

# LAKE

## Landschaftsökologische Analysen im Königsseeinzugsgebiet

Dissertation der Fakultät für Geowissenschaften  
an der Ludwigs-Maximilians-Universität München

vorgelegt von:

Mark Vetter  
am 15.09.2003

1. Berichtstatter: Prof. Dr. O. Baume
2. Berichtstatter: Prof. Dr. K. Rögner

Tag der mündlichen Prüfung: 11.12.2003

*„Und doch giebt es auch in diesem (...) verborgenen Ländchen, (...) einige nicht unangenehme Gegenden, die ich mit Vergnügen und nicht ohne Unterricht besah. Zu diesen gehört vorzüglich jene des Bartholomeus-Sees.*

*Der 2 Stunden lange Weg von Berchtesgaden bis zu diesem, zwischen hohe unwirthbare Felsen hineingezauberten See ist höchst unangenehm zu befahren, rechts und links erheben sich fürchterliche Felsen zu unermesslichen Höhen, und der Fuß dieser Gebürge ist mit Nadelhölzern bedeckt, die eben nicht die beste Forstkultur zu verrathen scheinen. Doch – die Fahrt auf dem See hat uns reichlich für dies alles entschädigt!*

*Vom sogenannten Hafen aus, in dem sehr bequeme Gondeln unter Dächern aufbewahrt werden, entspricht der erste Anblick der gespannten Erwartung nicht. Eine mit hohen Tannen bewachsene kleine Insel, auf welcher die Andacht eine Kapelle erbaut hat, bedeckt die Breite des Sees und läßt nur zwey schmale Kanäle zur Durchfahrt noch übrig. Kaum hatten wir aber diese Insel umschifft, als wir die ganze grüne dritthalb Stunden in der Länge sich dehnende Fläche dieses von steilen Wänden eingeschlossenen Meeres erblickten und ein gewisser ehrfurchtsvoller Schauer mischte sich da in die Bewunderung der Gegenstände, die nun abwechselnd unser Auge entzückten. Hier war es einer der zehn reichen Wasserfälle, die bald in den verschiedensten Krümmungen von Felsen zu Felsen, bald pfeilschnell oder zersträubt ihre schäumenden Wogen in ihren an manchen Orten über 100 Klaf-ter tiefen Behälter ergießen, dort ein 7 bis 8 mal wiederhallendes Echo – bald eine auf entfernten hohen Klippen entdeckte Schaar Gemsen, oder ein einzeln weidender Hirsch, bald das auf einem kleinem Vorgebürge gegen Südwest erbaute fürstl. Schloß mit seiner Kapelle, was die auf dem See schwimmende Gesellschaft ergötzte und vom Anschauen einer ächtmahlerischen Szene zur andern unwiderstehlich hinzog. (...)*

*Nun mußte ich eine halbe Stunde lang ein hügliches und felsigtes Thal durchwandern, in welchem das eben von den höheren Alpen herabgekommene Vieh auf ergiebigen Weydeplätzen grasete. (...)*

*Ich halte die Gegenden von Salzburg-Berchtesgaden, Neapel und Konstantinopel für die schönsten der Erde.“*

ALEXANDER VON HUMBOLDT, 1798

## Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b>		<b>I</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>		<b>III</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>		<b>IV</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b>		<b>VII</b>
<b>VORWORT UND DANKSAGUNG</b>		<b>VIII</b>
<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND ZIELSTELLUNG</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET</b>	<b>7</b>
2.1	AUSWAHL UND ABGRENZUNG DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES	7
2.2	GEOLOGIE	9
2.3	GEOMORPHOLOGIE / RELIEF	10
2.4	KLIMA	11
2.5	GEWÄSSER	14
2.6	BÖDEN	17
2.7	VEGETATION	18
2.8	ANTHROPOGENER EINFLUSS / SCHUTZGEBIET NATIONALPARK BERCHTESGADEN	19
2.8.1	TOURISMUS	20
2.8.1.1	Geschichte der touristischen Nutzung	20
2.8.1.2	Heutige Touristische Nutzung	22
2.8.2	ALMWIRTSCHAFT	23
2.8.2.1	Geschichte der almwirtschaftlichen Nutzung	23
2.8.2.2	Heutige almwirtschaftlichen Nutzung	24
2.8.3	SCHUTZGEBIET NATIONALPARK BERCHTESGADEN	26
<b>3</b>	<b>THEORETISCHE GRUNDLAGEN UND FORSCHUNGSSTAND</b>	<b>27</b>
3.1	ZU AUSWIRKUNGEN VON KLIMAVERÄNDERUNGEN AUF AQUATISCHE SYSTEME	28
3.2	NÄHRSTOFFDYNAMIK UND NÄHRSTOFFQUELLEN IN QUASI-NATÜRLICHEN EINZUGSGEBIETEN	36
3.3	FORSCHUNGSSTAND IM UNTERSUCHUNGSGEBIET	39
<b>4</b>	<b>METHODIK</b>	<b>42</b>
4.1	LANDSCHAFTSÖKOLOGISCHER METHODIKANSATZ	42
4.2	AUSWERTUNG VORHANDENER QUELLEN	43
4.3	ALLGEMEINER ABLAUF DER GELÄNDEUNTERSUCHUNGEN	44

<b>4.4</b>	<b>HYDROCHEMISCHE UNTERSUCHUNGEN</b>	<b>46</b>
<b>4.5</b>	<b>ABFLUSSMESSUNGEN</b>	<b>48</b>
<b>4.6</b>	<b>KLIMATOLOGISCHE MESSUNGEN</b>	<b>49</b>
<b>4.7</b>	<b>DATENVERARBEITUNG, BERECHNUNGSGRUNDLAGEN UND STATISTISCHE VERFAHREN</b>	<b>50</b>
<b>5</b>	<b>ERGEBNISSE UND DISKUSSION</b>	<b>53</b>
<b>5.1</b>	<b>VERÄNDERUNG KLIMATISCHER RANDPARAMETER</b>	<b>53</b>
<b>5.2</b>	<b>TEMPERATURVERHALTEN IM KÖNIGSSEE – ZIRKULATIONS- UND STAGNATIONSPHASEN</b>	<b>56</b>
<b>5.3</b>	<b>ZUR SAUERSTOFFVERTEILUNG IM KÖNIGSSEE</b>	<b>68</b>
<b>5.4</b>	<b>SCHICHTUNGSSTABILITÄT IM KÖNIGSSEE</b>	<b>75</b>
<b>5.5</b>	<b>CHARAKTERISTIK DES EINZUGSGEBIETES</b>	<b>78</b>
5.5.1	AUFTEILUNG DES KÖNIGSSEEEINZUGSGEBIETES	78
5.5.2	GEOLOGIE DER TEILEINZUGSGEBIETE	81
5.5.3	BÖDEN IN DEN TEILEINZUGSGEBIETEN	83
5.5.4	VEGETATION IN DEN TEILEINZUGSGEBIETEN	85
5.5.5	ALMWIRTSCHAFTLICHE NUTZUNG IN DEN TEILEINZUGSGEBIETEN	88
<b>5.6</b>	<b>ZUR SULFAT-, CHLORID- UND NITRATDYNAMIK</b>	<b>90</b>
5.6.1	SULFAT- UND CHLORIDDYNAMIK IN DEN TEILEINZUGSGEBIETEN	90
5.6.2	SULFAT- UND CHLORIDDYNAMIK IM KÖNIGSSEE	93
5.6.3	NITRATDYNAMIK IN DEN TEILEINZUGSGEBIETEN	94
5.6.4	NITRATDYNAMIK IM KÖNIGSSEE	96
5.6.5	URSACHEN UND ZUSAMMENHÄNGE DER STICKSTOFFDYNAMIK	97
<b>5.7</b>	<b>ZUM ABFLUSSGESCHEHEN IM EINZUGSGEBIET</b>	<b>99</b>
<b>5.8</b>	<b>UMWELTVERÄNDERUNGEN ZWISCHEN DEN ZEITRÄUMEN 1978-1980 UND 1999-2003</b>	<b>103</b>
5.8.1	ENERGIE- UND STOFFHAUSHALTSVERÄNDERUNGEN IM KÖNIGSSEE	103
5.8.2	STOFFHAUSHALTSVERÄNDERUNGEN IM EINZUGSGEBIET DES KÖNIGSSEES	118
<b>5.9</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN, EMPFEHLUNGEN UND AUSBLICK</b>	<b>119</b>
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>122</b>
<b>7</b>	<b>QUELLEN</b>	<b>127</b>

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich von Jahresniederschlagssummen verschiedener Stationen aus dem Untersuchungsgebiet und dessen Umgebung .....	13
Tabelle 2: Ausgewählte Physikalische Kennwerte des Königssees .....	15
Tabelle 3: Neuberechnung der Teilvolumina des Königssees .....	16
Tabelle 4: Spannbreite chemischer Kennwerte des Königssees .....	17
Tabelle 5: Wassertemperaturen des Königssees zur Mitte des 20. Jahrhunderts .....	40
Tabelle 6: Messgenauigkeit und Messbereichsuntergrenzen der ionenchromatographischen Untersuchungen .....	48
Tabelle 7: Neuberechnung der Aufteilung der Teileinzugsgebiete des Königssees .....	78
Tabelle 8: Geologische Verhältnisse in den Teileinzugsgebieten des Königssees .....	82
Tabelle 9: Bodenverhältnisse in den Teileinzugsgebieten des Königssees .....	85
Tabelle 10: Vegetationsverhältnisse in den Teileinzugsgebieten des Königssees .....	87
Tabelle 11: Weidewirtschaftliche Nutzung in den Teileinzugsgebieten des Königssees .....	88
Tabelle 12: Luftstickoxidgehalte im Bundesland Salzburg .....	97
Tabelle 13: Nasse Deposition Nitrat- und Ammoniumstickstoff bei der Messstation St. Koloman .....	99
Tabelle 14: Stickstoffdioxidwerte der Luft an der Messstation St. Koloman .....	99
Tabelle 15: Jahressummen der Globalstrahlung Schönau am Königssee .....	99
Tabelle 16: Ungefähre Abflussspenden der Hauptzuflüsse in den Königssee .....	100
Tabelle 17: Ausgewählte Ionengehalte verschiedener Zuflüsse zu einem „Hochwasserereignis“ .....	101
Tabelle 18: Mittelwerte und Standardabweichung der Temperaturmesswerte im Königssee .....	105
Tabelle 19: Überprüfung der Unterscheidung der verschiedenen Datensätze mit dem Mann-Whitney-U-Test unter Angabe der Signifikanzwerte .....	106

