorkommt. Schneeakkumulations- und -erosionsprozesse durch starken Wind führen immer wieder zu Störungen der Ablagerungen. Relativ gesehen bieten jedoch die Mulden und sanfteren Geländeformen im Nährgebiet der Gletscher im Gegensatz zum Gelände außerhalb bessere und brauchbarere Bedingungen. In Tallagen, die windschwächer sind, müßte man jede Niederschlagsprobe unmittelbar nach dem Ereignis sammeln, da erstens nicht jeder Niederschlag in Form von Schnee fällt, und zweitens es in Abhängigkeit von der Seehöhe öfters zu Schmelzprozessen kommt. Der Vorteil der Schmelzfreiheit im Hochgebirge wiegt jedoch den Nachteil des gestörten Schneeprofiles auf. Bei einem stratigraphisch ungestörten Schneeprofil ist dadurch nicht nur die Schadstoffbelastung je Schneesicht meßbar, sondern, wenn jeweils eine Datierung durchgeführt wird, die zeitliche Zuordnung zu den Niederschlagsereignissen und damit die Auflösung der Akkumulationsperiode in Einzelereignisse möglich.

Schmelzprozesse sind jedoch nicht außer acht zu lassen. Findet Schmelzung in der Schneedecke statt, kommt es zu sogenannten "Säurepulsen", das heißt mit dem ersten Schmelzvorgang wird ein Großteil der sauren Komponenten aus der Schneedecke ausgewaschen, was für die sensiblen hochalpinen Ökosysteme sehr weitreichende Folgen haben kann (Baird et al., 1987).

Während des Winterhalbjahres ist für den europäischen Raum die Häufigkeit von Inversionswetterlagen bzw. von Wetterlagen mit einer Mischungsschichthöhe unter 3000 m sehr groß. Das bedeutet, daß die gemessenen Schadstoffbelastungen in einer Seehöhe über 3000 m im wesentlichen nicht von lokalen Emittenten stammen, sondern durch Ferntransport zu den Alpen gebracht wurden (siehe z.B. Seibert 1991). Somit ergibt sich mit den Messungen dieser Arbeit die Möglichkeit, den Ferntransport der Schadstoffbelastung zu untersuchen.

Messungen der Ionenkonzentration der Schneedecke werden am Wurtenkees schon seit dem Jahre 1983 und am Goldbergkees seit dem Jahre 1987 durchgeführt. Diese Untersuchungen waren zum Großteil als Pilotstudie für das ALPTRAC Projekt gedacht und konnten mit nur geringen finanziellen Mitteln durchgeführt werden. Neben der eigentlichen Ionenmessung sollte vor allem Erfahrung bei der Probennahme und Analytik gewonnen werden. Eine Zusammenfassung dieser ersten Untersuchungen ist in der Diplomarbeit von W. Vitovec (1988) zu finden. Diese lange Meßreihe bietet andererseits eine einmalige Gelegenheit, die Auswirkungen in den Änderungen der Schadstoffemissionen der letzten Dekade auf die Depositions- bzw. Konzentrationswerte zu untersuchen.

Allgemeine Studien über die Schadstoffbelastung der Schneedecke sind in der Literatur sehr zahlreich zu finden. Es sei hier nur das Buch von H. G. Jones und W. J. Orville-Thomas (1987) erwähnt. Seltener wurde die Schadstoffbelastung hochalpinen Schnees untersucht, während der Ansatz einer zeitlichen Datierung der Schneeeproben und eine dadurch mögliche meteorologisch-klimatologische Interpretation noch nie durchgeführt wurde. Eine derartige Interpretation wurde höchstens für einzelne Fälle von Neuschneeeproben versucht.

Folgende Punkte sollten daher im Rahmen des ALPTRAC-SNOSP-Projektes am Goldbergkees und Wurtenkees untersucht werden:

- Repräsentativität einer punktuellen Schadstoffmessung in der Schneedecke.
- Regionaler und Überregionaler Vergleich der Schadstoffdeposition in den Alpen.
- Untersuchung der langjährigen Depositionsmessungen in der Schneedecke am Wurtenkees und Goldbergkees im Vergleich zu den Emissionsänderungen dieser Periode
- Entwicklung einer Datierungsmöglichkeit von Schneeeproben aus einem Schneeschacht (Schneekalender) hinsichtlich einer Zuordnung zu einzelnen Niederschlagsereignissen.
- Anwendung der Schneekalendermethode am Beispiel des Goldbergkees.
- Klassifikation der Schadstoffbelastung in den einzelnen Schneeschichten nach verschiedenen charakteristischen Wetterlagen.

Ein ausführliche Darstellung von allen oben erwähnten Fragestellungen findet sich in der Dissertation von Schöner (1995). Im vorliegenden Bericht sollen nur einige wesentliche Ergebnisse der Ionenkonzentrationsmessungen der Winterschneedecke von Wurtenkees und Goldbergkees vorgestellt werden.

Die Feldarbeiten und Probennahmen wurden von M. Staudinger, T. Wiesinger, G. Rad, U. Wührheim, B. Riepl, F. Scharm, M. Schöner, H. Steindl, E. Hagenauer, M. Ruhsam, K. Blochberger, W. Tschervenka, M. Mayerl, T. Bruggraber, K. Jerlich, C. Resch, J. Keintzel, I. Schwarzl, T. Lackner, H. Lindler, L. Rasser, S. Weigl, A. Trieb, K. Fussenegger und W. Schöner durchgeführt.

Die Analysen der Schneeproben hinsichtlich der wichtigsten Ionen wurden vom Institut für Analytische Chemie, Abteilung für Umweltanalytik der Technischen Universität Wien durchgeführt. Die Bestimmung der  $^{18}\text{O}$  und  $^2\text{H}$  Isotope erfolgte durch Dr. W. Stichler (International Atomic Energy Agency, Section for Isotopic Hydrology).

## 2. Besonderheiten der Ionendeposition für eine hochalpine winterliche Schneedecke

Einige Besonderheiten der Ionendeposition in einer hochalpinen winterlichen Schneedecke sollen in diesem Kapitel noch kurz angeführt werden, da sie für die Interpretation der Ionenmessungen von wesentlicher Bedeutung sind.

- 1.) In Höhenbereichen in denen sich die beiden Probennahmestellen dieser Arbeit (im Gipfelbereich von Sonnblick und Schareck) befinden, fällt während der Periode Oktober bis Mai (Winterhaushaltsjahr der Massenbilanz) jeder Niederschlag in fester Form.
- 2.) Die Schneedecke sammelt sowohl die trockene Deposition, die okkulte Deposition als auch die nasse Deposition und ist somit mit anderen Depositionsmessungen (z.B. WADOS) nur bedingt vergleichbar. Für den Anteil der einzelnen Depositionsarten an der Gesamtdeposition gibt es für den Ostalpenbereich keine zuverlässigen Messungen. Eine Untersuchung von Cadle und Muhlbaier-Dasch (1987) gibt für eine ländliche Meßstelle in Nord-Michigan (USA) einen Anteil der trockenen Deposition an der Gesamtdeposition von

14 bis 19% für  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  und  $\text{NH}_4^+$  sowie von

30 bis 34% für  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  und  $\text{K}^+$  an.

Diese Werte können aber nicht unmittelbar auf den Alpenraum übertragen werden und dienen nur als Anhaltspunkte.

- 3.) Erosions- bzw. Akkumulationsprozesse durch den Wind haben einem Verlust bzw. Zuwachs der Schneeakkumulation eines Meßpunktes zur Folge und führen somit auch zu einer Veränderung der Ionendeposition. Für Depositionsmessungen der Schneedecke ist man daher bestrebt, einen Probennahmeort mit geringem Windeinfluß zu finden.
- 4.) Die aufbauende Metamorphose in der Schneedecke kann die Ionenkonzentrationen auf Grund von Wasserdampftransporten verändern. Diverse Meßergebnisse (z. B. Sigg et al., 1987, bzw. Ergebnisse dieser Arbeit) zeigen jedoch, daß dieser Einfluß, im Vergleich zum ursprünglichen Konzentrationswert, sehr gering ist.
- 5.) Auf Grund der Höhenlage der beiden Probennahmeorte sind für die Schneedecke nur sehr geringfügige Schmelzprozesse zu erwarten. Daher bleiben die Ionenkonzentrationen in jener Schneeschicht erhalten, mit der sie während eines Schneefallereignisses abgelagert wurden.
- 6.) Der Chemismus der abgelagerten Schneedecke kann durch den Wind nachträglich verändert werden. Da der Faktor Wind eine sehr wesentliche Bedeutung für das Hochgebirge besitzt, wird dieser Punkt im folgenden etwas genauer ausgeführt. In Abbildung 3.5 ist das Problem des Windeinflusses auf den Chemismus der Schneedecke graphisch veranschaulicht. Prinzipiell kann man zwei verschiedene Möglichkeiten des Schneetransportes durch den Wind unterscheiden: Die erste Möglichkeit wird als Saltation bezeichnet und findet in unmittelbarer Nähe der Schneedecke bei geringer

Windgeschwindigkeit statt. Schneeteilchen werden dabei in paraboloidförmigen Trajektorien entlang der Oberfläche durch den Wind im Dezimeterbereich weitertransportiert. Durch diesen Transport werden die Partikel zerbrochen bzw. gerundet. Durch das Zerschneiden können große Aerosolteilchen, die zuerst in den Schneekristall eingebunden waren, freigesetzt werden. Die Saltation wird durch die Oberflächenbeschaffenheit der Schneedecke, durch die atmosphärische Schubspannung in Bodennähe sowie durch den Massenfluß aus der überlagernden Suspensionsschicht bestimmt. Die zweite Möglichkeit des Schneetransportes durch den Wind ist die Suspension. Die Suspensionsschicht schließt an die Saltationsschicht an und besitzt eine Mächtigkeit im Dekameterbereich. In dieser Schicht werden bei großen Windgeschwindigkeiten Teilchen durch Turbulenz (Eddies) bis zu einige km weitertransportiert. Die Teilchen werden dabei gemäß einer Doppelgammafunktion nach ihrer Größe sortiert (Pomeroy et al., 1991), wobei die kleinsten Teilchen am weitesten von der Oberfläche entfernt werden. Während des Transports der Schneekristalle bestimmen (neben dem Zerschneiden durch die Saltation) im wesentlichen zwei Prozesse die chemische Veränderung der Teilchen (Abbildung 2.1). Durch Sublimation kann es zu einer Konzentrationserhöhung in den Schneekristallen kommen, wobei aber dieser Vorgang sehr stark von der Temperatur, der Feuchtigkeit und dem Durchmesser der Teilchen abhängt (Pomeroy et al., 1991). Der zweite wesentliche Vorgang der zur Änderung des Chemismus der Eiskristalle während des Transportes durch den Wind führt ist das Aerosol Scavenging, wobei eine mögliche elektrostatische Aufladung der Teilchen in der Saltationsschicht einen großen Einfluß auf das Aerosol Scavenging besitzen kann.

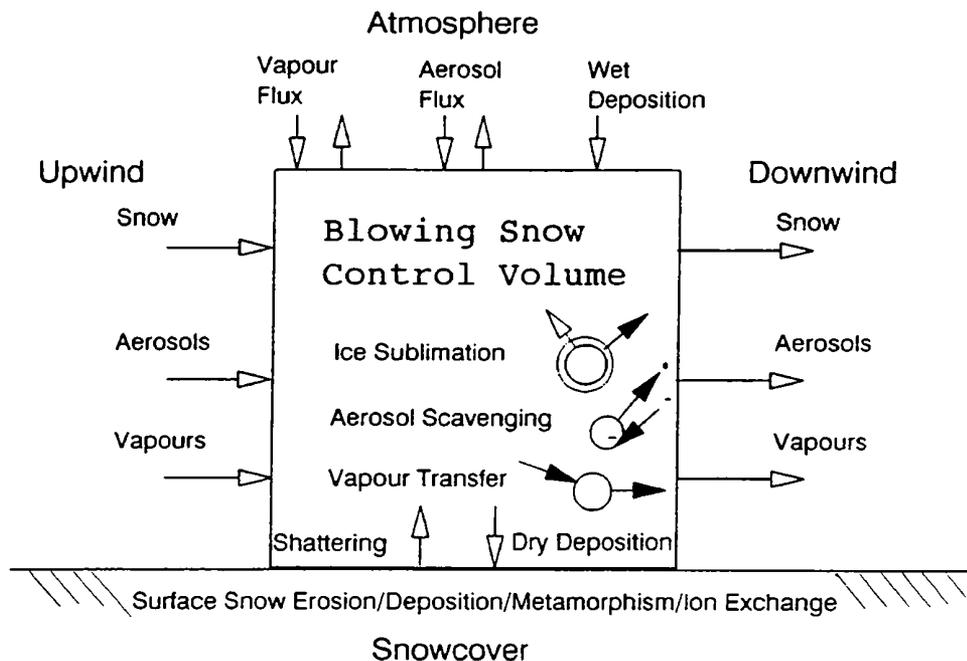


Abbildung 2.1: Veränderung des Chemismus des Oberflächenschnees durch den Windeinfluss für ein definiertes Volumen (aus Pomeroy et al., 1991)

Meßergebnisse von Delmas und Jones (1987) an einer Schneedecke in Ostkanada zeigen eine Abnahme der Ionenkonzentrationen des Oberflächenschnees nach einer Periode mit Windeinfluß. Dagegen konnten Pomeroy et al. (1991) in einer Untersuchung der Schneedecke in Schottland eine Erhöhung der  $\text{NH}_4^+$  und  $\text{NO}_3^-$  Konzentration im akkumulierten Schnee messen, während  $\text{SO}_4^{2-}$  keine Veränderung zeigte und die Konzentration für  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  und  $\text{Ca}^{2+}$  abnahm.

### 3. Probennahme und Analytik

#### 3.1. Vorgang der Probennahme

Die Schneeprobennahme am Goldbergkees erfolgte in der Vorprojektphase von ALPTRAC Anfang Mai 1987, 1988, 1989 und 1990 sowie während der Laufzeit von ALPTRAC jeweils Anfang März und Anfang Mai 1991, 1992, 1993 und im Mai 1994. Am Wurtenkees wird die Probennahme seit 1983 regelmäßig Anfang Mai durchgeführt. Durch die Probenahmen Anfang März am Goldbergkees sollte die sogenannte "reine Hochwinterphase" und durch die Probenahmen im Mai die gesamte Winterakkumulation erfaßt werden. Die Lage der Probenahmeorte ist aus Abbildung 3.1.1 und die Daten der Probenahmen sind aus Tabelle 3.1.1 zu ersehen.