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Theoretische Einwirkungen auf eine Landschaft .....	2
Abbildung 2: Karte des Nationalpark Berchtesgaden .....	8
Abbildung 3: Blick zu den steilen Wänden des Eisbachtals.....	11
Abbildung 4: 30-jährige Temperatur- und Niederschlagsmonatsmittel in Berchtesgaden (551m ü. NN) .....	12
Abbildung 5: Schwankungen der Temperaturmittelwerte ab 1650 für den mitteleuropäischen Raum .....	13
Abbildung 6: Vergleich der Lufttemperaturmittelwerte des 20. Jahrhunderts von Mitteleuropa und Berchtesgaden.....	14
Abbildung 7: Blick vom Schrainbach ins Oberseetal .....	15
Abbildung 8: Bathimetrische Karte des Königssees .....	16
Abbildung 9: Übernachtungs- und Gästezahlen in der Region Berchtesgaden 1880 bis heute.....	21
Abbildung 10: Passagierzahlen der Königsseeschifffahrt 1950 bis heute .....	21
Abbildung 11: Saisonale Schwankungen im Fahrgastaufkommen der Königsseeschifffahrt .....	22
Abbildung 12: Almwirtschaftliche Entwicklung im Gebiet des Nationalparks Berchtesgaden .....	24
Abbildung 13: Almauftrieb in Kuhgräser von 1985 bis 2002 .....	25
Abbildung 14: Beeinflussung der Komponenten des Wärmehaushaltes eines Sees durch Klimaveränderung .....	30
Abbildung 15: Beobachtete Verlagerung der Thermokline bei kanadischen Seen .....	32
Abbildung 16: Wärmeinhaltsveränderung des Zürichsees.....	33
Abbildung 17: Anstieg der hypolimnischen Temperatur im Zürichsee .....	33
Abbildung 18: Länge der Stagnationsphasen im Zürichsee.....	33
Abbildung 19: Apriltag der Schichtungsbildung im Zürichsee .....	33
Abbildung 20: Schadstoffeintrag in die Landschaft.....	37
Abbildung 21: Stickstoffkreislauf.....	38
Abbildung 22: Stickstoffeintrag aus der Luft in naturnahe Ökosysteme.....	38
Abbildung 23: Möglicher Verlauf zwischen Messzeitpunkt und Parameterveränderung in einem dynamischen System .....	43

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 24: Ablauf der Geländeuntersuchungen mit Messstellen.....	45
Abbildung 25: Korrelation von Messwerten verschiedener Klimamessstationen zu einem Niederschlagsereignis .....	50
Abbildung 26: Vergleich der Monatsmittelwerte 1980-1990 der Klimastationen Bad Reichenhall und Berchtesgaden.....	54
Abbildung 27: Jahresdurchschnittswerte der Lufttemperatur der Klimastation Bad Reichenhall mit Trendgerade.....	54
Abbildung 28: Jahressummen der Sonnenscheindauer Bad Reichenhall .....	55
Abbildung 29: Monatssumme der Sonnenscheindauer im August für Bad Reichenhall .....	55
Abbildung 30: Temperaturverhalten an der Echowand im gesamten Tiefenprofil.....	58
Abbildung 31: Temperaturverhalten an der Echowand 0m bis 16m .....	60
Abbildung 32: Temperaturverhalten Kaunerwand 0m bis 16m.....	63
Abbildung 33: Temperaturverhalten an der Kaunerwand im gesamten Tiefenprofil .....	64
Abbildung 34: Windaktivität im Untersuchungszeitraum (Messstelle Schönau).....	65
Abbildung 35: Globalstrahlungswerte im Untersuchungszeitraum (Messstelle Schönau) .....	66
Abbildung 36: Lufttemperaturwerte im Untersuchungszeitraum (Messstelle Schönau) .....	66
Abbildung 37: Sauerstoff- und Temperaturverhalten des Tiefenwassers (60m, 80m und 100m) an der Echowand .....	67
Abbildung 38: Sauerstoff- und Temperaturverhalten des Tiefenwassers (120m, 140m und 160m) an der Echowand .....	68
Abbildung 39: Sauerstoff- und Temperaturwinterprofil des Königsees vom 02.02.00 .....	69
Abbildung 40: Sauerstoff- und Temperatursommerprofil des Königsees vom 29.08.00 .....	69
Abbildung 41: Sauerstoffverteilung an der Echowand 0m bis 16m.....	71
Abbildung 42: Sauerstoffverteilung an der Echowand im gesamten Tiefenprofil .....	72
Abbildung 43: Sauerstoffverteilung an der Kaunerwand 0m bis 16m .....	73
Abbildung 44: Sauerstoffverteilung an der Kaunerwand im gesamten Tiefenprofil...	74
Abbildung 45: Relativer thermischer Widerstand im Königssee an der Echowand...	76



Abbildung 46: Abhängigkeit der Schichtungsstabilität im Königssee von Windeinfluss und Globalstrahlung .....	77
Abbildung 47: Wasserwege im Einzugsgebiet des Schrainbachs .....	79
Abbildung 48: Nebenzuflüsse in den Königssee.....	80
Abbildung 49: Geologische Verhältnisse im Einzugsgebiet des Königssees.....	81
Abbildung 50: Bodenverhältnisse im Einzugsgebiet des Königssees.....	84
Abbildung 51: Vegetation im Einzugsgebiet des Königssees .....	86
Abbildung 52: Almweideflächen mit Rinderbesatz im Einzugsgebiet des Königssees.....	89
Abbildung 53: Sulfatgehalte ausgewählter Zuflüsse des Königssees.....	91
Abbildung 54: Chloridgehalte ausgewählter Zuflüsse des Königssees.....	91
Abbildung 55: Zusammenhang zwischen Globalstrahlungstageswerten und Sulfatgehalt im Fließgewässer.....	92
Abbildung 56: Tagesmittelwertverläufe SO <sub>2</sub> für Bad Reichenhall im Jahr 2001 .....	92
Abbildung 57: Sulfatgehalte des Königssees.....	93
Abbildung 58: Chloridgehalte des Königssees .....	94
Abbildung 59: Nitratgehalte der Hauptzuflüsse zum Königssee .....	95
Abbildung 60: Nitratkonzentrationen im Königssee an der Messstelle Echowand.....	96
Abbildung 61: Langzeitverlauf der Luftstickstoffdioxide in Bad Reichenhall .....	98
Abbildung 62: Langzeitverlauf der Luftstickstoffdioxide in Burghausen .....	98
Abbildung 63: Eintrag von Sedimenten am Kesselbach während eines Hochwasserereignisses .....	102
Abbildung 64: Veränderung der Temperatur des Königssees in verschiedenen Tiefen .....	103
Abbildung 65: Veränderungen der Hypolimniontemperaturen im Königssee.....	104
Abbildung 66: Wärmeinhaltsvergleich im Königssee .....	107
Abbildung 67: Zu- und Abnahme des relativen thermischen Widerstandes beim Mo- natsmittelwertvergleich der Zeiträume 1978-1980 und 2000-2002...	108
Abbildung 68: Vergleich der Lage der Sprungschicht im Königssee .....	108
Abbildung 69: Vergleich zweier Temperaturtiefenprofile im Königssee .....	109
Abbildung 70: Monatsmittelwertvergleich der Schmidtstabilität im Königssee.....	110

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 71: Beginn und Ende der Stratifikation im Königssee in ausgewählten Jahren .....	110
Abbildung 72: Tage mit erkennbarer Schichtung / Jahr im Königssee.....	111
Abbildung 73: Tage ohne erkennbare Schichtung / Jahr im Königssee .....	111
Abbildung 74: Beginn der Schichtung im Königssee .....	112
Abbildung 75: Auflösung der Schichtung im Königssee .....	113
Abbildung 76: Veränderungen der Monatsmittelwerte des Sauerstoffgehaltes im Königssee der Zeiträume 1978-1980 und 2000-2002.....	113
Abbildung 77: Nitratgehalte im Königssee aller verfügbaren Messungen der letzten 25 Jahre .....	114
Abbildung 78: Nitratstickstoffverhältnisse an der Echowand (Wasseroberfläche) ...	115
Abbildung 79: Nitratstickstoffverhältnisse an der Echowand in 100m Tiefe.....	115
Abbildung 80: Nitratstickstoffverhältnisse an der Echowand in 180m Tiefe.....	116
Abbildung 81: Vergleich der Nitratstickstoffverhältnisse an der Seeoberfläche nahe der Kaunerwand .....	116
Abbildung 82: Vergleich der Nitratstickstoffverhältnisse in 100m Tiefe bei einer Messtelle in Nähe der Kaunerwand .....	116
Abbildung 83: Vergleich der Sulfatgehalte im Königssee 1978-1980 und 1999-2003 .....	117
Abbildung 84: Langzeitverlauf für SO <sub>2</sub> für die Station Bad Reichenhall.....	117
Abbildung 85: Nitratstickstoff an den Zuflüssen des Königssees im Vergleich 1978 und 2000-2002.....	118

## Abkürzungsverzeichnis

UG	Untersuchungsgebiet
NP	Nationalpark
EZG	Einzugsgebiet
TEZG	Teileinzugsgebiet
DWD	Deutscher Wetterdienst
KG	Kuhgräser (Einheit)
GVE	Großvieheinheiten
GIS	Geographisches Informationssystem
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
RtW	Relativer thermischer Widerstand

## Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des LAKE-Projektes (Landschaftsökologische Analysen im Königsseeinzugsgebiet), welches im Sommer 1999 am Lehrstuhl für Physische Geographie und Landschaftsökologie an der Sektion Geographie des Departments für Geo- und Umweltwissenschaften (ehemals Institut für Geographie) der Ludwig-Maximilians-Universität München initiiert wurde.

Ähnlich wie damals HUMBOLDT die Landschaft um den Königssee fasziniert hatte, so zieht sie auch heute noch zahlreiche Besucher in seinen Bann. Aber ist diese Landschaft heute noch so, wie sie HUMBOLDT vor mehr als 200 Jahren betrachtet hat? Oder hat sie sich möglicherweise verändert? Und wenn ja, inwiefern? Und wird sie sich möglicherweise in der Zukunft weiter verändern? Das wird sich nie vollständig beantworten lassen, aber diesen Fragen nachzugehen, bewegt mich seit längerem und war der Grund für die Auswahl des Themas der vorliegenden Arbeit.

Die über 30.000 im Gelände durchgeführten Einzelmessungen, die in die Auswertung des Projektes eingehen, waren nur durch viel tatkräftige Unterstützung möglich geworden. Deswegen gilt mein erster Dank den vielen fleißigen Helferinnen und Helfern.

Ganz besonders großen Dank schulde ich Herrn Prof. Dr. O. Baume für die Überlassung des Themas. Jederzeit hatte ich in ihm einen Ansprechpartner, der ein offenes Ohr hatte und mir hilfreiche methodische, inhaltliche und logistische Hilfestellungen gab.

Ferner danke ich den wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Sektion Geographie der Universität für permanente Gesprächsbereitschaft zur inhaltlichen Diskussion. Insbesondere der wissenschaftliche Meinungs-austausch mit Herrn Dr. Michler war sehr fruchtbar. Ebenso bin ich den technischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bei der Hilfe im Gelände und Labor zu Dank verpflichtet.

Von Seiten der Nationalparkverwaltung Berchtesgaden danke ich Herrn Dr. Zierl, Herrn Dr. Vogel, Herrn Vogt, Frau Kilian, Frau Wagner und Herrn Spiegel-Schmidt für ihre Hilfe bei allen logistischen Fragen im Untersuchungsgebiet und bei der Bereitstellung des wertvollen Datenmaterials. Ebenso ist den Rangern des Nationalparks für die Unterstützung im Gelände zu danken. Darüber hinaus ist der Nationalparkverwaltung für die jährliche finanzielle Unterstützung der laufenden Projektkosten ein

Dank auszusprechen. Gleichmaßen ist der Ludwigs-Maximilians-Universität München zu danken, welche das Vorhaben durch ein Stipendium unterstützt hat.

Die Hilfeleistung der Königseeschiffahrt und die gute Zusammenarbeit mit dem Landratsamt Berchtesgadener Land zur Bewerkstelligung unser Messfahrten auf dem Königssee sei hier noch mit Dank erwähnt. Ein Dank ergeht ebenso an die Kurdirektion des Berchtesgadener Landes für die Bereitstellung von Daten zum Tourismus.

Auch durch die Realisierung von Abschlussarbeiten im Rahmen des Studiums hat es wertvolle Unterstützung im Gelände, aber auch in fachlicher Sicht gegeben. Hiermit möchte ich dafür Claudia Praml, Angelika Biber, Max Fischer, Peer Tasch, Kilian de Bryun und Stefan Schneider danken.

Für die Bereitstellung von Daten aus der ersten umfassenden limnologischen Untersuchung des Königssee danke ich Herrn Prof. Siebeck und Herrn Dr. Bauer.

Letztlich darf nicht vergessen werden, denen zu danken, die kritisch das Manuskript durchgesehen haben: Frau Karin Drexler, Frau Judit Zimmermann, Herrn Björn Schirmeister und Herrn Thomas Ammerl.

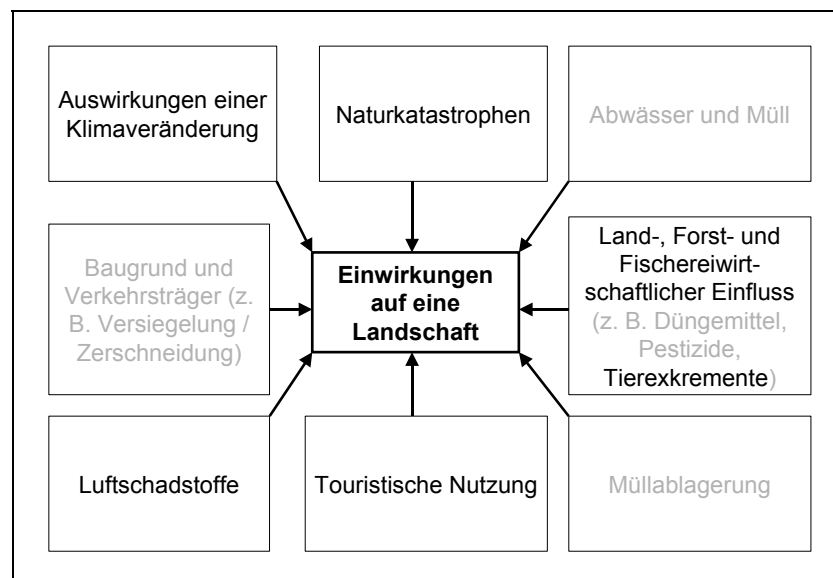
## 1 Einleitung und Zielstellung

Die ersten Folgen des Klimawandels sind bereits zu beobachten, obwohl sich die globale mittlere Lufttemperatur der Erde in den letzten hundert Jahren nur um 0,6 (+/- 0,2) Kelvin erwärmt hat. Diese Temperatur wird Modellierungen zufolge zwischen 1,4 und 5,8 Kelvin bis zum Jahre 2100 ansteigen; in vielen Regionen der Welt werden Mensch und Natur vor enorme Anpassungserfordernisse gestellt. Experten weisen auf unkalkulierbare Risiken und tiefgreifende Veränderungen im Naturhaushalt der Erde hin. Der Klimawandel wird für Mensch und Natur vorwiegend negative Folgen haben. Schon heute sind in verschiedenen Ökosystemen Veränderungen zu beobachten, die auf die Erwärmung der Erde zurückzuführen sind: Gletscher schmelzen ab, Vögel brüten früher, und die Vegetationsperiode vieler Pflanzen hat sich verlängert. Besonders verwundbar gegenüber dem Klimawandel sind Ökosysteme, die sich nur langsam anpassen können, wie zum Beispiel Gletscher, Feuchtgebiete, Mangroven-Wälder, Ökosysteme in der Arktis und in den Gebirgen (IPCC 2001).

Aus diesen alarmierenden Szenarien sollte als gesellschaftliches Hauptziel die Entwicklung von Handlungsstrategien abgeleitet werden, wie z. B. in Hochgebirgsökosystemen eine Anpassung auf Klimaveränderungen in Form von Managementmaßnahmen aussehen könnte. Denn gerade Hochgebirge gelten als eine der Schlüsselstellen für die Analyse von Umweltentwicklungen infolge globaler Klimaveränderungen. Insbesondere im Hochgebirge sind diese anhand von Gletscherschwankungen oder an der Verschiebung von Höhengrenzen deutlich ablesbar. Hier findet man auf engem Raum vergangene Klima- und Umweltveränderungen archiviert, und aktuelle Veränderungen wirken sich in diesen sensiblen Ökosystemen besonders aus.

Bei dem Schutzgebiet Nationalpark Berchtesgaden handelt es sich um solch ein sensibles Hochgebirgsökosystem, welches auf Grund seiner Naturbelassenheit als Quasi-Naturraum angesehen werden kann. Gerade dies motiviert im Besonderen, Forschungen zu Umweltveränderungen und deren Folgen in diesem Gebiet durchzuführen. Denn durch die Sicherung von Erkenntnissen über landschaftsökologische Prozesse und Stoffkreisläufe auf solchen Referenzflächen (sog. „Nullflächen“) können unter den gegenwärtig ablaufenden Umweltveränderungen Aussagen getroffen werden, wie sich das Reaktionsvermögen von Landschaften unter natürlichen Bedingungen verhält. Dass stark anthropogen geprägte Räume wesentlichen Veränderun-

gen im Landschaftshaushalt unterliegen, ist hinreichend bekannt. Die Untersuchung des Ausmaßes dieser Veränderungen war in der Vergangenheit Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten. Wenig beeinflusste Schutzgebiete wurden seltener unter dieser Fragestellung betrachtet, da angenommen wurde, dass die Bedeutung und auch die Dringlichkeit hier weniger gegeben seien. Häufig galt aber auch als Grund, dass Veränderungen im Naturhaushalt in diesen komplexen natürlichen Systemen alpiner Regionen schwierig zu erkennen und häufig auch komplizierter messtechnisch nachzuweisen sind. Ob und inwiefern aber in diesen Gebieten, die zwar einer geringen, aber dennoch gegebenen Nutzung unterliegen, diese Veränderungen im Landschaftshaushalt bedeutsam sind, und vor allem, wie die Messung dieser Veränderungen zu bewerkstelligen ist, ist ein Anliegen des seit Frühjahr 1999 laufenden LAKE-Projektes (**L**andschafts**ö**kologische **A**nalysen im **K**önigssee**e**inzugsgebiet). Abbildung 1 zeigt, wie vielfältig die Einflussfaktoren auf die meisten Landschaften sind. Lediglich der schwarz gefärbte Text kennzeichnet die Einwirkungsfaktoren auf das Untersuchungsgebiet.



**Abbildung 1: Theoretische Einwirkungen auf eine Landschaft**

(Schwarz dargestellt sind die Einflussfaktoren, welche das Untersuchungsgebiet betreffen)

Aus dem Titel des Projektes geht bereits hervor, dass die Arbeit einen landschaftsökologischen Ansatz vertritt, in dem Analysen zum Energie-, Stoff- und in geringerem Umfang zum Wasserhaushalt des Landschaftssystems unter Berücksichtigung des anthropogenen Einflusses erfolgen.

Seeinzugsgebiete bieten sich dafür in besonderem Maße an, da der Seekörper wie ein integrierendes Merkmal des Einzugsgebietes wirkt. Das System weist eine gewisse Geschlossenheit auf. Auch deswegen wurde als räumlicher Untersuchungsschwerpunkt der Königssee ausgesucht. Dieser wird vom Bayerischen Umweltministerium und vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft als oligothropher Referenzsee eingestuft. SIEBECK (1982, S. 6.) erläutert hierzu: „In Deutschland gibt es nur noch einen großen See, der dank einer nahezu unberührten Umgebung hinreichend konstante Eigenschaften besitzt (...): der Königssee“. In diesem Zusammenhang weist er später ausdrücklich noch einmal auf die besondere Eignung des Königssees für eine Ökosystemanalyse hin (SIEBECK und TRAUNSPURGER 1994). Hinzu kommt, dass der Königssee als Trinkwasserreservegebiet für umliegende Gemeinden fungiert, wodurch die Erkundung von Veränderungen in seinem Stoffhaushalt von großem Interesse ist.