Um die Schneeproben entnehmen zu können, wurden Schneeschächte bis zum Vorjahreshorizont (Oktober des Vorjahres) gegraben. Dann wurden die Schneeproben mit einem 10 cm langen Stechzylinder aus rostfreiem Stahl abgestochen und zwar der Länge des Stechzylinder entsprechend in 10 cm-Schichten, wobei ein durchgehender Kern der Schneedecke entnommen wurde. Um eine Kontamination der Schneeproben zu vermeiden, wurden während der Probennahme Schutzhandschuhe und Atemschutz getragen. Die Schneeproben wurden anschließend in Tiefkühlsäcken verpackt, gut verschlossen und für den Weitertransport (in gefrorenem Zustand) in Tiefkühlboxen gegeben. Für die erwähnten Schutzmaßnahmen während der Probennahme, während des Transportes und in weiterer Folge auch während der Analyse der Schneeproben sind eine Vielzahl von möglichen Fehlerquellen die Ursache. Eine genaue Beschreibung dieser Fehlerquellen findet man in Legrand und Delmas (1987).

Die Schneeproben wurden vom Sonnblick mit der Materialseilbahn ins Tal und von dort mit einem Kleinbus nach Wien gebracht. Da das Zentrum der Untersuchungen am Sonnblick bzw. Goldbergkees lag, fiel dort auch immer eine wesentlich größere Probenmenge als am Wurtenkees an, die einen Abtransport mit der Seilbahn unumgänglich machte. Am Wurtenkees wurden die Schneeproben in Tiefkühlboxen mit einer Rückentragung zur Talstation "Stübele" der Seilbahn gebracht und von dort mit einem Kleinbus weiter nach Wien transportiert.

Da die Daten der Ionenkonzentrationen der Winterschneedecke auch für einen alpenweiten Vergleich dienen sollten, die Probenahmen an den verschiedenen Alpenorten aber von verschiedenen Gruppen durchgeführt wurden, waren sogenannte "Vergleichs-samplings" notwendig. Diese wurden am Daunerferner im Stubaital (1990) und am Versuchsfeld des Eidgenössischen Institutes für Schnee- und Lawinenforschung in Davos (1993) durchgeführt (Schwikowski, 1994). Trotz der unterschiedlichen ProbenahmeprozEDUREN der einzelnen ALPTRAC Gruppen konnte eine gute Übereinstimmung in den Ergebnissen gezeigt werden und somit kann angenommen werden, daß keine systematischen Fehler bei der Probennahme vorliegen.

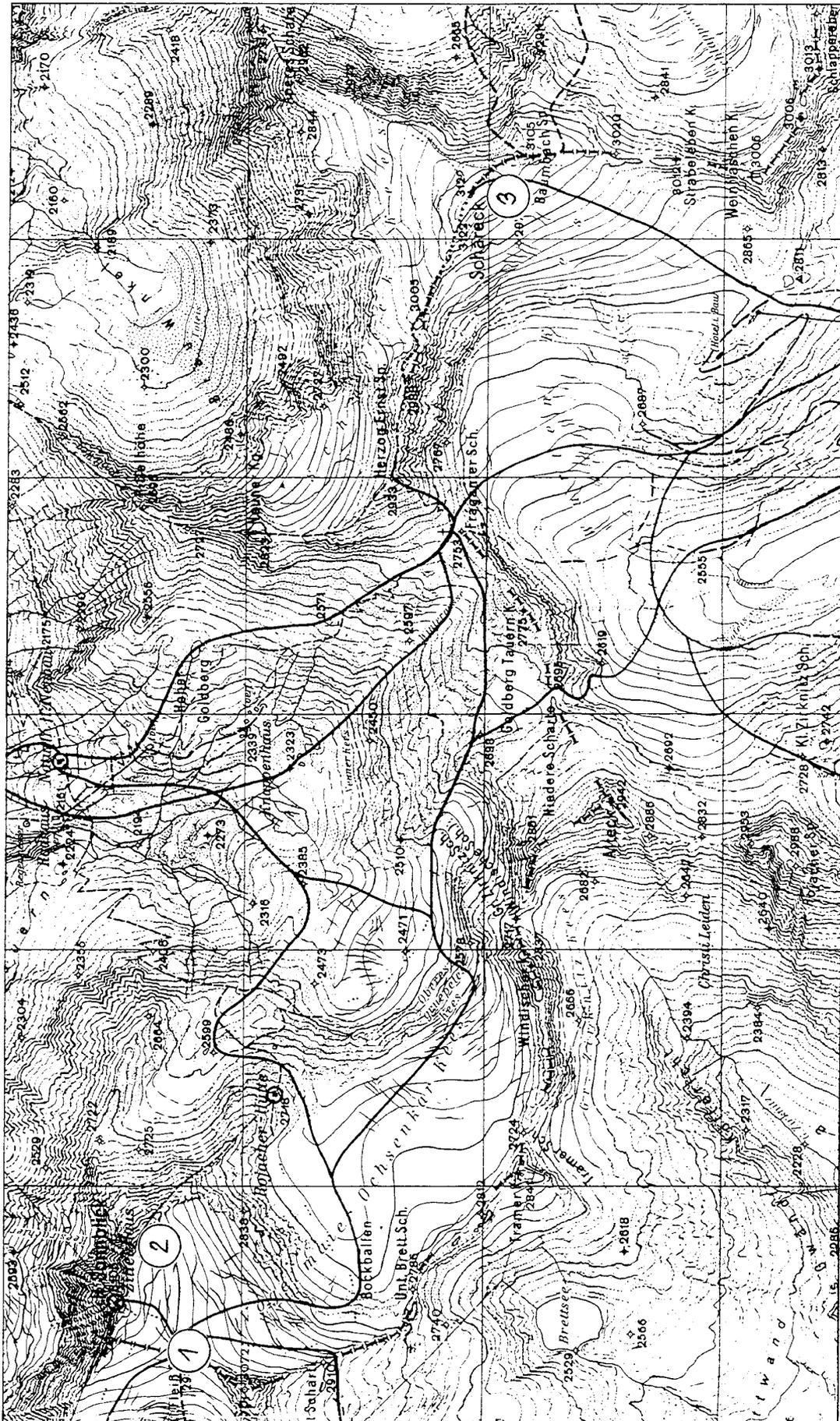


Abbildung 3.1.1: Lage der Probenahmeorte auf dem Goldbergkees (1 = Profil Fleißscharte (1987-1989), 2 = Profil Liesstange (1990-1994)) und auf dem Wurtenkees (3 = Profil Gipfelhang (1987-1994)); Ausschnitt der Alpenvereinskarte 1:25000 (Blatt Sonnblick)

Tabelle 3.1.1: Daten der Schneedeckenbeprobung in der Goldberggruppe

Jahr	Goldbergkees	Goldbergkees	Wurtenkees
	März	Mai	Mai
1982/83			2.5.1983
1983/84			2. 5.1984
1984/85			30.5.1985
1985/86			6.5.1986
1986/87		9.5.1987	24.5.1987
1987/88		7.5.1988	4.5.1988
1988/89		28.4.1989	9.5.1989
1989/90		12.5.1990	5.5.1990
1990/91	5.3.1991	1.5.1991	8.5.1991
1991/92	7.3.1992	30.4.1992	6.5.1992
1992/93	5.3.1993	29.4.1993	4.5.1993
1993/94		29.4.1994	3.5.1994

### 3.2. Analyse der wichtigsten Anionen und Kationen

Die gefrorenen Schneeproben wurden zur Analyse der wichtigsten Ionen ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{Mg}^{2+}$ ) an das Institut für Analytische Chemie, Abteilung für Umweltanalytik (Technische Universität Wien) weitergeleitet.

Die Bestimmung der Ionenkonzentrationen erfolgte für  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , durch Ionenchromatographie (Dionex D10), für  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{Mg}^{2+}$  entweder durch Ionenchromatographie oder Atomabsorptionsspektroskopie. Zusätzlich wurden auch pH-Wert und Leitfähigkeit (bei 25 °C) der Schneeproben gemessen. Die Nachweisgrenze für die einzelnen Ionen ist in Tabelle 3.2.1 zu ersehen.

Tabelle 3.2.1: Nachweisgrenzen der Analyseverfahren in  $\mu\text{eq/l}$  (aus: W. Winiwarter, 1995) und der Isotopenmessungen in ‰ (W. Stichler, persönliche Mitteilung)

Cl	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	Na	$\text{NH}_4^+$	K	Ca	Mg	$\text{d}^2\text{H}$	$\text{d}^{18}\text{O}$
0,6	0,3	0,6	0,9	1,1	0,8	0,1	0,28	1,0	0,15

Eine Kontrolle der Analysenqualität ist gemäß der Elektroneutralitätsbedingung durch die Ionenbilanz (Kationen - Anionen) und durch einen Vergleich der gemessenen mit der aus den Ionenkonzentrationen bestimmten Leitfähigkeit möglich und wurde vom analysierenden Institut für alle Proben durchgeführt.

Ähnlich wie für die Probennahme wurde auch für die Analysen die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der einzelnen Labors (der einzelnen ALPTRAC Gruppen) in sogenannten "ring tests" geprüft. Bei diesen Tests wurden künstliche Schneeproben, mit bekannter Ionenkomposition, an alle Labors versandt und von diesen dann analysiert. Es konnte auch hier, nach anfänglichen Schwierigkeiten bei manchen Ionen, eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse erzielt werden.

### 3.3. Messung der $^2\text{H}$ - und $^{18}\text{O}$ Isotope

Teilweise wurden Schneeproben auch zur Isotopenbestimmung ( $\delta^{18}\text{O}$  und  $\delta^2\text{H}$ ) an die International Atomic Energy Agency (Section of Isotope Hydrology) weitergeleitet. Die stabilen Isotope  $^{18}\text{O}$  und  $^2\text{H}$  wurde mittels Massenspektrometer gemessen.  $\delta^{18}\text{O}$  und  $\delta^2\text{H}$  ist definiert durch (Stichler, 1987):

$$\delta = \left( \frac{R_s}{R_{std}} - 1 \right) 1000(\text{‰})$$

wobei  $R_s$  und  $R_{std}$  die jeweiligen Isotopenverhältnisse ( $^2\text{H}/^1\text{H}$  oder  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) der Probe ( $R_s$ ) und eines Standards ( $R_{std}$ ) sind. Die Nachweisgrenzen der  $\delta^{18}\text{O}$  und  $\delta^2\text{H}$  Messung sind ebenfalls in Tabelle 3.2.1 zu ersehen.

## 4. Ergebnisse der Ionenkonzentrationsmessungen auf dem Wurtenkees und dem Goldbergkees

### 4.1. Überblick über die Ionenkomposition einer hochalpinen winterlichen Schneedecke am Beispiel von Goldbergkees und Wurtenkees

Grundlegende Ergebnisse über die Untersuchung der chemischen Zusammensetzung einer hochalpinen Schneedecke wurden für das Goldbergkees und das Wurtenkees in der Arbeit von Vitovec (1988) gezeigt. Aufbauend auf diese Arbeit sollen hier noch einige weiterführende Ergebnisse beschrieben werden.

Abbildung 4.1.1 zeigt die Ionenzusammensetzung der Schneedecke von Wurtenkees und Goldbergkees, gemittelt über mehrere Jahre. Die Abbildung zeigt, daß die wichtigsten Anionen  $\text{SO}_4^{2-}$  und  $\text{NO}_3^-$  und die wichtigsten Kationen  $\text{H}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  und  $\text{Ca}^{2+}$  sind. Die restlichen Ionen haben nur einen geringen Anteil (kleiner 6%) an der Ionenzusammensetzung der Schneedecke. In Tabelle 4.1.1 sind die mittleren Konzentrationswerte (mit dem Wasserwert gewichteter Mittelwert) einzelner Ionen für die Periode 1987 bis 1994 der gesamten Winterschneedecke sowohl für das Goldbergkees als auch das Wurtenkees dargestellt. Man sieht bereits in dieser Tabelle, daß die Werte der einzelnen Jahren stark schwanken und ein zeitlicher Trend nicht unmittelbar aus der Tabelle abgelesen werden kann. Eine Erklärung für die unterschiedlichen Werte der einzelnen Jahre wird in Kapitel 4.4. gegeben, während Schlußfolgerungen einer Gegenüberstellung von Goldbergkees und Wurtenkees in Kapitel 4.5 beschrieben werden.

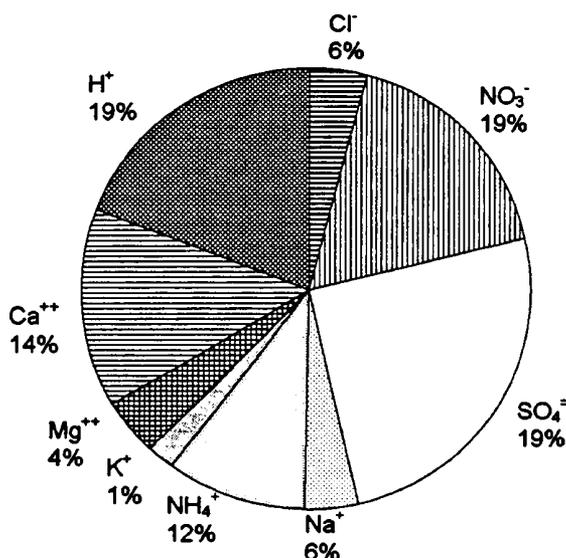


Abbildung 4.1.1:  
Mittlere Ionenzusammensetzung der Schneedecke von Goldbergkees und Wurtenkees; Verwendet wurden Jahre mit vollständiger Ionenbestimmung (siehe Tabelle 4.1)

Tabelle 4.1.1: Ergebnisse der Depositionsmessungen auf Goldbergkees und Wurtenkees für die Jahre 1987 bis 1994.

	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	H <sup>+</sup>	Wasserw. (cm)	Bemerkung
	µeq/l										
GOL 87	2,3	9,1	13,2	2,2	5,2	1,1	2,3	7,7	10,1	169	
GOL 88	4,2	9,7	12,5	3,2	7,6	1,9	nicht gemessen			101	
GOL 89	2,3	7,5	8,2	1,7	4,5	0,8	nicht gemessen		6,0		arith. Mittel
GOL 90	3,0	6,4	10,1	2,2	9,3	1,4	nicht gemessen		7,9		arith. Mittel
GOL 91 III	5,6	11,0	6,9	5,6	4,3	1,9	1,9	4,3	10,6	64	
GOL 91 V	2,1	11,4	9,3	3,7	7,1	0,7	1,9	6,4	9,2	103	
GOL 92 III	3,1	10,5	7,7	3,2	4,4	0,1	2,5	7,4	5,6	131	
GOL 92 V	2,7	9,0	8,3	3,1	4,7	0,4	2,4	6,4	8,4	162	
GOL 93 III	1,4	7,8	8,3	1,2	4,1	0,2	1,2	2,7	9,0	75	
GOL 93 V	1,3	11,8	11,9	1,0	8,6	0,1	2,1	6,0		130	
GOL 94	1,8	6,6	8,2	1,5	5,7	0,1	1,3	6,8		134	
WUR 87	1,5	8,6	11,7	1,2	4,8	0,8	0,6	5,4	12,6	109	
WUR 88	3,7	9,7	8,2	2,8	6,4	1,3	nicht gemessen			128	
WUR 89	5,6	9,4	10,7	4,9	4,4	2,3	nicht gemessen		3,4	156	
WUR 90	3,2	10,0	13,1	2,0	9,6	1,1	nicht gemessen		7,7	96	
WUR 91	4,1	8,1	7,8	4,0	6,7	1,7	2,1	3,4	6,3	102	
WUR 92	5,2	9,4	8,3	5,2	5,0	0,6	1,1	5,0	10,2	154	
WUR 93	1,7	9,4	8,7	1,3	7,0	0,2	2,2	7,2	10,9	127	
WUR 94	2,6	6,2	11,3	2,2	5,4	0,1	1,3	10,9	4,5	117	

## 4.2 Hauptquellen für die Ionenkonzentrationen in der Schneedecke

Untersucht man die Ionenkonzentrationen im Niederschlag hochalpiner Meßstellen, so sind NO<sub>3</sub><sup>-</sup> und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> die wesentlichen Anionen und H<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> und Ca<sup>2+</sup> die bedeutendsten Kationen. Als wichtigste Quellen für die verschiedenen Ionen im hochalpinen Niederschlag werden angenommen:

- anthropogene Aktivitäten für NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> und NH<sub>4</sub><sup>+</sup>
- Staubfälle für Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> und K<sup>+</sup>
- maritime Aerosole für Na<sup>+</sup> und Cl<sup>-</sup>.