Um Veränderungen in der Landschaft verstehen und einordnen zu können, muss vorab eine möglichst exakte Analyse des entsprechenden Ökosystems erfolgen. Nur so kann festgestellt werden, in welchen Teilen des Systems Veränderungen auftreten und welche Konsequenzen diese für andere Teile des Systems haben können. Deshalb folgt in Kap. 2 die Analyse der für die relevanten Fragestellungen bedeutenden Zusammenhänge im Untersuchungsgebiet. Vor allem Geschichte und Veränderungen in der Nutzung sind hier aufgezeigt. In Kap. 3 werden die wesentlichen theoretischen Hintergründe und der Forschungsstand zu dieser Arbeit erläutert. Die räumliche Charakteristik des Einzugsgebietes des Königssees findet hier besondere Berücksichtigung. In Kap. 4 wird die Methodik dieser Studie vorgestellt. Die neuen Erkenntnisse, die sich aus diesem Forschungsprojekt ergeben, lassen sich an Hand folgender Fragen ableiten, deren Beantwortung im Kap. 5 (insbesondere Kap. 5.9) zusammengestellt ist. Die Fragen lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Einerseits galt es, spezielle Fragen in Verbindung zur physikalisch-chemischen Komponente des limnischen Systems Königssee und dessen Einzugsgebiet zu beantworten:

- Wie haben sich die Parameter Temperatur und Sauerstoff im System Königssee während des Untersuchungszeitraumes unter Berücksichtigung klimatischer Einflussfaktoren verhalten?
- Welche Aussagen sind zum Zirkulationsgeschehen im Königssee zu treffen?
- Ist ein Unterschied zu den Untersuchungen dieser Parameter im Vergleich zu den Werten aus früheren Untersuchungen feststellbar?

- Welche Konsequenzen haben Veränderungen hinsichtlich der Schichtungsstabilität und der Stagnationsphasen auf unterschiedliche Lebensräume im Königssee?
- Haben sich die Nitratgehalte im See vor und nach Bau der Abwasserleitung durch den Königssee (1991) verändert?
- Wie verhalten sich die Nährstoffe im Tiefenprofil des Königssees?
- Wie gestalten sich Aufteilung und Ausstattung der Teileinzugsgebiete des Königssees nach neueren Erkenntnissen?
- Lassen sich Abschätzungen zum Abflussgeschehen im Einzugsgebiet geben?
- Wie ist die Stoffzufuhr in das System Königssee durch die verschiedenen Zuflüsse zu beschreiben und in welchem Zusammenhang stehen diese zum Einzugsgebiet?

Andererseits wurde Fragestellungen, welche sich auf die landschaftsökologische Situation in Folge von Umweltveränderungen im Untersuchungsgebiet beziehen (unter der Annahme, dass tatsächlich Umweltveränderungen stattfinden), nachgegangen:

- Wie sind diese Umweltveränderungen zu charakterisieren und in welchen Dimensionen laufen sie ab?
- Wo liegen die Ursachen und Zusammenhänge dieser Veränderungen?
- Sind diese Ursachen anthropogen bedingt oder liegen sie im Rahmen natürlicher Schwankungen?
- Sind die Ursachen lokal oder überregional zu suchen?
- Lassen sich Aussagen zur derzeitigen Tragfähigkeit des Raumes treffen?
- Wie lassen sich Naturschutzinteressen und Nutzung vereinbaren?
- Wie können die Erkenntnisse einen Beitrag zur Umsetzung künftiger, gesetzliche Vorgaben (z. B. EU-Wasserrahmenrichtlinie) liefern?
- Lassen sich die in dem Projekt bestimmten Messpunkte dafür verwenden und wenn ja, welche Hintergrundinformationen können diesbezüglich geliefert werden?

Zur Beantwortung der Fragen des zweiten Komplexes, muss der Begriff „Umweltveränderungen“ in diesem Zusammenhang genauer spezifiziert werden. Bei Verwendung des Begriffes Umweltveränderungen, wie überhaupt bei Veränderungen in Systemen, muss geklärt werden, welche Größen dabei untersucht werden sollen, ab wann überhaupt von solchen Veränderungen geredet werden darf und über welchen Zeitraum diese Betrachtungen stattfinden. Die Auswahl der Parameter bezieht sich



auf den landschaftsökologischen Ansatz, d. h. es geht um Veränderungen ausgewählter Systemparameter des Energie- und Stoffhaushaltes. Die Dimension der Veränderung ergibt sich aus der Prüfung und Darstellung der statistischen Signifikanzen der einzelnen Größen. Der Zeitraum ist vorgegeben durch das zum Vergleich zur Verfügung stehende Material. Die Untersuchungen beziehen sich daher hauptsächlich auf einen Vergleich der Zeiträume zwischen einerseits 1978-1980 und andererseits 1999-2003. Aussagen zwischen 1980 und 1999 können nur durch Einzelmessungen getroffen werden. Darüber hinaus soll aber der Versuch gemacht werden, diese Veränderungen in längerfristige Zeiträume einzutakten, dies vor allem vor dem Hintergrund des derzeitigen globalen Wandels.

Die Arbeit reiht sich demnach in den Fragenkomplex von Umweltveränderungen im Alpenraum ein. Die Notwendigkeit der Auseinandersetzung mit diesem Raum zu dieser Problematik wird u. a. im Sammelband von CEBON et al. (1998) oder von HUPFER (1998, vgl. auch Kap. 2.1) betont.

Die vorliegende Arbeit möchte aber auch einen methodischen und empirischen Beitrag liefern. Mit dem späterem Ziel einer Modellierung sollen zuvor ausgewählte Parameter gemessen werden, an denen sich Umweltveränderungen nachweisen lassen. Auf Grund dieser Basis kann ermittelt werden, wie eine Modellierung aussehen könnte, welche Parameter für das Modell heranzuziehen sind, welche Art und Qualität der Ergebnisse erwartet und wie die Kalibrierung des entsprechenden Modells mit den gewonnenen Daten ermöglicht werden kann. Erst wenn diese Ergebnisse vorliegen, ist nach Auffassung des Autors ein solides Fundament für Modellierungsvorhaben gegeben. Zur Erstellung eines Modells, welches einen Beitrag zur Lösung eines Problems liefern soll, ist es mitunter hilfreich, zuvor das Gesamtproblem in Teilprobleme zu zerlegen. Ein Teilproblem wären Reaktionsweisen des Wasserkörpers auf Umweltveränderungen hinsichtlich Wärmeinhalt, Schichtung und Stabilität. Zur Quantifizierung dieser Zusammenhänge sollen Programme ausgearbeitet und geschrieben werden. Diese können dann später in einer größer angelegten Modellierung des Gesamtsystems verwendet werden.

Letztlich soll in dieser Arbeit auch der Naturschutzaspekt berücksichtigt werden, der sich aus dem Anspruch von Nationalparks ergibt, als oberstes Ziel den Schutz der Natur in ihrer Ursprünglichkeit gelten zu lassen (NATIONALPARKVERWALTUNG BERCHTESGADEN 2003). Gemeint ist damit, dass in Nationalparks kein direkter Einfluss auf die Natur durch den dort wirkenden Menschen stattfinden soll. Es ist

nachzuvollziehen, dass dieses ehrgeizige Ziel in Mitteleuropa schwierig zu realisieren ist, da bis in den hintersten Winkel unserer Landschaften ein Einfluss des Menschen nicht auszuschließen ist. Bei Betrachtung des Schutzgebiet Berchtesgaden ergibt sich folgendes Dilemma: Nach den strengen Kriterien der *International Union for Conservation of Nature and Natural Resources* (EUROPARC und IUCN 2000) dürfte im Gebiet eigentlich keine Nutzung stattfinden. Dennoch gibt es almwirtschaftliche und touristische Nutzung. Aber stellen diese Nutzungen ein Problem dar? Und vor allem, sind diese Nutzungen Ursache für festgestellte Umweltveränderungen?

Die vorliegende Untersuchung kann auch als Beitrag zur Global Change-Debatte verstanden werden, wenngleich dieses in den letzten Jahren häufig eingesetzte Schlagwort eine großräumige Dimension suggeriert. Es klingt vermessen, diese Arbeit, welche sich nur auf einen kleinen Ausschnitt der Erdoberfläche bezieht, mit Global Change in Verbindung zu bringen. Klar herausgestellt werden soll dabei, dass selbstverständlich mit einer Untersuchung zu Umweltveränderungen im Königssee-einzugsgebiet mit Nichten Global Change nachgewiesen werden soll. Aber in die umgekehrte Richtung soll geforscht werden: Auf Grund der spätestens seit dem letzten Bericht des zwischenstaatlichen Expertengremiums der Vereinten Nationen „*Intergovernmental Panel on Climate Change*“ (IPCC 2001, s. o.) sehr deutlichen Anzeichen einer Klimaveränderung soll der quasi-natürliche Raum des Königssee-einzugsgebietes daraufhin untersucht werden, ob sich hier ebenso Merkmale dieses Wandels einstellen und welche Konsequenzen dies für andere Kompartimente im Landschaftshaushalt haben könnte. Etwas weitergehend kann gar auf die Notwendigkeit der Arbeit für Aspekte des Global Change aufgeführt werden: Auf dem Geographentag 1997 in Bonn, sicherlich auch schon früher, erging der Aufruf, dass die Geographie Verantwortung in der „Global Change“-Forschung zu übernehmen habe (MESSERLI 1998). Aber auch ein anderer Aspekt kommt zum Tragen. GRASSL (1998, S.12) titelt auf gleichnamiger Veranstaltung: „Nachhaltigkeit braucht Forschung zum Globalen Wandel“. Er begründet dies u. a. damit, dass politisches Handeln verlässliche wissenschaftliche Untersuchungen zu Anzeichen und Auswirkungen des globalen anthropogen bedingten Klimawandels benötigt und führt aus, dass diese Erforschungen auch schon Erfolge bei der Umsetzung von Maßnahmen zum Schutz des Klimas durch die Entscheidungsträger gebracht haben.