Diese Einteilung der drei wichtigsten Quellen kann mittels einer Faktoranalyse der Ionenkonzentrationen in den Schneeproben verifiziert werden. In Tabelle 4.2.1 sind die Ergebnisse einer Faktoranalyse (Hauptkomponentenmethode mit anschließender Varimax-Rotation) für die Proben des Goldbergkees für die Jahre 1991 bis 1993 dargestellt. Mit 3 Faktoren kann man 80% der gesamten Varianz erklären. Faktor 1 weist eine hohe Faktorladung für NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, und NH<sub>4</sub><sup>+</sup> auf, Faktor 2 für Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> sowie K<sup>+</sup> und Faktor 3 für Na<sup>+</sup> und Cl<sup>-</sup>. Abbildung 4.2 zeigt die Faktorladungen für die verschiedenen Ionen auch in graphischer Form. Man sieht sehr deutlich, daß die obige Einteilung in 3 verschiedene Hauptquellen für die Ionenkonzentrationen im Schnee sehr gut durch die Faktoranalyse bestätigt wird. Ein ähnliches Ergebnis wurde durch Maupetit (1994) für die französischen SNOSP Probennahmeorte gezeigt.

Tabelle 4.2.1: Ergebnisse der Faktoranalyse für die Ionenkonzentrationen der Schneedecke vom Goldbergkees (Periode 1991-1993)

## Eigenwerte

Faktor	Eigenwert	Varianz (%)	Varianz kum. (%)
1	3,11	38,8	38,8
2	1,93	24,2	63,0
3	1,41	17,6	80,6

## VARIMAX Faktorladungen

	Faktor			Kommunalität
	1	2	3	
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	0,93	0,21	0,02	0,91
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,93	0,12	-0,04	0,88
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,86	0,04	0,07	0,74
Ca <sup>++</sup>	0,08	0,96	0,06	0,93
Mg <sup>++</sup>	0,13	0,80	0,13	0,68
K <sup>+</sup>	0,12	0,77	0,07	0,62
Na <sup>+</sup>	-0,05	0,09	0,91	0,84
Cl <sup>-</sup>	0,09	0,13	0,91	0,85
Quadratsumme	2,51	2,25	1,69	6,45
% der Varianz	31,4	28,1	21,1	80,6

- 1: Cl<sup>-</sup>
- 2: NO<sub>3</sub><sup>-</sup>
- 3: SO<sub>4</sub><sup>=</sup>
- 4: Na<sup>+</sup>
- 5: NH<sub>4</sub><sup>+</sup>
- 6: K<sup>+</sup>
- 7: Mg<sup>++</sup>
- 8: Ca<sup>++</sup>

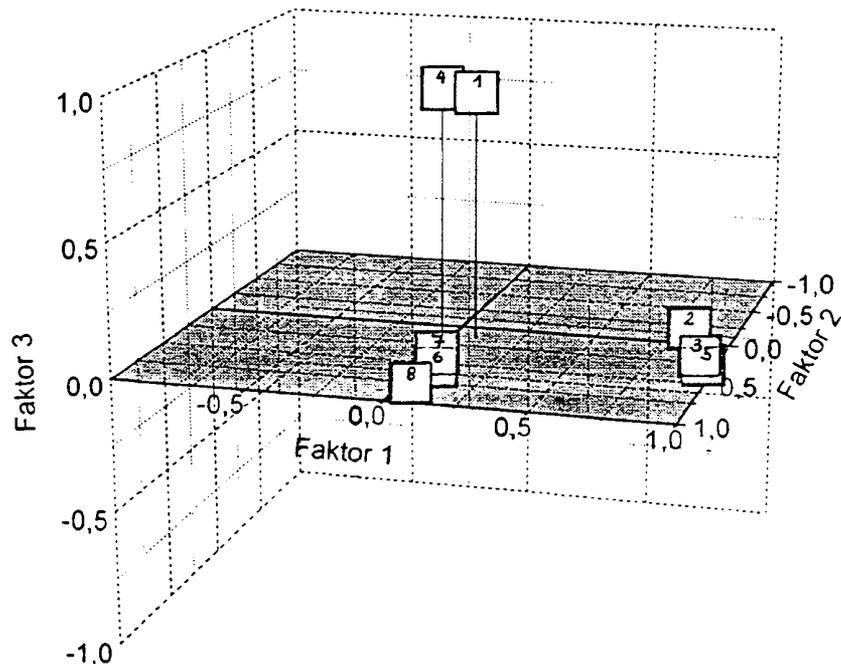


Abbildung 4.2.1: Ergebnis der Faktoranalyse für die Schneeproben vom Goldbergkees der Periode 1991 bis 1993 für die Überprüfung der Annahme über die Hauptquellen der Ionenzusammensetzung in der Schneedecke; Faktor 1 = anthropogene Aktivitäten, Faktor 2 = Staubfälle und Faktor 3 = maritime Aerosole

#### 4. 3. Bedeutung der Staubfälle für die Schadstoffbelastung des Schnees

Staub wird vorwiegend durch trockene Deposition auf der Schneeoberfläche abgelagert, wobei das Verteilungsmuster stark vom Wind beeinflusst wird. Das Verteilungsmuster erklärt wahrscheinlich auch die hohe räumliche Variabilität der Ionenkomponenten des Staubfalls (s. Schöner, 1995). Zwei wesentliche Arten von Staubfällen können unterschieden werden. Erstens der durch Ferntransport herangebrachte Saharastaub und zweitens

lokale Staubeinwehungen. Der durch anthropogene Prozesse (Zementherstellung, Kraftwerke etc.) emittierte Staub ist vom Standpunkt der Konzentration für die hochalpine Schneedecke von untergeordneter Bedeutung. Er ist aber auf Grund der Gesamtmenge von  $\text{Ca}^{2+}$  Deposition für die neutralisierende Wirkung der versauerten Schneedecke wichtig. Lokale Staubeinwehungen größeren Ausmaßes finden nur dann statt, wenn die Schneedecke nicht völlig geschlossen ist und daher eine Einwehung von den umliegenden Kämmen, Graten, Moränen etc. möglich ist und außerdem der Boden nicht gefroren ist. Daher sind derartige Staubbfälle meist noch im Oktoberschnee zu finden, wobei aber die gemessenen Ionenkonzentrationen etwa für  $\text{Ca}^{2+}$  deutlich unter jenen für Saharastaubereignissen liegen (hier ist natürlich auch die Geologie des Untersuchungsgebietes entscheidend).

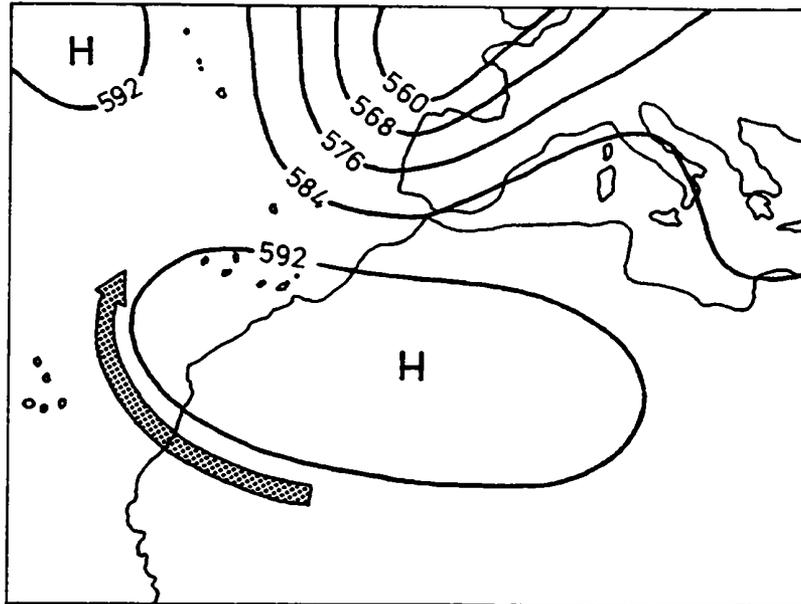


Abbildung 4.3.1: Darstellung einer typischen synoptischen Situation im 500 hPa Niveaue, die mit einem Staubtransport aus der Sahara auf den Atlantik auf der Rückseite eines Hochs und weiter nach Mitteleuropa durch eine starke SW-Strömung verbunden ist (aus Tezlaff et al., 1989)

Transport von Saharastaub zu unseren Alpen kann bei bestimmten Wettersituationen stattfinden. Eine typische Wetterlage für Saharastaubtransport zu den Alpen ist in Abbildung 4.3.1 dargestellt. Ein Hochdruckgebiet über Nordafrika bewirkt eine Ostströmung, wodurch der Staub in Richtung Atlantik gebracht wird. Dort wird er dann durch eine SW-Strömung an einer Trogvorderseite über Westeuropa Richtung Alpen transportiert, wobei auch eine beträchtliche Hebung der Luftmassen stattfindet (indirekter Transport). Bei einer zweiten typischen Wetterlage für Saharastaubtransport wird die mit Staub belastete Luft direkt durch eine starke S- bis SW-Strömung gegen die Alpen geführt (direkter Transport).

In der Winterschneedecke der Goldberggruppe kann ungefähr ein Saharastaubereignis pro Jahr gefunden werden, das meist in der Periode Anfang März bis Mai stattfindet. In Tabelle 4.3.1 sind alle identifizierten Saharastaubfälle in der Schneedecke für die Jahre 1990/91 bis 1993/94 aufgelistet.

Tabelle 4.3.1: Identifizierte Saharastaubfälle in den Schneeeproben vom Goldbergkees und vom Wurtenkees für die Jahre 1990/91 bis 1993/94 (Die Nummern bezeichnen die Schneeprobennummer; \* bedeutet, daß die Staubfälle im Schneeprofil identifiziert wurden; ? bedeutet, daß der Staubfall im Schneeprofil nicht nachgewiesen werden konnte bzw. nicht in den Klimaaufzeichnungen registriert wurde).

Jahr	Goldbergkees		Wurtenkees		Datum lt. Klimaaufzeichn.
	März	Mai	Mai		
1990/91	—	77,80*	12,13*		9.3.1991
1991/92	106,107,108	22*	?		6.3.1992
1992/93		1*	?		25./26./27.4.1993
1993/94		3,4*	3,4*		?

Saharastaubfälle wurden im Rahmen des ALPTRAC Projektes recht genau untersucht (z.B. Schwikowski, 1992). Ihre Bedeutung liegt in ihrer Pufferwirkung, das heißt, in der neutralisierenden Wirkung auf die Versauerung des Schnees durch  $\text{NO}_3^-$  und  $\text{SO}_4^{2-}$ . In Abbildung 4.3.2 ist die typische Aerosolgrößenverteilung während eines Saharastaubfalles und ohne Saharastaubsituation dargestellt. Sehr deutlich kommt hier die Verschiebung der Verteilung in Richtung größere Aerosolteilchen während des Staubfalls zum Ausdruck.

Durch Saharastaubfälle kann es bei entsprechendem Wetter zu einem oberflächlichen Antauen der Schneedecke kommen. Zwei wesentliche Gründe sind dafür entscheidend. Erstens bewirkt der Staub an der Oberfläche eine starke Verminderung der kurzwelligen Albedo und zweitens ist zu der Zeit, wenn diese Staubfälle stattfinden, das Strahlungsangebot schon sehr hoch. Durch diese Schmelzvorgänge werden die einzelnen Ionenkomponenten aber nur sehr geringfügig verlagert. Deutlich sichtbar ist das für das Profil vom Goldbergkees im Mai 1991 (Abbildung 4.3.3) an Hand der  $\text{Ca}^{2+}$ -Konzentration. Die deutliche Erhöhung der  $\text{Ca}^{2+}$ -Konzentration durch den Staubfall ist nur bis ungefähr 15 cm unterhalb des sehr ausgeprägten Schmelzhorizontes zu finden.

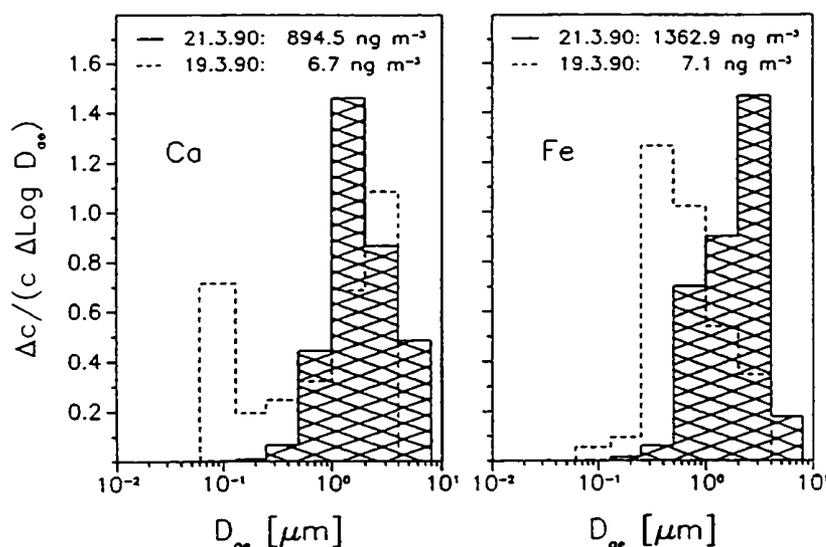


Abbildung 4.3.2: Meßergebnis der Aerosol Größenverteilung für Ca und Fe während eines Saharaereignisses und für den nächsten Tag am Jungfraujoch (Schwikowski et al., 1992)

Berechnet man nun die mit dem Wasserwert gewichtete mittlere  $\text{Ca}^{2+}$  Konzentration der Schneedecke mit und ohne Saharastaubeignis, so kommt die Bedeutung der Saharastaubfälle klar zum Ausdruck (Abbildung 4.3.4 und 4.3.5). So macht etwa der Saharastaubfall für das Schneeprofil am Goldbergkees im Mai 1991 ungefähr 40% der gesamten  $\text{Ca}^{2+}$  Konzentration aus. Dieser hohe Anteil der Saharastaubfälle an der  $\text{Ca}^{2+}$  Deposition unterstreicht ihre Bedeutung für die neutralisierende Wirkung auf die Versauerung der Schneedecke.

Vergleicht man die Saharastaubfälle der Periode 1990/91 bis 1993/94 vom Wurtenkees mit jenen vom Goldbergkees (Tabelle 4.3.1), so fällt auf, daß zwei der vier Staubfälle im Profil am Wurtenkees nicht nachweisbar waren. Der Staubfall im Jahr 1992 wurde jedoch im Rahmen der Massenbilanzuntersuchungen auf dem Wurtenkees in fast allen Schneeprofilen mit Ausnahme des Chemieprofils identifiziert. Auch der Staubfall 1991 war im Profil am Wurtenkees wesentlich schwächer ausgeprägt als im Profil am Goldbergkees. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte die unterschiedliche Exposition der zwei Gletscher im Bereich der Probennahmeorte sein. Während das Wurtenkees im Bereich des Chemieprofils WSW exponiert ist, befindet sich das Chemieprofil am Goldbergkees im Bereich einer ausgeprägten S-Exposition (bei ungefähr gleicher Hangneigung). Da der Saharastaub meist mit einer S-Strömung zu den Alpen gebracht wird, führt vielleicht die bessere Ausrichtung der „Auffangfläche“ Goldbergkees im obersten Gletscherbereich zu einer besseren Sammeleigenschaft. Für eine genaue Erklärung dieses Phänomens wären aber zusätzliche Untersuchungen über die flächenmäßige Verteilung des Saharastaubes auf Goldbergkees und Wurtenkees notwendig.

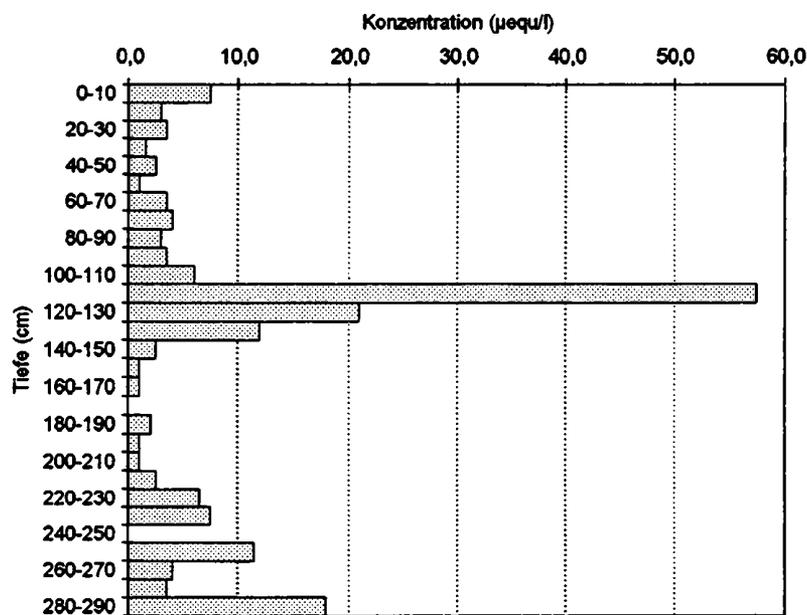


Abbildung 4.3.3: Ca<sup>2+</sup> Konzentration des Schneeprofils vom Goldbergkees im Mai 1991; die Sahara-schicht befindet sich in der Tiefenstufe 110 bis 120 cm

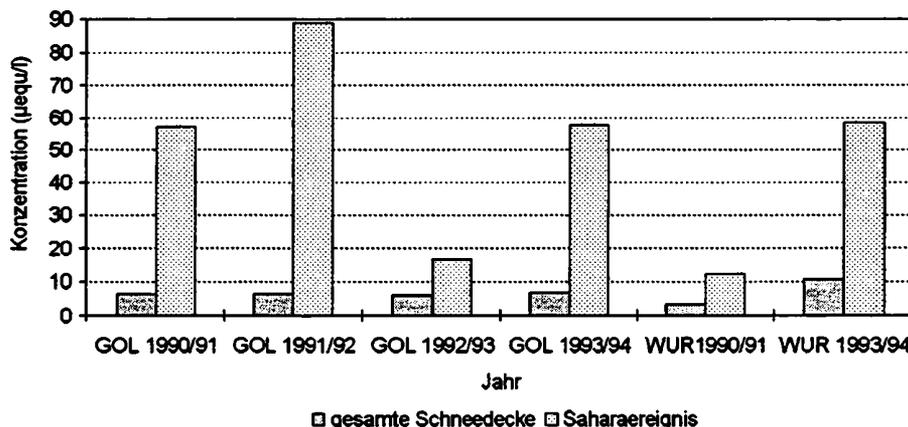


Abbildung 4.3.4: Ca<sup>2+</sup>-Konzentration der Schneeproben mit Saharastaub sowie die Ca<sup>2+</sup>-Konzentration der gesamten Schneedecke für Wurtenkees und Goldbergkees 1990/91 bis 1993/94

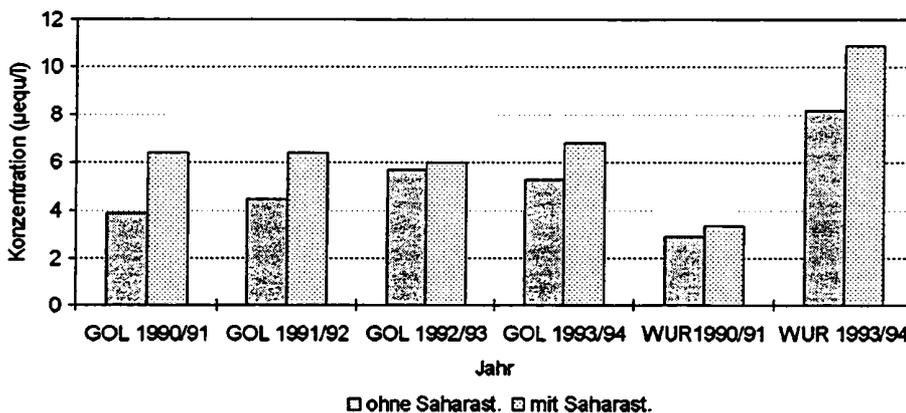


Abbildung 4.3.5: Ca<sup>2+</sup>-Konzentration der Schneeprofile von Wurtenkees und Goldbergkees mit und ohne Saharastaubereignis für die Periode 1990/91 bis 1993/94

### 4.4 Pollutionserignisse

Als Pollutionserignisse werden in dieser Arbeit Schichten der Schneedecke mit einer deutlich höheren NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> und NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Konzentration bezeichnet, wobei der Grenzwert für derartige Pollutionserignisse mit 20 µeq/l festgelegt wurde.

Die Definition der Pollutionserignisse durch einen Grenzwert der Ionenkonzentration (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) von 20 µeq/l erfolgte auf Grund der Variabilität der Ionenkonzentrationen der einzelnen Schneeproben. Um einen ersten Eindruck über die Bedeutung der Pollutionserignisse zu bekommen sind in den Abbildungen 4.4.1 bis 4.4.3 Histogramme der Ionenkonzentration der Schneeproben vom Wurtenkees und vom Goldbergkees für NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> und NH<sub>4</sub><sup>+</sup> dargestellt (Untersuchungsperiode 1990-1994). Die Klassengröße beträgt 2 µeq/l für Konzentrationen bis 20 µeq/l, während Proben mit Ionenkonzentrationen größer 20 µeq/l zu einer Klasse zusammengefaßt wurden. Man sieht für alle Ionen und für beide Gletscher eine positivschiefe Verteilung. Mittels eines Kolmogorov-Smirnov Tests kann gezeigt werden, daß für alle drei Ionen die Annahme einer logarithmischen Normalverteilung gut erfüllt ist.

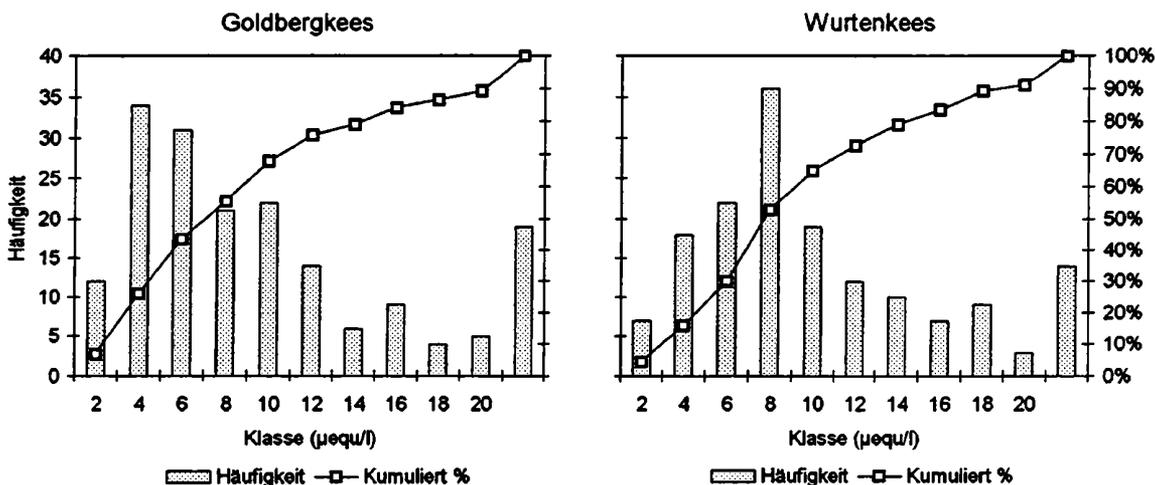


Abbildung 4.4.1: Histogramme der SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Konzentration der einzelnen Schneeproben von Wurtenkees und Goldbergkees der Periode 1989/90 bis 1993/94

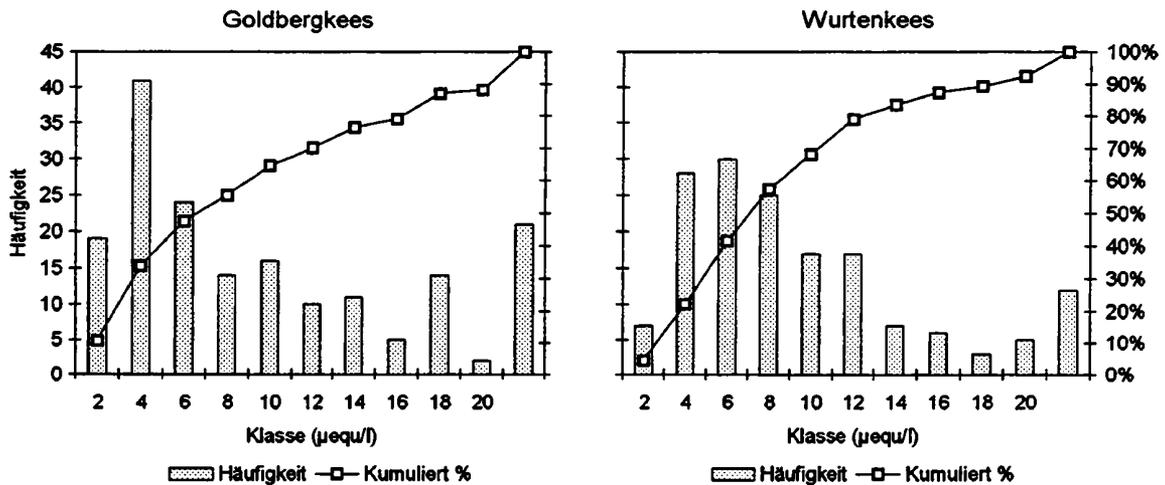


Abbildung 4.4.2: Histogramme der  $\text{NO}_3^-$ -Konzentration der einzelnen Schneeproben von Wurtenkees und Goldbergkees der Periode 1989/90 bis 1993/94

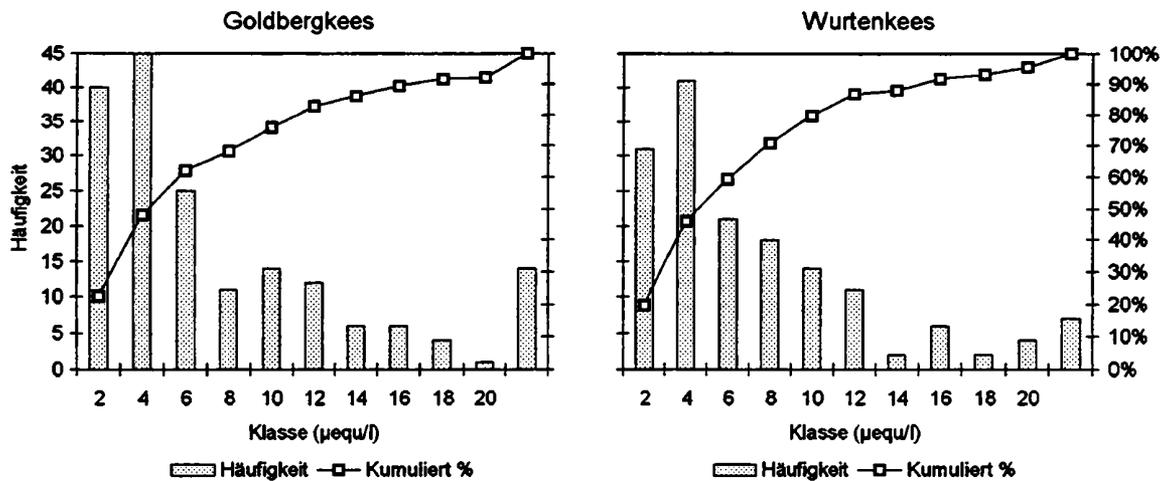


Abbildung 4.4.3: Histogramme der  $\text{NH}_4^+$ -Konzentration der einzelnen Schneeproben von Wurtenkees und Goldbergkees der Periode 1989/90 bis 1993/94

Die meisten Schneeproben weisen eine  $\text{SO}_4^{2-}$ - und  $\text{NO}_3^-$ -Konzentration von 2 bis 4  $\mu\text{eq/l}$  am Goldbergkees bzw. von 4 bis 6  $\mu\text{eq/l}$  ( $\text{NO}_3^-$ ) und 6 bis 8  $\mu\text{eq/l}$  ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) am Wurtenkees auf.  $\text{NH}_4^+$  hat bei beiden Gletschern die meisten Fälle in der Klasse von 2 bis 4  $\mu\text{eq/l}$ . 60% aller Schneeproben von Goldbergkees und Wurtenkees weisen eine  $\text{NH}_4^+$ -Konzentration kleiner 6  $\mu\text{eq/l}$  auf, ungefähr 45% eine  $\text{NO}_3^-$ -Konzentration kleiner 6  $\mu\text{eq/l}$  und 30% (Wurtenkees) bzw. 45% (Goldbergkees) eine  $\text{SO}_4^{2-}$ -Konzentration kleiner 6  $\mu\text{eq/l}$ .