## 2 Das Untersuchungsgebiet

Viele in der vorliegenden Arbeit dargestellten Teiluntersuchungen sind eng an das Untersuchungsgebiet (UG) geknüpft. Daher sollen an dieser Stelle die landschafts-ökologisch relevanten Charakteristika im Sinne der Zielstellung vorgestellt werden. Neben dem für das UG und dem gesamten Nationalpark (NP) vorliegende, umfangreiche Literatur- und Kartenmaterial sei noch auf die Internetseiten der Nationalparkverwaltung verwiesen (NATIONALPARKVERWALTUNG BERCHTESGADEN 2003). Dort sind ebenso Karten zur Naturraumausstattung, zur anthropogenen Beeinflussung sowie zum Schutzgebietsmanagement zu finden. Im Projekt entstandene Abschlussarbeiten enthalten überblicksartige Ausführungen zum UG (BIBER 2000; DE BRUYN 2001; FISCHER 2001; PRAML 2001; SCHNEIDER 2001; TASCH 2002).

### 2.1 Auswahl und Abgrenzung des Untersuchungsgebietes

Der Nationalpark Berchtesgaden liegt im südöstlichsten Teil der Bundesrepublik Deutschland an der Grenze zu Österreich (Abbildung 2). Das Großschutzgebiet ist – außer im Norden – vollständig von österreichischem Staatsgebiet umgeben. Es ist aus reliefspezifischen Gründen fast nur von der nördlichen Seite her erreichbar. Wenn in den Ausführungen dieser Arbeit der Begriff **Untersuchungsgebiet** genannt wird, dann ist damit das (oberirdische) hydrologische **Einzugsgebiet des Königssees** gemeint, welches ungefähr eine Fläche von 130km<sup>2</sup> umschließt. Diese liegt auf einer geographischen Breite von 47°26' N bis 47°36' N und zwischen 12°53' und 13°02' östlicher Länge.

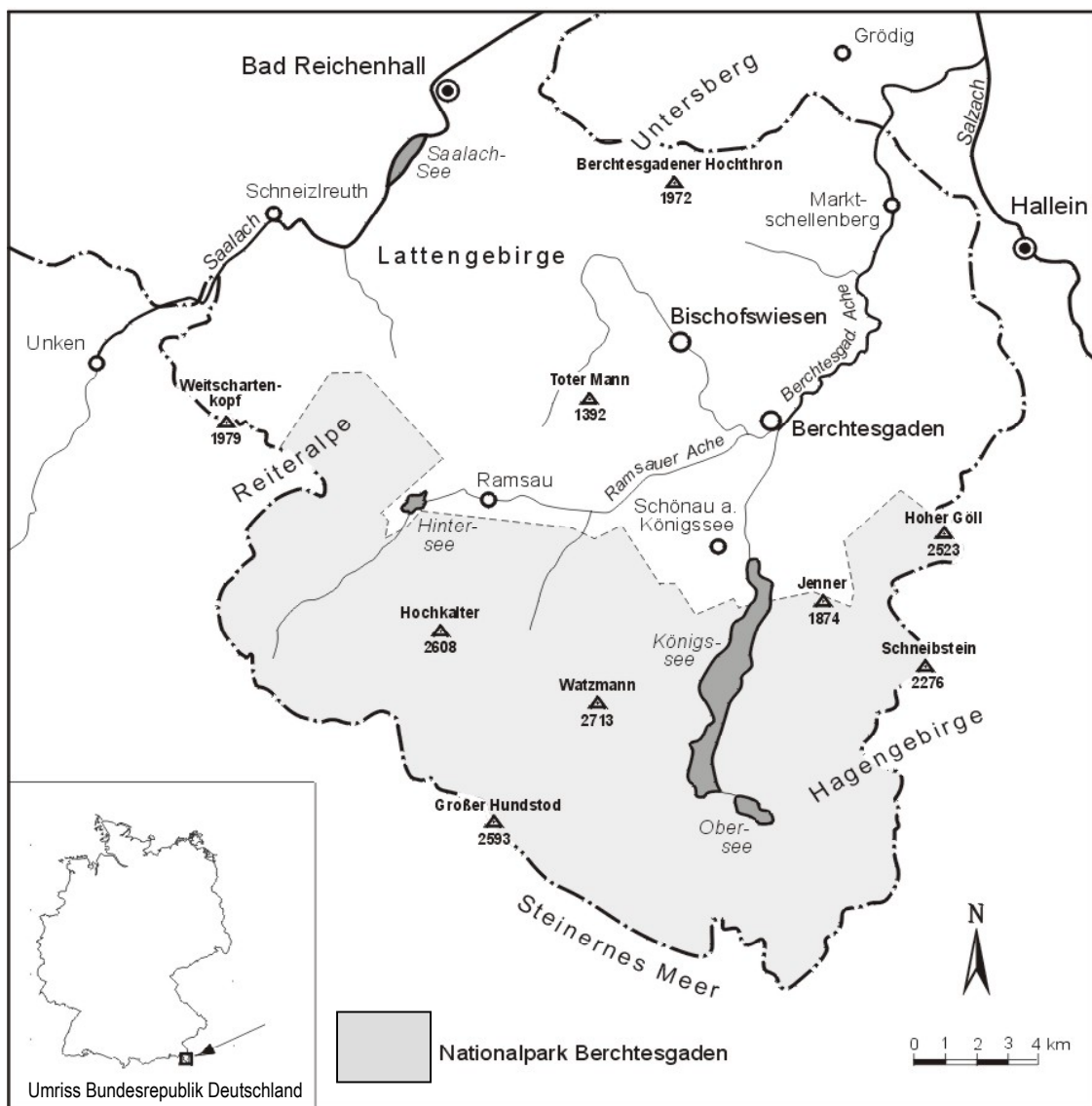
Da das UG vollständig unter dem gesetzlich definierten Schutzstatus eines Nationalparks liegt, ist für die Zukunft der Eingriff des Menschen auf das Gebiet begrenzt. So gehört dieser Raum zu einer der wenigen Flächen in Mitteleuropa, der das in der Zielstellung (vgl. Kap. 1) formulierte Erfordernis der „Nullfläche“ weitestgehend erfüllt. Darüber hinaus ist durch den Schutzgebietsstatus eine Kontrollmöglichkeit gegeben, die in anderen Gegenden nicht generell möglich ist.

Die Besonderheit und die Schutzwürdigkeit des Nationalparks liegt u. a. in der engen Aneinanderreihung von differenzierten Klimabedingungen auf kleinem Raum, wie es

## 2 Das Untersuchungsgebiet

Hochgebirgslandschaften zu eigen ist. Dies führt zu einer spezifischen und seltenen Artenzusammensetzung in Flora und Fauna, welche hinsichtlich der ökologischen Verhältnisse äußerst sensibel ist.

Folgendes Zitat von HUPFER (1998, S. 292) unterstreicht die besondere Eignung eines Seeinzugsgebietes als UG für o. g. Fragestellungen: „Die stärksten und eindeutigsten Signale auf Klimaveränderungen sind in Extremklimaten wie Hochgebirgs-lagen, hohen Breitengraden oder semiariden Gebieten, aber auch in bereits anthropogen geschädigten Gewässersystemen zu erwarten.“ Zudem kommt der Umstand hinzu, dass es detaillierte Vergleichsdaten aus früheren Zeiträumen gibt.



**Abbildung 2: Karte des Nationalpark Berchtesgaden**

(Topographische Grundlage: BAYERISCHES LANDESMESSUNGSAMT MÜNCHEN 1994  
Kartographie: VERA FALCK)

### **2.2 Geologie**

In diesem Kapitel sollen insbesondere auf die stofflichen Eigenschaften der im EZG befindlichen Gesteine eingegangen werden, da sie den geogenen Background für die Stoffhaushaltsuntersuchungen bestimmen. Ausführliche geologische Erläuterungen allgemeiner Art sind u. a. bei LANGENSCHIEDT (1994) oder BRAUN (1998) zu finden.

Die Gebirgsstöcke, zu denen von Südosten her der Hohe Göll und das Hohe Brett, im Osten Schneibstein mit Hagengebirge sowie im Westen Hochkalter bzw. Watzmannmassiv zu nennen sind, gliedern das Gebiet in drei parallel verlaufende Täler. Die Hochflächen, zu denen auch das bekannte Steinerne Meer gehört, sind zumeist verkarstet. Als Teilbereich der nördlichen Kalkalpen bestehen die Berchtesgadener Alpen aus Karbonatgesteinen, die im marinen Milieu während des Mesozoikum abgelagert wurden. Die tiefgreifenden Krustenbewegungen durch das Aufeinanderdriften der Eurasischen Platte und der Afrikanischen Platte mit der vorgeschalteten, kleineren Adriatischen Platte führten im Eozän vor ungefähr 45 Mio. Jahren zu intensiven Faltungs- und Überschiebungsvorgängen. Erst seit der Wende des Alttertiärs zum Jungtertiär liegen die Gesteinsdecken etwa in ihrer heutigen Position, und die intensivere, bis heute andauernde Hebung der Alpen setzte ein (LANGENSCHIEDT 1994; STANLEY 1994).

Ohne der Erwähnung der einzelnen lithofaziellen Unterschiede wie sie in Kap. 5.5 erfolgt, sind im UG im wesentlichen folgende Gesteine bzw. Minerale anzutreffen: Das älteste Schichtglied besteht aus Salztone, Anhydrit und Gips der permisch-skythischen Ablagerungen im Haselgebirge. Die ältesten Gesteine aus der alpidischen Trias sind die Sandsteine der Werfener Schichten mit entweder glimmerreichen oder tonig-mergeligen Lagen, bzw. Kalkgestein. Ein weiteres, später abgelagertes Material, ist der Ramsaudolomit, charakterisiert als typisches, hartes, sprödes, weißes Dolomitgestein. Dieses unterliegt vor allem der physikalischen Verwitterung und baut auch den Schuttstrom im Wimbachgries auf. Die letztlich dominierende Schichtfolge im Berchtesgadener Raum, der Dachsteinkalk, ist bekannt als ein Gestein nahezu komplett biogener Herkunft unter flachmarinen Entstehungsbedingungen. Vereinzelt fleckenhaft auftretende jurassische Gesteine sind Mangan-Schiefer, Radiolarite und Malmkalke. Ablagerungen aus der Kreide und dem Tertiär spielen im Untersuchungsgebiet eine untergeordnete Rolle (LANGENSCHIEDT 1994).

Als Fazit für den Stoffhaushalt sei hier festzuhalten, dass in erster Linie karbonathaltige Gewässer mit nur sehr geringen Gehalten an anderen Mineralien zu erwarten sind.

### **2.3 Geomorphologie / Relief**

Für den Landschaftshaushalt im Untersuchungsgebiet sind folgende Bedingungen bezüglich der Reliefverhältnissen von besonderer Bedeutung: Die hohe Reliefenergie verstärkt den Umsatz an Stoffen durch beschleunigtes Prozessgeschehen vor allem bei gravitativ bedingten Bewegungen. Die speziellen Verhältnisse des Hochgebirges unterstützen die Verwitterung und somit die Bereitstellung von Material für den Input im Stoffhaushalt. Gerade die hochgebirgsspezifischen Phänomene wie Lawinen, Muren und Felsstürze haben einen großen Anteil am Gesamteintrag von Feststoffen in die Vorfluter.

Auffällig in der Morphologie des Nationalparkgebietes sind die drei tief eingeschnittenen von NE-SW verlaufenden Täler des Königssees und des Obersees (WWN-SSE) sowie das Wimbachtal und das Klausbachtal.

Zur Verdeutlichung der hohen Reliefenergie im UG wird häufig der große Sprung vom Watzmanngipfel mit seinen 2713m ü. NN zur Höhe des Königsseesspiegels (603m) auf einer Strecke von ungefähr 3km genannt. Dies führt zur Ausbildung der höchsten Wand in den Ostalpen, der Watzmannostwand. Betrachtet man nun noch die besondere Tiefe des Königssees, erhöht sich dieser Betrag zusätzlich um 190m.

Als wesentlicher, reliefbildender erosiver Prozess der Vergangenheit zur Ausgestaltung des heutigen Formenschatzes ist die glaziale Überprägung zu nennen. Dieser wird charakterisiert durch Trog-, Hängetäler und Kare, aber auch durch Moränenablagerungen und erratische Blöcke, zu denen der Schusterstein kurz vor der NP-Grenze bei der Gemeinde Schönau am Königssee als wohl bekanntester gehört. Die wenigen, kleinen Gletscher oder Firnfelder im NP-Gebiet, Blaueis, Watzmanngletscher und Eiskapelle haben wegen des allmählichen Massenverlustes in den vergangenen Jahrzehnten eher traurige Berühmtheit erlangt.

Letztlich ist noch als besonders formengebend der Verkarstungsprozess auf den Kalkgesteinen zu nennen. Vor allem in den Hochlagen (Steinernes Meer, Reiteralpe) entfalten diese Prozesse ihre volle Wirkung.



**Abbildung 3: Blick zu den steilen Wänden des Eisbachtals**

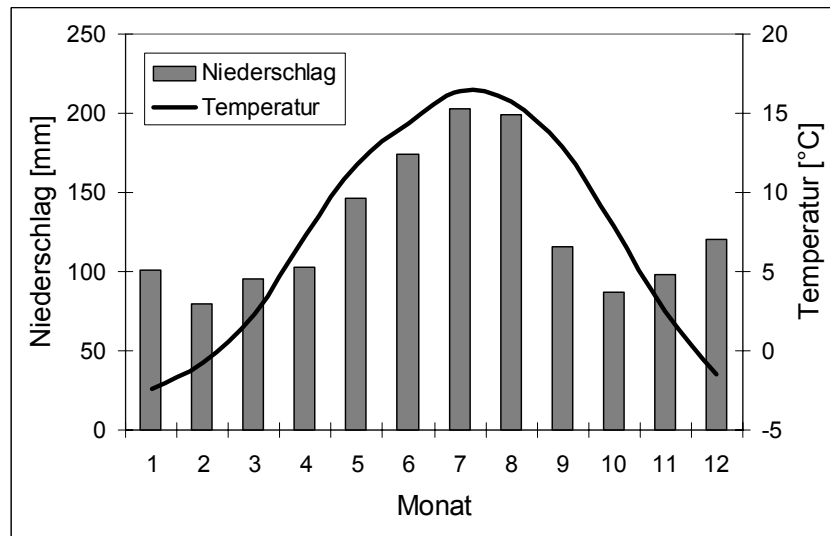
(Photo: VETTER)

Abtragungsformen wie Blaiken und die Gründe für deren mögliche Entstehung durch almwirtschaftliche Nutzung oder Tourismus sind bei STAHR und DOMMERMUTH (1993) oder MANGHABATI (1988) diskutiert worden. LANGENSCHIEDT (1995) hat in diesem Zusammenhang in Untersuchungen am Jenner festgestellt, dass die Abtragsraten in den anthropogen genutzten Räumen trotz flächenhafter Schädigung der Vegetationsdecke erstaunlich gering sind. Als weiterführende Literatur sei auf DOMMERMUTH (1993, 1995), JOHANNES (1995, 1997), FISCHER (1988) oder ARTMANN und VÖLKE (1999) verwiesen.

### **2.4 Klima**

Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, kann an dieser Stelle nicht auf die gesamte klimatische Situation im Nationalpark eingegangen werden, sondern lediglich auf Aspekte, die sich auf die Besonderheiten der Auswertungen dieser Studie beziehen. Um auch eine Einordnung aktueller Veränderungen in vergangene Klimaverhältnisse zu erhalten, wird die längerfristige Klimavariabilität im UG in Ansätzen dargestellt. Umfangreiche Ausführungen zu den klimatischen Verhältnissen sind den Untersuchungen von ENDERS (1979), HOFMANN (1992) oder BRAUN et al. (in Vorbereitung) zu entnehmen.

Abbildung 4 verdeutlicht die monatlichen Temperatur- und Niederschlagsmittel der Jahre 1961-1990 der Klimamessstation Berchtesgaden (551m ü. NN).



**Abbildung 4: 30-jährige Temperatur- und Niederschlagsmonatsmittel in Berchtesgaden (551m ü. NN)**

(Datenquelle: NATIONALPARKVERWALTUNG BERCHTESGADEN, Bezugsperiode 1961-1990)

Generell hat die Region den Charakter eines alpinen Gebirgsklimas, d. h. die besondere reliefspezifische Situation führt zu einer Kleingliederung mit lokal unterschiedlichen Klimaphänomenen.

Die großklimatische Situation für den Alpenraum ist bei CEBON et al. (1988) umfassend erläutert. Daraus wird deutlich, dass sich das UG von seiner klimatischen Charakteristik eher in einem Übergangsbereich zwischen dem ozeanisch und dem kontinental geprägten Klima der Mittelbreiten einordnen lässt. Die Hochlagen tragen auf Grund der großen mittleren Temperaturunterschiede eher kontinentalen Charakter, obgleich das Klima des Untersuchungsgebietes insgesamt durch seine Lage in Mitteleuropa noch unter ozeanischem Einfluss steht.

Für die später folgenden Auswertungen zum atmosphärisch bedingten Stofftransport ist hervorzuheben, dass vor allem zwei lokale Zirkulationsmuster die Windverhältnisse im Untersuchungsgebiet prägen: Die Hangwindzirkulation und die Berg-Talwindzirkulation. Beide sind ausführlich in HOFMANN (1992) beschrieben.

Die Niederschlagsverhältnisse verändern sich einerseits mit der Höhenlage andererseits auch mit der Lage im Gebirgsraum. Tabelle 1 zeigt, wie sich die Abnahme des Niederschlags von der Station Bischofswiesen-Winkl, welche ca. 10km nördlich des



Königssees liegt, bis zur Station St. Bartholomä (s. Abbildung 24) in Zahlen ausdrücken lässt.

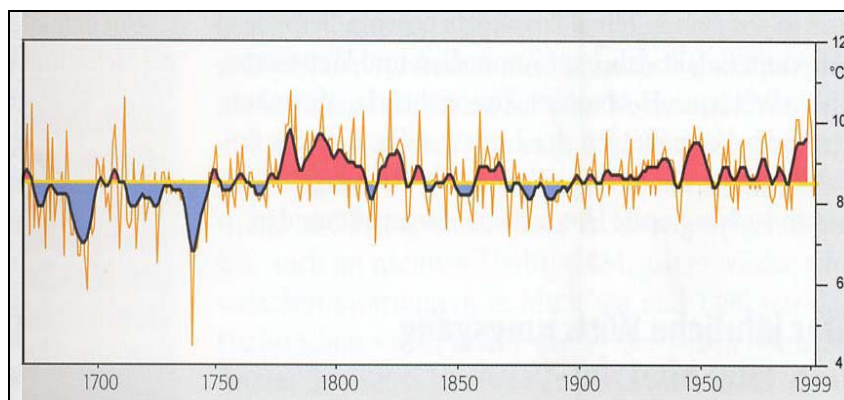
Stationsname	2000 [mm]	2001 [mm]	2002 [mm]	2002 ohne Januar* [mm]
Bischofswiesen-Winkl	1602,7	1861,5	2024,2	1959,7
Schönau				1665,1
St.Bartholomä		1463,7	1657,9	1619

**Tabelle 1: Vergleich von Jahresniederschlagssummen verschiedener Stationen aus dem Untersuchungsgebiet und dessen Umgebung**

(\* Die Station Schönau wurde erst zum Februar 2002 in Betrieb genommen. Datenquelle: NATIONALPARKVERWALTUNG BERCHTESGADEN und METEOMEDIA AG)

Hinsichtlich der Niederschlagsverhältnisse sei noch erwähnt, dass gerade in den Sommermonaten das Aufkommen von Starkregen wahrscheinlich ist.