In den Tabellen 4.4.1 und 4.4.2 ist der Anteil der Pollutionseignisse an der Gesamtdeposition von  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  und  $\text{SO}_4^{2-}$  für das Goldbergkees und das Wurtenkees nach verschiedenen Kriterien für die Jahre 1987/88 bis 1993/94 dargestellt. Man sieht, daß der Beitrag der Pollutionseignisse zur Gesamtdeposition größer ist als ihr Anteil am gesamten Wasserwert (bzw. ihr Anteil an der Gesamtanzahl der Proben), wobei maximal ein Faktor 3 als Unterschied auftritt. Prozentmäßig macht aber der Anteil der Pollutionseignisse bis zu 50% der Gesamtdeposition aus. Sehr wesentlich für die jährlichen Schwankungen der Gesamtdeposition von  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  und  $\text{SO}_4^{2-}$  ist aber die Anzahl der Pollutionseignisse (bzw. die Summe des Wasserwertes der Pollutionseignisse) im Verhältnis zur

gesamten Schneedecke. Die Abbildung 4.4.4 zeigt die lineare Korrelation zwischen der Gesamtdeposition der drei Ionen (in  $\mu\text{eq/l}$ ) und dem Verhältnis der Schneeproben mit Pollutionseignissen zur Gesamtprobenzahl. Sowohl für  $\text{NO}_3^-$  und  $\text{SO}_4^{2-}$  und mit Einschränkung für  $\text{NH}_4^+$  findet man eine sehr gute lineare Korrelation, was bedeutet, daß die jährliche Schwankung der Gesamtdeposition zum Großteil durch die Häufigkeit des Auftretens von Pollutionseignissen bestimmt wird.

Tabelle 4.4.1:  $\text{SO}_4^{2-}$ -,  $\text{NO}_3^-$ - und  $\text{NH}_4^+$ -Pollutionseignisse für die Beprobung am Goldbergkees in der Periode 1987-1994 (PE = Pollutionseignis, n = Anzahl der Proben, WE = Wasseräquivalent der Proben, ges = gesamt); mit Pollutionseignis werden Proben mit einer Konzentration größer 20  $\mu\text{eq/l}$  bezeichnet

$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{SO}_4$ ohne PE $\mu\text{eq/l}$	$\text{SO}_4$ PE $\mu\text{eq/l}$	$\text{SO}_4$ ges $\mu\text{eq/l}$	n PE( $\text{SO}_4$ )	n ges	WE PE( $\text{SO}_4$ ) cm	WE ges cm	ohne PE/ges %	n PE/n ges %	WE PE/WE ges %	Anmerk.
1986/87	7,5	40,2	13,2	9	44	29,3	169	57,2	20,5	17,3	
1987/88	7,9	29,8	12,5	6	27	21,3	101	63,0	22,2	21,0	
1988/89	6,3	33,1	8,2	3	41			76,2	7,3		arithm. Mittel
1989/90	6,0	27,9	10,1	7	37			59,2	18,9		arithm. Mittel
1990/91	7,5	31,4	9,3	3	29	7,6	103	80,6	10,3	7,4	
1991/92	7,0	43,0	8,3	2	41	5,9	162	84,5	4,9	3,6	
1992/93	7,4	39,8	11,9	6	36	18,4	130	61,9	16,7	14,2	
1993/94	8,0	35,8	8,2	1	35	2,4	134	97,0	2,9	1,8	

$\text{NO}_3^-$	$\text{NO}_3$ ohne PE $\mu\text{eq/l}$	$\text{NO}_3$ PE $\mu\text{eq/l}$	$\text{NO}_3$ ges $\mu\text{eq/l}$	n PE( $\text{NO}_3$ )	n ges	WE PE( $\text{NO}_3$ ) cm	WE ges cm	ohne PE/ges %	n PE/n ges %	WE PE/WE ges %	Anmerk.
1986/87	6,7	25,0	9,1	6	44	22,7	169	73,1	13,6	13,4	
1987/88	7,3	31,1	9,7	3	27	9,9	101	75,9	11,1	9,8	
1988/89	6,9	20,5	7,5	2	41			91,1	4,9		arithm. Mittel
1989/90	5,5	21,7	6,4	2	37			85,9	5,4		arithm. Mittel
1990/91	8,6	26,3	11,4	5	29	16,3	103	75,7	17,2	15,8	
1991/92	7,2	23,1	9,0	5	41	18,2	162	80,3	12,2	11,2	
1992/93	7,6	28,8	11,8	8	36	26,0	130	64,3	22,2	20,0	
1993/94	6,1	39,5	6,6	1	35	2,4	134	93,0	2,9	1,8	

$\text{NH}_4^+$	$\text{NH}_4$ ohne PE $\mu\text{eq/l}$	$\text{NH}_4$ PE $\mu\text{eq/l}$	$\text{NH}_4$ ges $\mu\text{eq/l}$	n PE( $\text{NH}_4$ )	n ges	WE PE( $\text{NH}_4$ ) cm	WE ges cm	ohne PE/ges %	n PE/n ges %	WE PE/WE ges %	Anmerk.
1986/87	4,4	23,5	5,2	2	44	7,0	169	85,1	4,5	4,1	
1987/88	4,9	49,4	7,6	2	27	6,1	101	64,6	7,4	6,0	
1988/89	4,5	0,0	4,5	0	41			100,0	0,0		arithm. Mittel
1989/90	7,6	29,0	9,3	3	37			81,2	8,1		arithm. Mittel
1990/91	6,0	32,1	7,1	2	29	4,6	103	84,2	6,9	4,5	
1991/92	3,8	26,3	4,7	2	41	5,9	162	81,7	4,9	3,6	
1992/93	4,4	34,1	8,6	6	36	18,4	130	51,0	16,7	14,2	
1993/94	4,6	64,0	5,7	1	35	2,4	134	81,2	2,9	1,8	

Tabelle 4.4.2:  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  und  $\text{NH}_4^+$ -Pollutionsereignisse für die Beprobung am Wurtenkees in der Periode 1987-1994 (PE = Pollutionsereignis, n = Anzahl der Proben, WE = Wasseräquivalent der Proben, ges = gesamt); mit Pollutionsereignis werden Proben mit einer Konzentration größer 20  $\mu\text{eq/l}$  bezeichnet

$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{SO}_4$ ohne PE $\mu\text{eq/l}$	$\text{SO}_4$ PE $\mu\text{eq/l}$	$\text{SO}_4$ ges $\mu\text{eq/l}$	n PE( $\text{SO}_4$ )	n ges	WE PE( $\text{SO}_4$ ) cm	WE ges cm	ohne PE/ges %	n PE/n ges %	WE PE/WE ges %
1986/87	7,2	30,5	11,7	7	33	21,1	109	61,5	21,2	19,3
1987/88	7,0	36,7	8,2	2	30	6,0	128	84,7	6,7	4,6
1988/89	8,0	27,0	10,7	5	41	12,0	156	74,8	12,2	7,7
1989/90	8,5	26,6	13,1	6	23	24,4	96	64,9	26,1	25,5
1990/91	6,5	30,6	7,8	2	32	5,2	102	83,7	6,3	5,1
1991/92	7,3	29,1	8,3	2	38	6,8	154	88,4	5,3	4,4
1992/93	7,9	36,5	8,7	1	34	3,2	127	91,1	2,9	2,5
1993/94	10,0	22,3	11,3	3	30	12,6	117	88,6	10,0	10,8

$\text{NO}_3^-$	$\text{NO}_3$ ohne PE $\mu\text{eq/l}$	$\text{NO}_3$ PE $\mu\text{eq/l}$	$\text{NO}_3$ ges $\mu\text{eq/l}$	n PE( $\text{NO}_3$ )	n ges	WE PE( $\text{NO}_3$ ) cm	WE ges cm	ohne PE/ges %	n PE/n ges %	WE PE/WE ges %
1986/87	7,3	22,2	8,6	4	33	9,4	109	84,9	12,1	8,6
1987/88	8,2	23,1	9,7	3	30	13,3	128	85,4	10,0	10,4
1988/89	7,6	34,2	9,4	4	41	10,8	156	80,5	9,8	6,9
1989/90	8,6	27,9	10,0	2	23	7,0	96	85,5	8,7	7,3
1990/91	6,7	24,7	8,1	3	32	8,0	102	82,2	9,4	7,8
1991/92	7,6	24,5	9,4	4	38	16,0	154	81,2	10,5	10,4
1992/93	7,6	28,5	9,4	3	34	10,8	127	81,1	8,8	8,5
1993/94	6,2	0,0	6,2	0	30	0,0	117	100,0	0,0	0,0

$\text{NH}_4^+$	$\text{NH}_4$ ohne PE $\mu\text{eq/l}$	$\text{NH}_4$ PE $\mu\text{eq/l}$	$\text{NH}_4$ ges $\mu\text{eq/l}$	n PE( $\text{NH}_4$ )	n ges	WE PE( $\text{NH}_4$ ) cm	WE ges cm	ohne PE/ges %	n PE/n ges %	WE PE/WE ges %
1986/87	4,8	0,0	4,8	0	33	0,0	109	100,0	0,0	0,0
1987/88	5,6	30,8	6,4	1	30	1,6	128	87,0	3,3	1,2
1988/89	4,0	32,6	4,4	1	41	2,2	156	90,9	2,4	1,4
1989/90	8,1	25,9	9,6	2	23	8,2	96	84,3	8,7	8,6
1990/91	4,3	34,7	6,7	3	32	8,1	102	63,9	9,4	7,9
1991/92	5,0	0,0	5,0	0	38	0,0	154	100,0	0,0	0,0
1992/93	5,2	26,8	7,0	3	34	11,0	127	73,6	8,8	8,7
1993/94	5,4	0,0	5,4	0	30	0,0	117	100,0	0,0	0,0

Zusammenfassend kann man für die nach obiger Definition festgelegten Pollutionsergebnisse folgende Bedeutung herausstreichen: Die Pollutionsergebnisse können bis zu 50% der gesamten Deposition von  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  und  $\text{SO}_4^{2-}$  ausmachen, wobei ihr Anteil meist aber ungefähr 20% beträgt. Die jährliche Schwankung der Gesamtdosition der drei Ionen in der Schneedecke wird zum Großteil durch die Häufigkeit des Auftretens von Pollutionsergebnissen in den einzelnen Jahren bestimmt.

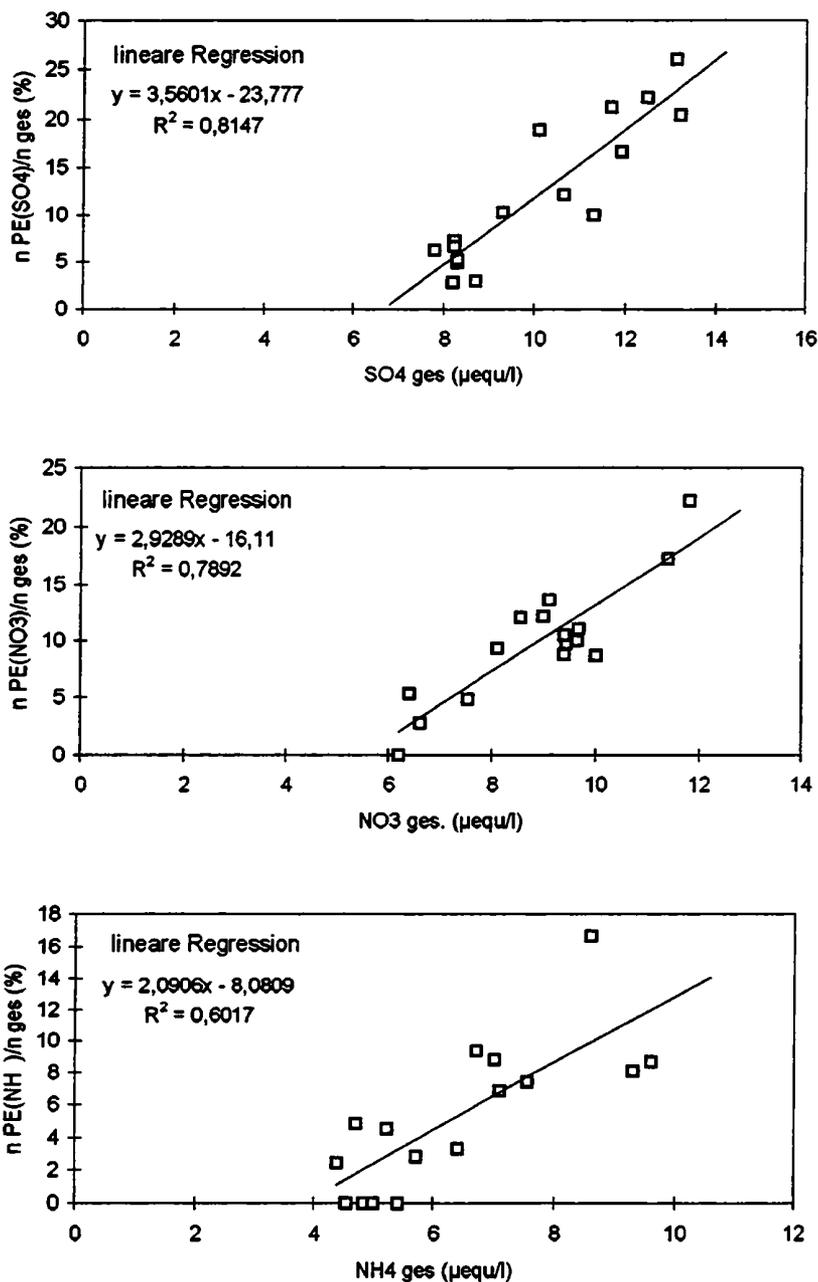


Abbildung 4.4.4: Beziehung zwischen der SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>- und NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Konzentration der gesamten Schneedecke und dem Anteil der Proben mit Pollutionseignis an der Gesamtprobenzahl ( $n_{PE}/n_{ges}$ ) für Wurtenkees und Goldbergkees der Periode 1986/87 bis 1993/94

#### 4.5. Beziehungen zwischen den Emissionen und den Depositionsmessungen am Wurtenkees und Goldbergkees für die Periode 1987 bis 1994

Messungen der Ionenkonzentration der Schneedecke werden am Wurtenkees seit dem Jahr 1983 und auf dem Goldbergkees seit dem Jahr 1987 durchgeführt. Eine erste Untersuchung des langfristigen Trend für verschiedene Ionen wurde von Winiwarter et al. (1994) durchgeführt. Wesentliche Probleme dieser Langfristuntersuchung sind jedoch die uneinheitliche Probennahmetechnik und die oft sehr unterschiedlichen Probennahmeorte am Wurtenkees vor 1987. Erst ab 1987 wurde jedes Jahr eine durchgehende Beprobung

der Schneedecke mit einem 10 cm-Stechzylinder durchgeführt. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit nur die Periode 1987 bis 1994 untersucht, wobei als zweiter Vorteil für die selbe Periode auch die Daten vom Goldbergkees zur Verfügung standen.

In Abbildung 4.5.1 sind die gemittelten  $\text{NO}_3^-$ -,  $\text{SO}_4^{2-}$ - und  $\text{NH}_4^+$ -Konzentrationen (mit dem Wasserwert gewichtete Mittelwerte = vwm) der gesamten Schneedecke für die einzelnen Jahre für das Goldbergkees und das Wurtenkees dargestellt. Während für  $\text{NO}_3^-$  und  $\text{SO}_4^{2-}$  nicht unmittelbar eine Parallelität für Wurtenkees und Goldbergkees festgestellt werden kann, sieht man für  $\text{NH}_4^+$  eine sehr gute Parallelität, aber auch ein recht gutes Übereinstimmen der Einzelwerte.  $\text{NH}_4^+$  dürfte somit eine großräumig geringere Variabilität aufweisen. Dagegen sind für  $\text{NO}_3^-$  und  $\text{SO}_4^{2-}$  schon auf einer so kleinen Entfernung wie für Goldbergkees und Wurtenkees große Unterschiede in der Ionenkonzentration (bis zu einem Faktor 1.6 für  $\text{SO}_4^{2-}$  und 1.7 für  $\text{NO}_3^-$ ) möglich.

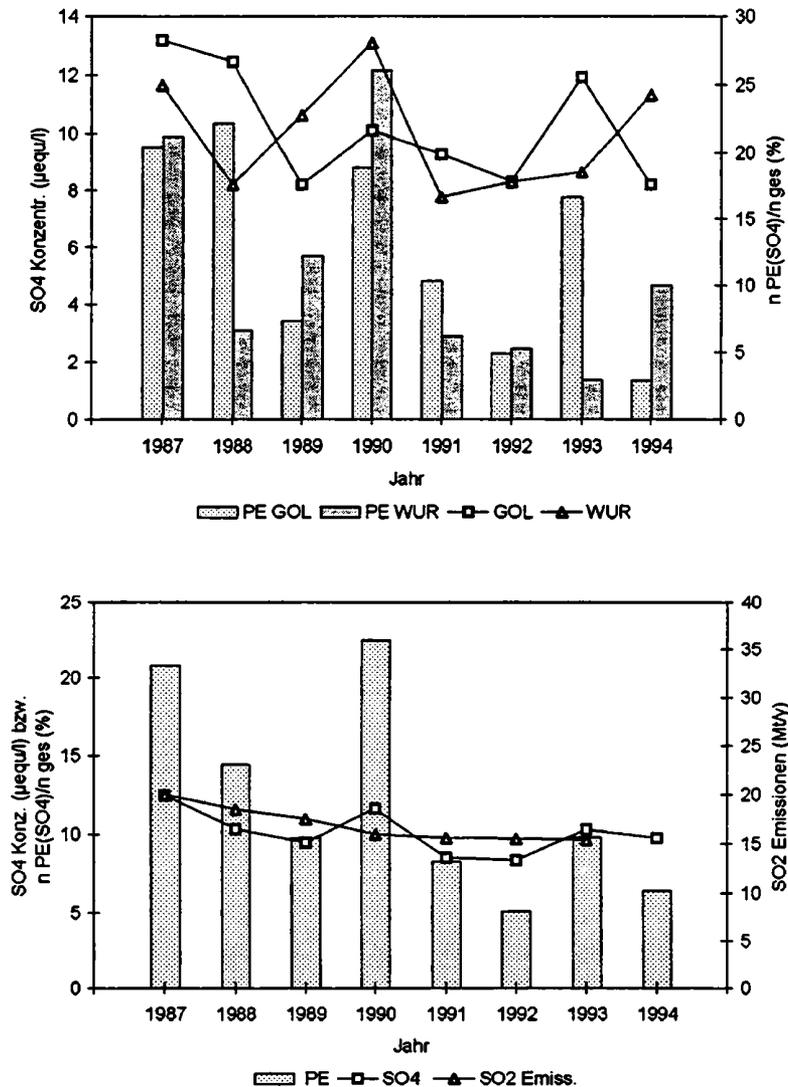


Abbildung 4.5.1: Zeitlicher Trend der  $\text{SO}_4^{2-}$ -Konzentration für Wurtenkees und Goldbergkees im Vergleich zu den  $\text{SO}_2$ -Emmissionen und den Anteil der Proben mit  $\text{SO}_4^{2-}$ -Pollutionsereignis an der Gesamtprobenzahl ( $n_{\text{PE}(\text{SO}_4)}/n_{\text{ges}}$ ) der einzelnen Jahre; die obere Abbildung zeigt die Werte von Wurtenkees und Goldbergkees getrennt, die untere zeigt das Mittel aus beiden Gletschern

Die großen Unterschiede zwischen Wurtenkees und Goldbergkees in den Depositionsdaten können aber gut durch die unterschiedliche Häufigkeit der Pollutionseignisse, die ebenfalls in den Abbildungen 4.5.1, 4.5.2 und 4.5.3 für Goldbergkees und Wurtenkees dargestellt sind, erklärt werden. Hier muß aber noch einmal darauf hingewiesen werden, daß mit "Häufigkeit der Pollutionseignisse" die Anzahl der Proben mit einer Konzentration größer 20  $\mu\text{eq/l}$  verstanden wird. Das heißt, daß mit diesem Verhältnis nicht wirklich die Anzahl der Pollutionseignisse erfaßt wird, da manchmal ein Pollutionseignis aus mehreren Proben besteht. Da aber eine genaue Differenzierung zwischen benachbarten Pollutionseignissen oft nur sehr schwer möglich ist, wurde die im Kapitel 4.1 eingeführte objektivere Definition verwendet.

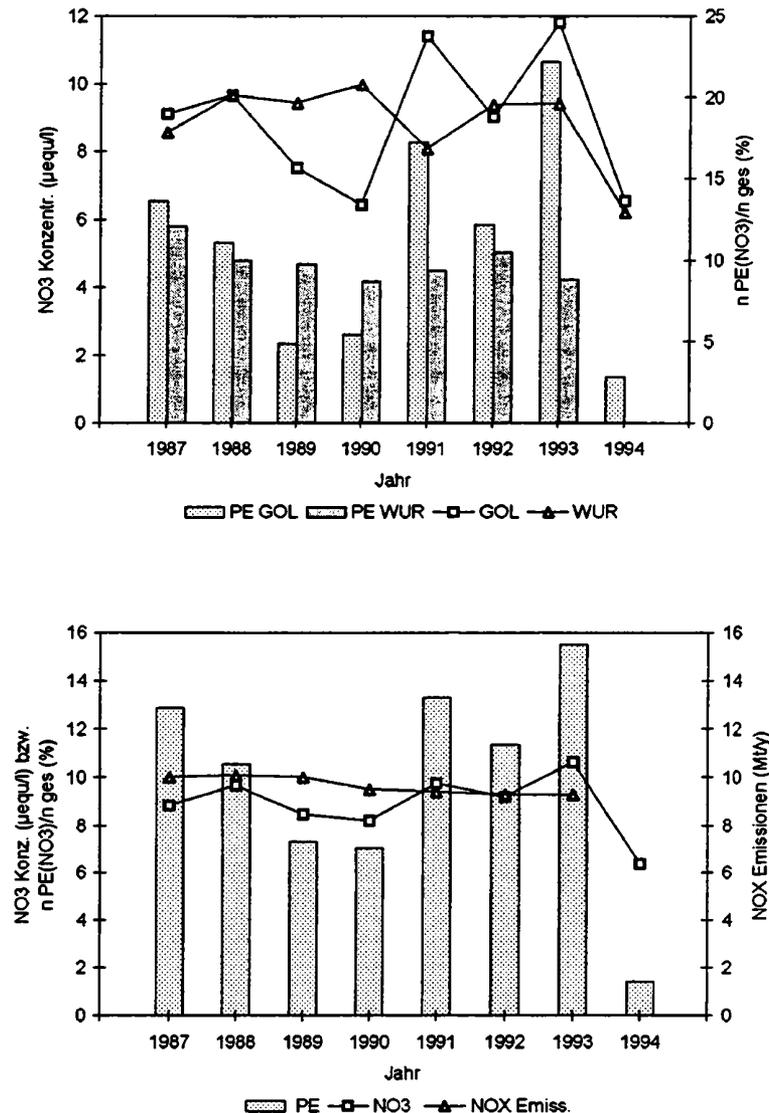


Abbildung 4.5.2: Zeitlicher Trend der NO<sub>3</sub>-Konzentration für Wurtenkees und Goldbergkees zu den NO<sub>x</sub>-Emissionen und den Anteil der Proben mit NO<sub>3</sub>-Pollutionseignis an der Gesamtprobenzahl ( $n_{\text{PE}(\text{NO}_3)}/n_{\text{ges}}$ ) der einzelnen Jahre; die obere Abbildung zeigt die Werte von Wurtenkees und Goldbergkees getrennt, die untere zeigt das Mittel aus beiden Gletschern

In einem nächsten Schritt kann man nun die Depositionsmessungen von Wurtenkees und Goldbergkees mit Emissionsdaten für die selbe Zeitperiode vergleichen. Die Emissionsdaten sind aus Winiwarter (1994) entnommen und sind Jahreswerte der  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  und  $\text{NH}_3$  Emission der für Österreich am wichtigsten umliegenden Staaten (d.h. inklusive Polen und Frankreich).

In den Abbildungen 4.5.1, 4.5.2 und 4.5.3 sind die gemessenen mittleren Ionenkonzentrationen der Schneedecke von Wurtenkees und Goldbergkees für  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  und  $\text{NO}_3^-$ ; daher im Vergleich zu den  $\text{SO}_2$ -,  $\text{NH}_3$ - und  $\text{NO}_x$ -Emissionen dargestellt, wobei jeweils der Mittelwert aus Goldbergkees und Wurtenkees mit den Emissionen verglichen wird. Man sieht, daß im Vergleich zu den Emissionen die Depositionsdaten eine große zeitliche Variabilität aufweisen. Ein ähnliches Ergebnis ist auch von Bohrkernuntersuchungen z.B. am Colle Gnifetti bekannt (Wagenbach et al., 1988).

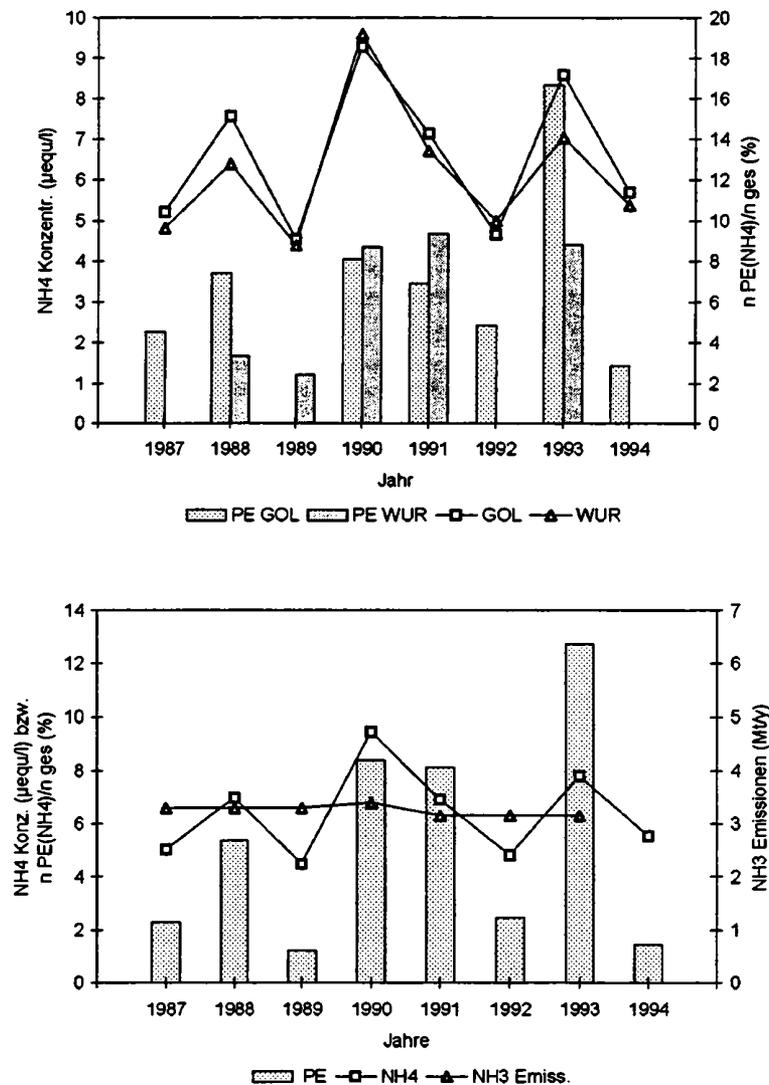


Abbildung 4.5.3: Zeitlicher Trend der  $\text{NH}_4^+$ -Konzentration für Wurtenkees und Goldbergkees im Vergleich zu den  $\text{NH}_3$ -Emissionen und dem Anteil der Proben mit  $\text{NH}_4^+$ -Pollutionsereignis an der Gesamtprobenzahl ( $n_{\text{PE}(\text{NH}_4)}/n_{\text{ges}}$ ) der einzelnen Jahre; die obere Abbildung zeigt die Werte von Wurtenkees und Goldbergkees getrennt, die untere zeigt das Mittel aus beiden Gletschern

Die zeitlich sehr große Variabilität der Depositionsdaten kann, wie oben erwähnt, gut durch die Häufigkeit der Pollutionseignisse erklärt werden. Da die zeitliche Variabilität der Depositionsdaten, verursacht durch die Pollutionseignisse, viel größer ist als der zeitliche Trend in den Emissionen, sind die Änderungen der Emissionen teilweise nur schlecht in den Depositionsdaten wiederzufinden. Deutlicher wird die Beziehung zwischen den Emissionen und den Depositionsdaten von Wurtenkees und Goldbergkees in den gemittelten Daten (Abbildung 4.5.1, 4.5.2 und 4.5.3) Man sieht, daß sich der Rückgang der  $\text{SO}_2$ -Emissionen (vorwiegend durch Emissionsdrosselung in der ehemaligen DDR) gut in den Depositionsmessungen widerspiegelt. Diese Ergebnis ist sehr wertvoll, da der Rückgang der Emissionen bisher nur an wenigen Stellen durch Depositionsdaten zu belegen war. Für  $\text{NH}_4^+$  und  $\text{NO}_3^-$  läßt sich kein zeitlicher Trend in den Depositionsdaten feststellen, wobei aber auch in den Emissionsdaten nur ein geringfügiger Trend zu sehen ist.