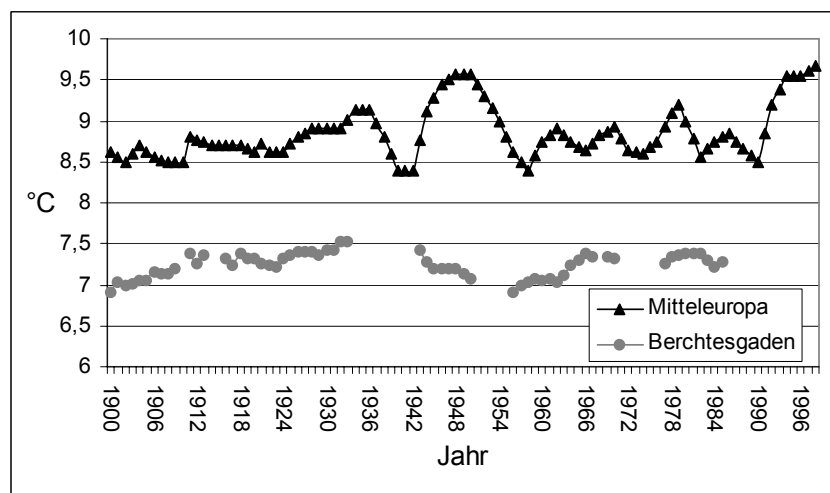
Nach HUPFER (1998) können die Folgen anthropogener Nutzung im Einzugsgebiet die überregionalen klimatischen Einflüsse noch übertreffen. Da allerdings die anthropogene Nutzung im UG heute auf ein sehr niedriges Niveau reglementiert ist (vgl. Kap. 2.8), kann das Augemerck ganz auf die Betrachtung der klimatischen Verhältnisse zur gegenwärtigen Zeit und in der jüngsten Vergangenheit gelenkt werden. Deswegen sollen diesbezüglich noch einige Ausführungen an Hand des Parameters Lufttemperatur folgen. Klimarekonstruktionen (vgl. GLASER 2001) ermöglichen einen Rückblick in die klimatischen Verhältnisse früherer Zeiten und zeigen, dass sich diese keineswegs immer gleichartig verhalten haben. Abbildung 5 stellt dar, wie die Temperaturen in Mitteleuropa um den Mittelwert aus dem Zeitraum 1500-1999 schwankten.



**Abbildung 5: Schwankungen der Temperaturmittelwerte ab 1650 für den mitteleuropäischen Raum**

(Gelbe Linie: Mittelwert der Periode 1500-1997, Orangefarbene Linie: Saisonale Temperaturmittel, Schwarze Linie: Tiefpassgefilterte Werte [11-jähriger Gauß'scher Tiefpassfilter]. Quelle: GLASER 2001, Abdruck der Abbildung mit freundlicher Genehmigung der WBG Darmstadt)

Auffällig ist vor allem, dass seit 1900 die Temperaturwerte fast immer über diesem 500-jährigen Mittelwert lagen. Die Annahme, dass sich die Verhältnisse für den Berchtesgadener Raum ähnlich verhielten, wird mit Abbildung 6 bestätigt. Hier wurden die Werte für Mitteleuropa ins Verhältnis zu den Werten von Berchtesgaden gesetzt. Die Temperaturdynamik verhielt sich insgesamt gedämpfter und bewegt sich auf einem niedrigeren Niveau, was vermutlich mit der Höhenlage zusammenhängt (Messstation liegt auf ca. 550m ü. NN). Leider wurde die Station 1990 abgebaut und wies auch in der Vergangenheit immer wieder Messlücken auf, dennoch zeichnet sie grob den typischen mitteleuropäischen Temperaturverlauf der Jahreswerte nach.



**Abbildung 6: Vergleich der Lufttemperaturmittelwerte des 20. Jahrhunderts von Mitteleuropa und Berchtesgaden**

(Datenquelle: GLASER 2001 und NATIONALPARKVERWALTUNG BERCHTESGADEN)

Würde man in den Graphen der Temperaturwerte eine Trendgerade hinein legen, ergäbe sich ein sehr kleiner, aber positiver Steigungsfaktor, und dies obgleich die deutlich höheren Temperaturmittelwerte der letzten 13 Jahre nicht mit in die Betrachtung eingehen ( $y = 0,0009x + 7,2037$ ).

### 2.5 Gewässer

In diesem Teilkapitel sollen insbesondere die neuen Erkenntnisse aus dem LAKE-Projekt einfließen. Eine detaillierte Charakteristik des Königssees mit Einordnung in andere Seen ist der Arbeit von SIEBECK (1982) zu entnehmen. Dennoch sollen hier kurz die besonderen physikalischen Eigenheiten des Königssees Erwähnung finden (Tabelle 2):

<b>Größte Tiefe</b>	190 m
<b>Mittlere Tiefe</b>	98,1 m
<b>Seeoberfläche</b>	5,2 km <sup>2</sup>
<b>Max. Seelänge</b>	7,7 km
<b>Max. Seebreite</b>	1,2 km
<b>Einzugsgebietsgröße</b>	130 km <sup>2</sup>
<b>Seevolumen</b>	510 Mio. m <sup>3</sup>

**Tabelle 2: Ausgewählte Physikalische Kennwerte des Königssees**

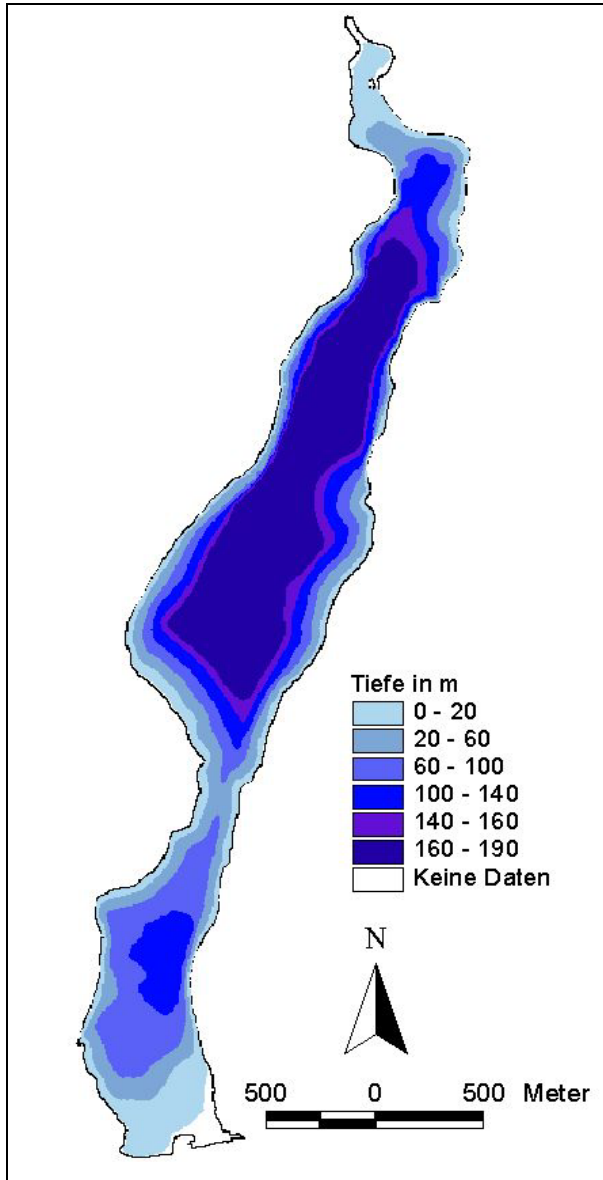


**Abbildung 7: Blick vom Schrainbach ins Oberseetal**

(Photo: VETTER)

Mit den verhältnismäßig hohen Werten von Maximaltiefe bzw. mittlerer Tiefe gehört der Königssee zu den tiefsten Seen Europas. Die relative Tiefe ist ein Prozentwert, der sich aus der Beziehung von der Maximaltiefe eines Sees zu dessen Größe der Seeoberfläche berechnet. Demnach ergibt sich für den Königssee der Wert von 7,4%, ein bemerkenswert hoher Wert, der selten bei Seen erreicht wird. Die besonderen morphometrischen Verhältnisse können der Abbildung 8 entnommen werden. Der von Wänden eingerahmte Königssee mit einer relativ kleinen Oberfläche hat eine gute Windgeschützttheit zur Folge. Diese ist bei der Betrachtung der Zirkulationsverhältnisse zu berücksichtigen.

Im Rahmen des Projektes konnten die Teilvolumina des Königssees neu berechnet werden (Tabelle 3). Diese unterscheiden sich allerdings nur geringfügig von den Werten SIEBECKs (1982).



**Abbildung 8: Bathimetrische Karte des Königssees**

(Topographische Grundlage: Überarbeitete Version des digitalen Tiefenmodells der NATIONALPARKVERWALTUNG BERCHTESGADEN und eigene Berechnungen)

Wasserschicht von /bis [m]		Teilvolumen [m³]	[%]	Teilvolumen [m³] kumulativ
0	10	47.950.656	9,40	47.950.656
10	20	44.312.937	8,68	92.263.593
20	30	41.593.067	8,15	133.856.660
30	40	39.217.106	7,69	173.073.766
40	50	37.108.486	7,27	210.182.252
50	60	35.248.030	6,91	245.430.282
60	70	33.340.296	6,54	278.770.578
70	80	31.376.344	6,15	310.146.922
80	90	29.028.792	5,69	339.175.713
90	100	26.710.638	5,24	365.886.351
100	110	23.003.759	4,5	388.890.110
110	120	21.371.903	4,19	410.262.012
120	130	20.016.335	3,92	430.278.347
130	140	18.676.748	3,66	448.955.095
140	150	17.379.541	3,40	466.334.637
150	160	15.878.401	3,11	482.213.037
160	170	13.795.086	2,70	496.008.123
170	180	10.514.872	2,06	506.522.995
180	190	3.490.283	0,68	510.013.277
		<b>510.013.277</b>	<b>100</b>	

**Tabelle 3: Neuberechnung der Teilvolumina des Königssees**

(Datenquelle: NATIONALPARKVERWALTUNG BERCHTESGADEN und eigene Berechnungen)

Dass die Morphometrie auch Einfluss auf die Inhaltsstoffe und deren Verteilung im Seegewässer haben kann, erklärt u. a. die oligotrophe Situation des Königssees (vgl. Tabelle 4). Einer Aufstellung von SIEBECK (1982) lässt sich entnehmen, dass Seen mit so geringen relativen Tiefenwert wie am Königssee selten sind. KLEE (1991) geht darauf ein, wie sich die Zusammenhänge zwischen trophogener und tropho-

lythischer Zone darstellen. Mit zunehmender Tiefe wird i. d. R. der Anteil der thropogenen Zone, in der Pflanzensubstanz produziert wird, kleiner. Dies geht auf Kosten der tropholytischen Zone, in welcher Abbauvorgänge vorherrschen. Auch deshalb sind zumeist flache Seen in der Biomasseproduktion viel aktiver als tiefe Seen. Organische Substanz kann in diesen flachen Seen meist nicht abgebaut werden, bevor sie den Seeboden erreicht; die Bildung von Faulschlamm ist die Folge. Dies wiederum führt zur Zehrung des Sauerstoffs im Hypolimnion. Und das Vorhandensein von einem Sauerstoffüberschuss oder -defizit bestimmt u. a. die Nährstoffsituation eines Sees.