#### 4.6 Vergleich Goldbergkees - Wurtenkees

Ein Vergleich der Ergebnisse der Depositionsmessungen von Goldbergkees und Wurtenkees ist auf Grund der Lage der beiden Gletscher sehr interessant. Wie bereits früher erwähnt, liegt das Goldbergkees nördlich des Alpenhauptkammes und das Wurtenkees südlich davon. Obwohl beide Gletscher nur etwa 6 km voneinander entfernt liegen, wirkt sich ihre Lage zum Alpenhauptkamm sehr wesentlich auf ihre Wintermassenbilanz aus. Das Goldbergkees weist im Vergleich zum Wurtenkees wesentlich höhere Werte der spezifischen Wintermassenbilanz auf (Abbildung 4.6.1), die durch den größeren Einfluß von Wetterlagen für das Goldbergkees zu begründen sind.

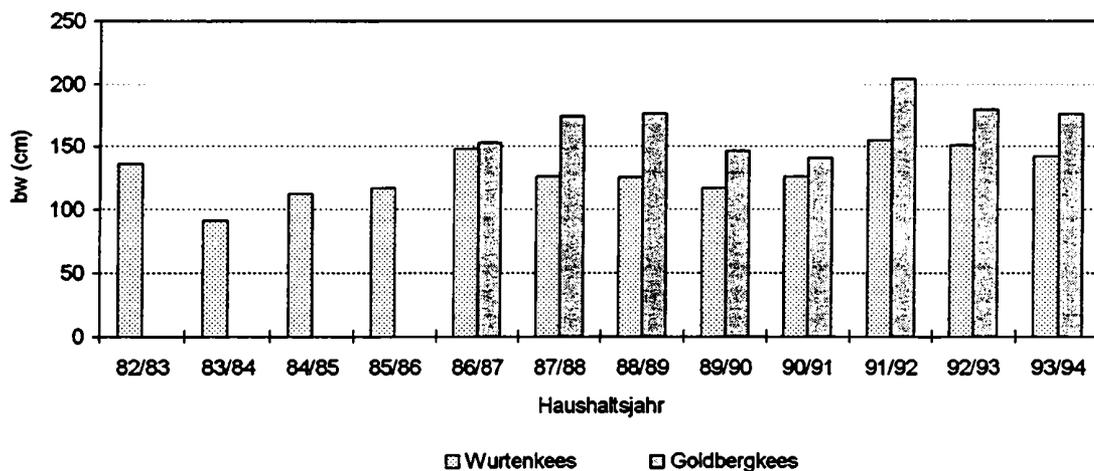


Abbildung 4.6.1: Spezifische Wintermassenbilanz von Wurtenkees und Goldbergkees für die Periode 1983 bis 1994 (aus: Auer et al., 1995 und Schöner et al., unveröffentlicht)

Durch die Arbeit von Schöner (1995) konnte aber eine gute Übereinstimmung der Niederschlagsmengen des Chemieprofils vom Wurtenkees mit jenem vom Goldbergkees für die einzelnen Winterhaushaltsjahre gezeigt werden. Außerdem konnte auf Grund der Isotopenprofile ( $\delta^{18}\text{O}$ ) auch ein sehr gleichartiger Aufbau hinsichtlich der Niederschlagsereignisse gefunden werden (Abbildung 4.6.2 und 4.6.3). Daraus kann man folgern, daß die unterschiedlichen Wintermassenbilanzen von Wurtenkees und Goldbergkees durch tiefer gelegene Gletscherteile bewirkt werden, wo der Alpenhauptkamm als Wetterscheide einen größeren Einfluß besitzt.

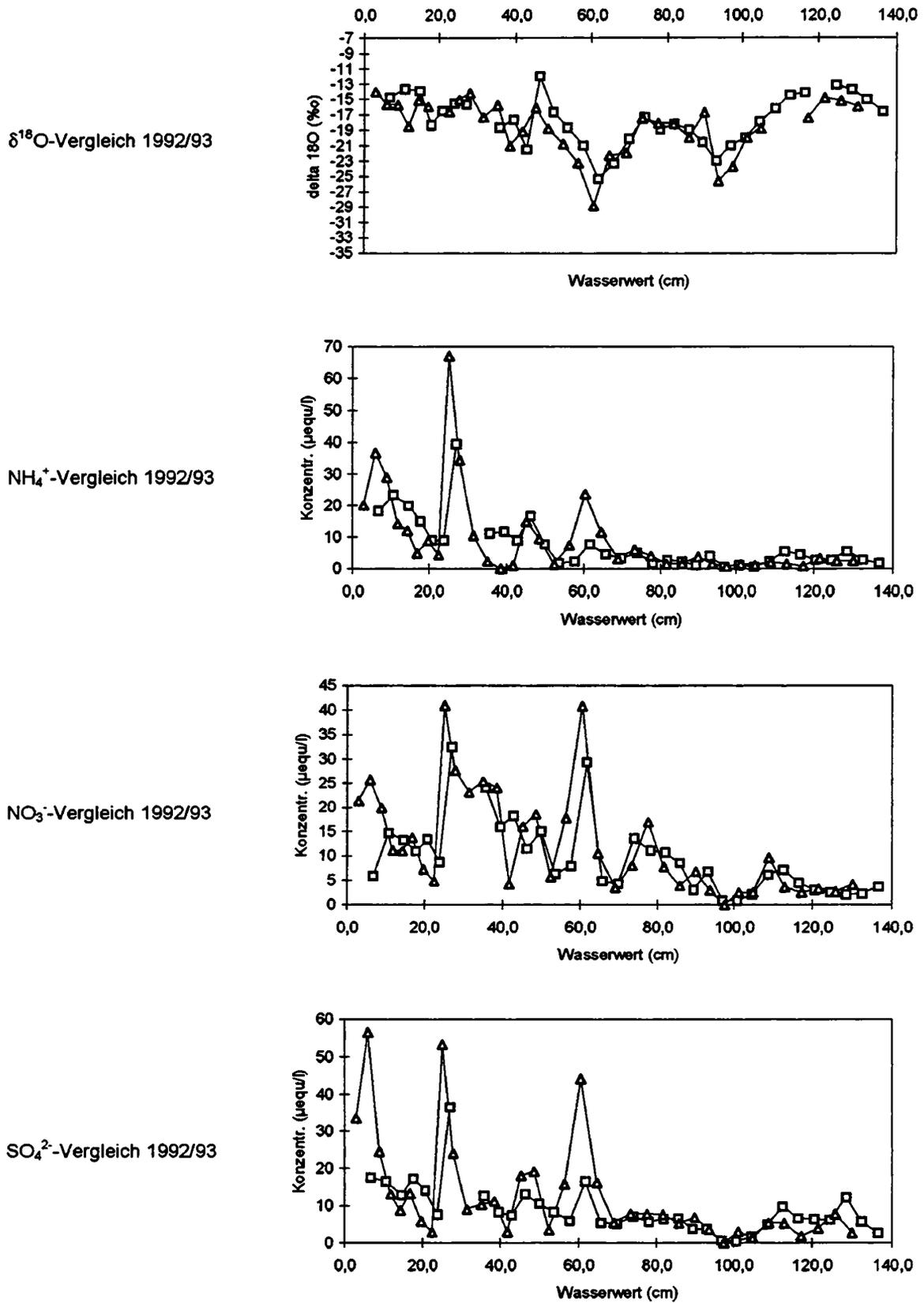
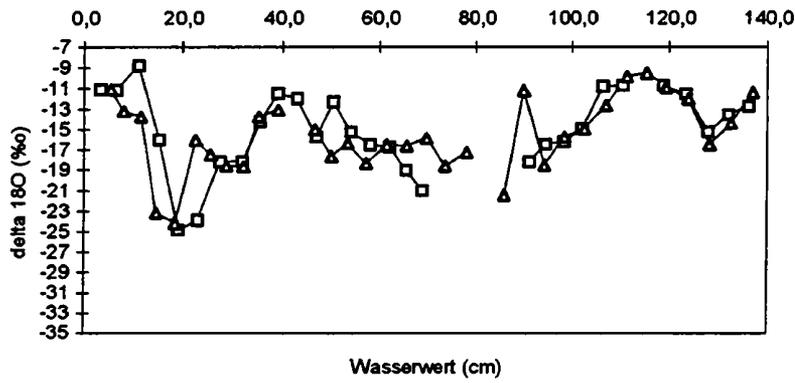
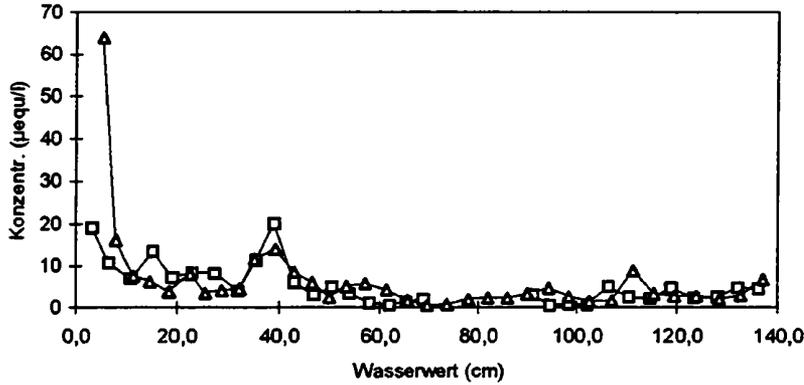


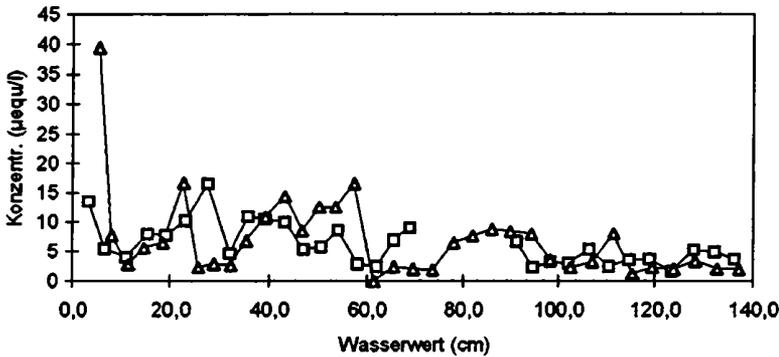
Abbildung 4.6.2: Vergleich der  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte und der  $\text{NH}_4^+$ -,  $\text{NO}_3^-$ - und  $\text{SO}_4^{2-}$ -Konzentrationen für die Schneeprofile von Goldbergkees und Wurtenkees im Winter 1992/93  
 $\square$  Wurtenkees  $\triangle$  Goldbergkees



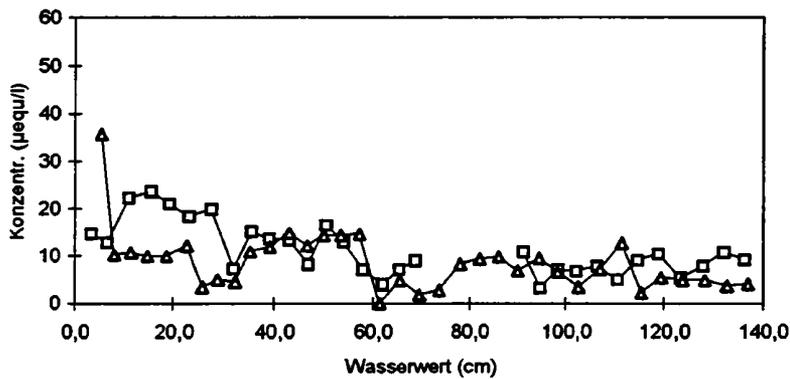
$\delta^{18}\text{O}$ -Vergleich 1993/94



$\text{NH}_4^+$ -Vergleich 1993/94



$\text{NO}_3^-$ -Vergleich 1993/94



$\text{SO}_4^{2-}$ -Vergleich 1993/94

Abbildung 4.6.3: Vergleich der  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte und der  $\text{NH}_4^+$ -,  $\text{NO}_3^-$ - und  $\text{SO}_4^{2-}$ -Konzentrationen für die Schneeprofile von Goldbergkees und Wurtenkees im Winter 1993/94  
 —□— Wurtenkees —▲— Goldbergkees

In einem nächsten Schritt ist es nun interessant zu fragen, wie weit sich der sehr gleichartige Schneedeckenaufbau der zwei Probennahmeorten in der Ionenkomposition widerspiegelt. Abbildung 4.6.2 und 4.6.3 zeigen den Vergleich für  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , und  $\text{NH}_4^+$  für die Jahre 1992/93 und 1993/94, wobei auf Grund der Isotopenprofile entsprechende Schneesichten ungefähr in die selbe Tiefe verschoben wurden.

Ähnlich wie für die Isotopenprofile sieht man für die Ionenkonzentrationen eine recht gute Übereinstimmung (besonders für 1992/93). Da für 1993/94 nicht so viele markante Maxima und Minima der Ionenkonzentration wie für 1992/93 zu finden sind, wirkt die Übereinstimmung auch dadurch etwas schlechter. Es kann aber aus den beiden Abbildungen gefolgert werden, daß besonders die einzelnen Konzentrationspeaks, aber auch die Perioden mit sehr geringen Konzentrationswerten, nicht lokal auf einen Meßort beschränkt sind, sondern für ein großräumiges Gebiet repräsentativ sind. Natürlich sind die einzelnen Peaks am Wurtenkees und am Goldbergkees nicht immer gleich hoch, da die Probennahme auf Grund der Probenlänge von 10 cm bereits eine gewisse Mittelung beinhaltet. Während für 1992/93 bei beiden Probennahmeorten ziemlich exakt die selben Niederschlagsereignisse zum Schneedeckenaufbau ohne wesentliche Akkumulationsprozesse bzw. Erosionsprozesse geführt haben, scheint 1993/94 ein Ereignis (bei 80 cm) am Wurtenkees erodiert worden zu sein, bzw. wurde beim Goldbergkeesprofil Schnee durch den Wind geringfügig akkumuliert

Die obige Aussage über die Parallelität der Konzentrationspeaks für Wurtenkees und Goldbergkees für die Jahre 1992/93 und 1993/94 steht im ersten Moment etwas im Gegensatz zu den Aussagen über die Pollutionsergebnisse im Kapitel 4.4. Dort wurde erwähnt, daß die unterschiedlichen Konzentrationsmittelwerte der gesamten Schneedecke für einzelne Jahre recht gut durch die Anzahl der Pollutionsergebnisse auf dem Wurtenkees und dem Goldbergkees erklärt werden kann. Aus den Abbildungen 4.6.2 und 4.6.3 geht aber nun eindeutig hervor, daß die Konzentrationspeaks nicht mit den in Kapitel 4.4 definierten Pollutionsergebnissen übereinstimmen müssen und es daher zu den recht beträchtlichen Konzentrationsunterschieden zwischen Goldbergkees und Wurtenkees kommen kann.

#### 4.7 Die Schadstoffbelastung von Schnee und Raureif im Vergleich zur Trinkwasserqualität

Im Zusammenhang mit den Schadstoffuntersuchungen in der Schneedecke, stellt man sich naheliegenderweise die Frage, wie „gefährlich“ diese Schadstoffbelastung für den Menschen wirklich ist. Als brauchbarer Anhaltspunkt kann man hierfür die Grenzwerte der Belastung von Trinkwasser mit den wichtigsten anorganischen Ionen heranziehen. In Tabelle 4.7.1 sind die Grenzwerte und Richtwerte für die Trinkwasserbelastung durch die wichtigsten anorganischen Ionen für Österreich (1991), die EU (1980) sowie die entsprechenden Werte der WHO (1984) angegeben.

Tabelle 4.7.1: Grenz- und Richtwerte für Trinkwasser (Stand 1992) und Vergleichswerte der Schneedeckenuntersuchung auf dem Wurtenkees und dem Goldbergkees (Periode 1990-1994) sowie von Rauhreif- und Neuschneeproben, die am Sonnblick in der Periode 1992 bis 1994 gesammelt wurden (RW = Richtwert, GW = Grenzwert, RZ = Richtzahl, ZHK = zulässige Höchstkonzentration; Werte in ppm)

		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Österr.	RW	25		100	50	
	GW	100	250			
EU	RZ	25	25	25	20	
	ZHK	50	250		150	
WHO	RW	≅45	400	250	200	
<b>Schneedecke</b>						
Maximalwert		3,44	3,35	0,73	0,55	1,21
Median		0,43	0,36	0,07	0,04	0,07
<b>Neuschnee</b>						
Maximalwert		4,56	4,46	0,56	1,34	2,17
Median		0,51	0,48	0,09	0,05	0,16
<b>Rauhreif</b>						
Maximalwert		19,52	27,28	4,98	2,70	12,13
Median		1,45	1,97	0,14	0,10	0,40

Ebenfalls angeführt sind in Tabelle 4.7.1 Meßergebnisse von Neuschnee- und Rauhreifproben, die ebenfalls während des ALPTRAC Projektes auf dem Sonnblickobservatorium gesammelt wurden. Neuschnee bedeutet hier, daß jedes Schneefallereignis mit einer Neuschneehöhe größer 10 cm bei der täglichen Frühbeobachtung mittels eines eigenen Sammelgerätes erfaßt wurde. Die Konzentrationswerte für diese Proben im Vergleich zu den entsprechenden Schichten der Schneedecke sind oft wesentlich höher, da in der Schneedecke durch die Komprimierung der Schneedecke eine Mittelung durch die Schneeprobenlänge von 10 cm stattfindet. Analog zu den Neuschneeproben wurden auch alle markanten Rauhreifereignisse auf dem Sonnblick Observatorium gesammelt. Verschiedene Untersuchungen (z.B. Duncan, 1992) zeigen, daß Rauhreif wesentlich höhere Ionenkonzentrationen aufweist als Schnee. Das ist eine Folge der wesentlich höheren Ionenkonzentrationen der unterkühlten Wassertröpfchen in der Atmosphäre, die durch Anfrieren an Gegenständen den Rauhreif bilden.

In Tabelle 4.7.1 sieht man recht deutlich, daß die maximalen Konzentrationswerte im Schnee deutlich unter den Grenzwerten für die Trinkwasserqualität liegen, während die maximalen Konzentrationswerte für Rauhreif teilweise schon sehr nahe bei den Richtwerten liegen, bei Nitrat auch sehr nahe zum Grenzwert liegen. Bei einer Nitratbelastung größer 50 ppm im Trinkwasser, besteht für Säuglinge im ersten Lebensjahr eine Gesundheitsgefährdung (Schöller, 1989). Es muß außerdem betont werden, daß für die sehr sensiblen hochalpinen Ökosysteme oft noch strengere Kriterien für die Wasserqualität gelten als für das Trinkwasser.

Für das Wurtenkees besteht außerdem die besondere Situation, daß es seit 1987 als Gletscherschigebiet genutzt wird. Durch die Untersuchungen während des ALPTRAC Projektes auf dem Wurtenkees konnte jedoch kein Einfluß durch den Schigebietsbetrieb im Bereich der Probennahmestelle gefunden werden. Eine Untersuchung des Einflusses des Schibetriebes auf die Schadstoffbelastung der Schneedecke war nicht Ziel der Untersuchungen, sondern es sollte, ganz im Gegenteil, die vom Schibetrieb unbeeinflusste Schadstoffbelastung erfaßt werden. Daher wurde die Probennahmestelle auf dem Wurtenkees so gewählt, daß ein Einfluß durch den Schibetrieb mit hoher Wahrscheinlichkeit auszuschließen war. Eine Untersuchung der Beeinflussung des Gletscherschibetriebes auf dem Wurtenkees und anderen österreichischen Gletscherschigebieten für die Schadstoffbelastung der Schneedecke, wurde in einer Studie des Umweltbundesamtes (1993) versucht.

## 5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Schadstoffkonzentration in einer hochalpinen winterlichen Schneedecke am Beispiel des Wurtenkees und des Goldbergkees untersucht. Diese Untersuchung war Teil des EUROTRAC Subprojektes ALPTRAC (High Alpine Aerosol and Snow Chemistry Study).

Die wichtigsten Anionen in der winterlichen Schneedecke von Wurtenkees und Goldbergkees sind  $\text{SO}_4^{2-}$  und  $\text{NO}_3^-$  (jeweils 19% der gesamten Ionenzusammensetzung), die wichtigsten Kationen bilden  $\text{H}^+$  (19%),  $\text{Ca}^{2+}$  (14%) und  $\text{NH}_4^+$  (12%). Alle anderen Ionen haben einen Anteil kleiner 6%. Mittels einer Faktoranalyse konnte die Hypothese der Hauptquellen der Ionenkonzentration in der Schneedecke (anthropogene Aktivitäten für  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  und  $\text{NH}_4^+$ , Staubfälle für  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  und  $\text{K}^+$  sowie maritime Aerosole für  $\text{Na}^+$  und  $\text{Cl}^-$ ) verifiziert werden. Einzelne Saharastaubfälle machten in der Untersuchungsperiode 1990/91 bis 1993/94 bis zu 40% der gesamten  $\text{Ca}^{2+}$ -Deposition der Winterschneedecke aus, was ihre Bedeutung für die neutralisierende Wirkung auf die Schneedecke unterstreicht. Für die Periode 1986/87 bis 1993/94 konnte gezeigt werden, daß die Anzahl der Pollutionseignisse (das sind Schneeproben der Schneedecke mit einer  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ - oder  $\text{NH}_4^+$ -Konzentrationen größer 20  $\mu\text{eq/l}$ ) die meist sehr stark schwankenden Depositonswerte der einzelnen Jahre zum Großteil bestimmen. Pollutionseignisse machen bis zu 50% der Gesamtdosition der einzelnen Winterhalbjahre aus. Vergleicht man die Emissionsdaten der wichtigsten Schadstoffquellgebiete für Österreich mit den gemessenen Depositionsdaten der beiden Gletscher, so wird die Drosselung der  $\text{SO}_2$ -Emissionen seit 1987 auch in den Depositionsdaten klar sichtbar, während für  $\text{NO}_3^-$  und  $\text{NH}_4^+$ , in Übereinstimmung mit den Emissionsdaten, kein Trend zu finden ist. Als wesentliches Teilergebnis der Arbeit konnte gezeigt werden, daß die starke Schwankung der gemessenen Konzentrationen zwischen den einzelnen Jahren durch die Anzahl der Pollutionseignisse erklärt werden kann, während eine geglättete Kurve der Depositionsdaten mit den Änderungen der Emissionen korreliert ist. Vergleicht man die Schadstoffbelastung des hochalpinen Schnees mit den Richt- und Grenzwerten von Trinkwasser, so sieht man, daß die gemessenen Maximalwerte deutlich niedriger sind, während die auf dem Sonnblick gemessenen maximalen Ionenkonzentrationen des Rauhreif für  $\text{NO}_3^-$  und  $\text{SO}_4^{2-}$  schon deutlich in der Nähe von Richt- bzw. Grenzwerten liegen.

### Literatur

- AUER, I., BÖHM, R., HAMMER, N., SCHÖNER, W., WIESINGER, T., WINIWARTER, W., 1995: Glaziologische Untersuchungen im Sonnblickgebiet: Forschungsprogramm Wurtenkees, Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik, Heft 12.
- BAIRD, S., BUSO, D., HORNBECK, J., 1987: Acid pulses from snowmelt at acidic cone pond, *Water, Air and Soil Pollution*, 34, 325 - 338.
- CADLE, S. H., MUHLBAIER-DASCH J., 1987: The contribution of dry deposition to snowpack acidity in Michigan. in: Jones, H. G., Orville-Thomas, W. J., (eds.): *Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, Hydrology*. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Comp., 299 - 320.
- COLBECK, S. C., AKITAYA, E., AMSTRONG, R., GUBLER, H., LAFEUILLE, J., LIED, K., MCCLUNG, D., MORRIS, E., 1990: The international classification for seasonal snow on the ground. *Int. Comm. Snow and Ice (IAHS), World Data Center A for Glaciology, U. of Colorado, Boulder, CO, USA*.
- DUNCAN, L. C., 1992: Chemistry of rime and snow collected at a site in the central Washington Cascades. *Environmental Science Technology*, Vol. 26, No. 1, 61 - 66.

- HOUGH, A. M., 1988: Atmospheric Chemistry at elevated sites - a discussion of the processes involved and the limits of current understanding. in: Unsworth, M. H., Fowler, D. (eds): Acid Deposition at High Elevation Sites. Kluwer Academic Publishers, 1 - 47.
- JONES, H. G., ORVILLE-THOMAS, W. J., (eds), 1987: Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, Hydrology. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company.
- KASPER, A., 1994: Saisonale Trends atmosphärischer Spurenstoffe sowie deren Auswaschverhalten an der Hintergrundmeßstelle Sonnblick. Dissertation, Technische Universität Wien, 142pp.
- KOLB, H., SCHÖNER, W., SEIBERT, P., 1993: ALPTRAC Data Catalogue, A Directory of Data Collected in ALPTRAC Field Measurements and Related Information. EUROTRAC-ISS, Garmisch Partenkirchen: Zerhoch-Schmidt, 137 pp.
- LEGRAND, M. R., DELMAS, R. J., 1987: Experimental protocol for the chemical analysis of snow, firn and ice cores. in: Jones, H. G., Orville-Thomas, W. J., (eds.): Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, Hydrology. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company, 225 - 254.
- MAUPETIT, F., 1992: Chimie de la neige de très haute altitude dans les Alpes Francaises. Ph. D. thesis, Paris 7 University, 246 pp.
- MAUPETIT, F., DELMAS, J. R., 1994: Snow chemistry of high altitude glaciers in the French Alps. Tellus, 46B, 304 - 324.
- PALECZEK, S., 1993: Analytische Charakterisierung von Aerosol-, Wolkenwasser- und Niederschlagsproben der hochalpinen Hintergrundmeßstelle Sonnblick (3106m). Dissertation, Technische Universität Wien, 166pp.
- POMEROY, J. W.; DAVIES, T. D., TRANTER, M., 1991: The impact of blowing snow on snow chemistry. in: Seasonal Snowpacks, T. D. Davies et al. (eds.), NATO ASI Series, Vol. G 28, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 273 - 297.
- PUXBAUM, H., 1991: Introduction to ALPTRAC: the high alpine aerosol and snow chemistry study. in: The Proceedings of EUROTRAC Symposium '90, P. Borrell et al. (eds.), The Hague, Netherlands: SPB Academic Publishing, 53 - 54.
- SCHÖLLER, F., 1989: Wasserqualität im Spiegel neuer Erkenntnisse. Schriftenreihe des Österreichischen Wasserwirtschaftsverbandes Heft 79.
- SCHÖNER, W., et al., unveröffentlicht: Massenbilanzmessungen auf dem Goldbergkees (Periode 1986/87 bis 1993/94).
- SCHWIKOWSKI, M., MAUPETIT, F., WINIWARTER, W., SEIBERT, P., TSCHIRSCH, J., 1992: A single case study of Saharan dust in March 1990. in: Proceedings of EUROTRAC Symposium '92, Borell P. M. et al. (eds.) The Hague, Netherlands, SPB Academic Publishing, 765 - 769.
- SCHWIKOWSKI, M., et al., 1994: Snow Pit Sampling Intercomparison at Weissfluhjoch, Switzerland. in: The Proceedings of EUROTRAC Symposium '94, Borell P. M. et al. (eds.) The Hague, Netherlands, SPB Academic Publishing, 716-720.
- SEIBERT, P., 1991: Meteorologisch synoptische Analyse des März 1990 im Hinblick auf die Immissionsmessungen im Rahmen der ALPTRAC-IOP. Studie im Auftrag des BM f. W. u. F.; Eigenverlag Inst. f. Met. u. Geoph., Univ. Wien.

SIGG, A., NEFTEL, A., ZÜRCHER, F., 1987: Chemical transformations in a snowcover at Weissfluhjoch, Switzerland, situated 2500 m.a.s.l. in: Jones, H. G., Orville-Thomas, W. J., (eds.): Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, Hydrology. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company, 269 - 280.

STICHLER, W., 1987: Snowcover and snowmelt processes studied by means of environmental isotopes. in: Jones, H. G., Orville-Thomas, W. J., (eds.): Seasonal Snowcovers: Physics, Chemistry, Hydrology. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company, 673 - 726.

STICHLER, W., 1994: persönliche Mitteilungen.

TEZLAFF, G., PETERS, M., JANSSEN, W., ADAMS, L. J., 1989: Aeolian dust transport in West Africa. in: M. Leinen and M. Saruthein (eds), Paleoclimatology and Paleometeorology: Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport. Kluwer Acad. Publ., 185 - 203

Trinkwasser-Nitratverordnung, 1989: Bundesgesetzblatt 557/1989

UMWELTBUNDESAMT (Hrg.), 1993: Gletscherschgebiete Österreichs. Wien, Monogr., Bd. 32

VITOVEC, W., 1988: Untersuchungen zur Schneechemie des Wurtenskees. Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 115pp.

WAGENBACH, D., MÜNNICH, K. O., SCHOTTERER, U., OESCHGER, H., 1988: The anthropogenic impact on snow chemistry at Colle Gnifetti, Swiss Alps. Annals of Glac., 10, 183 - 187.

WINIWARTER, W., SCHÖNER, W., PUXBAUM, H., 1994: Ionic contents of wintertime deposition at an alpine glacier- results from a decade of sampling. in: Proc. of EUROTRAC Symposium '94, Borell P. M. et al. (eds.) The Hague, Netherlands, SPB Academic Publishing, 731 - 734.

#### **Anschrift der Verfasser:**

W. Schöner  
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik  
A-1190 Wien, Hohe Warte 38

M. Staudinger  
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik  
Regionalstelle Salzburg  
A- 5020 Salzburg, Freisaalweg 16

H. Puxbaum  
Institut für analytische Chemie der TU Wien  
A-1061 Wien, Getreidemarkt 9/151