<b>pH</b>	7,3 – 8,5
<b>NO<sub>3</sub></b>	1,3-2,7 mg/l
<b>NO<sub>2</sub>-N</b>	< 0,02 mg/l
<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	< 0,02 mg/l
<b>PO<sub>4</sub>-P</b>	an der Nachweisgrenze
<b>Cl<sup>-</sup></b>	0,1-0,7 mg/l
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	2,0-6,5 mg/l

**Tabelle 4: Spannweite chemischer Kennwerte des Königssees**

Hinsichtlich der Fließgewässer, die in den Königssee entwässern, und der Aufteilung der dazugehörigen Einzugsgebiete inklusive ihrer Charakteristika sei hier auf Kap. 5.5 verwiesen, da dort diesbezüglich neue Ergebnisse diskutiert werden.

Es lässt sich festhalten, dass der Königssee auf Grund seiner speziellen morphometrischen Verhältnisse, vor allem aber durch seinen oligotrophen Charakter, eine Sonderstellung im europäischen Raum einnimmt.

### **2.6 Böden**

Die mosaikhafte Gliederung der Böden im UG ist Folge der hohen Reliefenergie und der damit verbundenen Abtragungs- und Akkumulationsprozesse sowie der unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse, welche auf die Bodenbildung einwirken (vgl. hier Abbildung 50). Zusätzlich kommt noch die Variabilität der Ausgangsgesteine durch vielschichtige geologische Verhältnisse im UG (vgl. Kap. 2.2) hinzu.

Typisch für den Raum sind auf Grund der o. g. Prozesse und des eng begrenzten Entwicklungszeitraumes eher flachgründige, wenig ausgebildete Böden. Durch die hohen Abtragsraten steht auch kaum Verwitterungsmaterial zur Ausbildung tiefgründiger Böden zur Verfügung. Seltene, mächtigere Bodenentwicklungen gehen auf Kolluvien solifluidalen oder äolischen Ursprungs zurück (LANGENSCHIEDT 1995). Das geringe Wasser- und Nährstoffspeichervermögen der hauptsächlich im UG vorkommenden Syrosemi und Rendzinen ist bei den weiter unten ausgeführten Stoffhaushaltsuntersuchungen zu bedenken. Hinzu kommt, dass durch die sich ausbildende Pioniervegetation sowie durch die Ausscheidung von Säuren und Komplexbildnern den Böden zusätzlich Nährstoffe entzogen werden (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1998).

Als Bodentypen sind neben den schon erwähnten flachgründigen, wenig entwickelten Syrosemi und Rendzinen auch Braunerden anzutreffen. Diese haben sich vor allem auf den besonders tonhaltigen Ablagerungen der mergeligen und schieferigen triassischen Sedimente der Werfener und Reichenhaller Schichten, der Moränen, sowie der Jura- und Oberkreideablagerungen entwickelt. Auch kleinräumige Areale von Podsol-Braunerden sind über Jura-Kieselkalken oder Radiolariten zu finden. Nur vereinzelt treten in Senken über den wasserstauenden Schichten (beispielsweise der tonreichen Liaskalke) Niedermoore, seltener Hochmoore auf (NATIONALPARK BERCHTESGADEN 2003).

### **2.7 Vegetation**

Die oben angesprochenen extremen Höhenunterschiede und die unterschiedlichen Expositionen spiegeln sich in der Höhenstufung der Vegetation wider (vgl. Abbildung 51). Im Gebiet des Nationalparks erstreckt sich die durch Buchenmischwaldgesellschaften, Auenwälder sowie Schluchtwaldgesellschaften gekennzeichnete, submontane Stufe bis etwa 700m ü. NN. Dieser schließt sich die höhergelegene montane Stufe mit Bergmischwäldern mit Rotbuchen, Weißtannen, Fichten und Bergahorn bis zu 1400m ü. NN an. Die darüber gelegene subalpine Stufe mit Fichten- und Fichtenlärchenwäldern hat eine Höhenausdehnung bis auf ca. 2000m ü. NN. Das Gebiet des Steinernen Meeres und des Funtensees nimmt darin eine Sonderstellung ein: Durch die Massenerhebung des Gebirges liegt es schon im Bereich des mehr kontinental geprägten Einflussbereiches des Zentralalpenklimas. Dies führt u. a. zu einer

vermehrten Verbreitung von Lärchen-Zirbel-Wäldern auf Grund der mit dem Zentralalpenklima zusammengehörigen höheren Sommertemperaturen. Als Obergrenze der subalpinen Stufe gilt die natürliche Krummholzgrenze bei derzeit 1950m (+/- 50m), welche wenig über der potentiellen Waldgrenze liegt (SCHMIDTLEIN 2000).

Die Vegetationsausstattung des Übergangs zur alpinen Stufe besteht aus Latschengebüsch und Zwergstrauchgesellschaften mit Vogelbeere, Zwerg-Wachholder, Zwerg-Maulbeere, Heidelbeere, Preiselbeere, Rauschbeere und Alpenrose. Die sich weiter nach oben anschließende Vegetation wird durch Seggenrasen- sowie Schutt- und Felsspaltengesellschaften gebildet (NATIONALPARK BERCHTESGADEN 2003).

Veränderungen durch den Menschen (vgl. nächstes Kapitel), die sich auch in der Vegetationszusammensetzung widerspiegeln, führten vor allem durch Rodungen zur Absenkung der realen Waldgrenze unter die potentielle Waldgrenze. Subalpine Fichtenwälder und Tannen wurden zum Teil von Lärchenwäldern verdrängt. Die Almflächen wurden vergrößert und durch die Salinen-Forstwirtschaft wurden die Mischwälder zunehmend durch Fichtenwälder in Monokultur ersetzt (SCHMIDTLEIN 2000).

### **2.8 Anthropogener Einfluss / Schutzgebiet Nationalpark Berchtesgaden**

Da für die Darstellung des Untersuchungsgebietes die im Rahmen des Projektes durchgeführten Erhebungen zur Nutzung hilfreich sind, wird hier dem Ergebnis teil vorgegriffen. Die Ausführungen zur Nutzung im UG fallen etwas umfangreicher aus, damit die wechselhafte Bedeutung des anthropogenen Einflusses in Vergangenheit und Gegenwart abgeschätzt werden kann.

Der Eingriff des Menschen durch Nutzung der Ressourcen in dieser Hochgebirgslandschaft geht auf eine lange Tradition zurück. Befunde aus der Römerzeit im benachbarten Dachsteingebiet belegen eine frühe Beeinflussung dieses Raumes durch den Menschen (MANDL 1996). Die ersten urkundlichen Nennungen von Almen sind aus dem 14. Jahrhundert bekannt (FEHN 1968). Insbesondere im 19. Jahrhundert hat es intensive Waldrodungen zur Anlage von Almen und später zur Bereitstellung von Brennmaterial für die Salzgewinnung gegeben. Darüber hinaus kamen in der Zeit zusätzlich Jagdinteressen auf. Diese Nutzungsformen gibt es heute nicht mehr oder sie spielen auf Grund des Nationalparkstatus eine untergeordnete Rolle.

Daher soll in den nun folgenden Teilkapiteln auf die wesentlichen Nutzungsarten zum gegenwärtigen Zeitpunkt eingegangen werden d. h. auf Almwirtschaft und Tourismus. Über die derzeitige Nutzungsintensität durch Fischfang im Königssees waren vom Landesamt für Fischereiwirtschaft keine Zahlen zu erhalten, weil dadurch direkt auf den Verdienst des einzigen Fischers am Königssee zu schließen wäre. Es wurde lediglich mitgeteilt, dass die Fischfangquote über die letzten Jahre hinweg stabil geblieben ist.

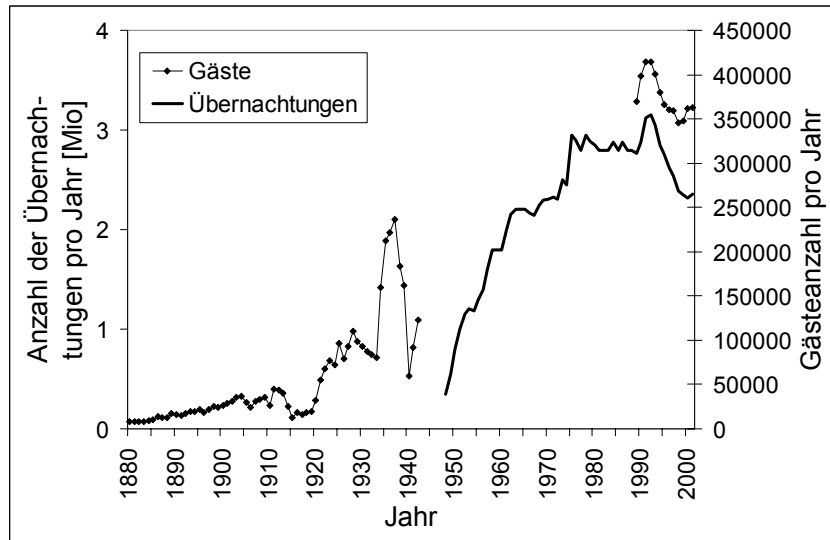
### **2.8.1 Tourismus**

Touristische Nutzung in Nationalparks unterliegt immer einem gewissen Zwiespalt, welcher sich schon allein durch die Verwendung der Begriffe „Nutzung“ und „Nationalpark“ im selben Zusammenhang ergibt. Auf Grund der „Spielregeln“ der Nationalparkverwaltung (NATIONALPARKVERWALTUNG 2003), „Natur sich selbst zu überlassen“, könnte der Tourist eher als störend vermutet werden. Andererseits verfolgt der Nationalpark auch ein Umweltbildungs- und Erholungsziel, und dafür ist ein gewisses touristisches Angebot wünschenswert. Außerdem kommt hinzu, dass durch das Label „Nationalpark“ bedeutsame ökonomische Effekte für die Region erreicht werden, wie jüngst in einer Studie festgestellt wurde (METZLER und JOB 2003). Das folgende Teilkapitel soll Aspekte dieses Konfliktes darstellen. Diese Ausführungen sind deshalb von Bedeutung, da daraufhin untersucht werden kann, wie sich ein Einfluss des Tourismus auf den Landschaftshaushalt gestalten kann.

#### ***2.8.1.1 Geschichte der touristischen Nutzung***

Vor der Entwicklung des Fremdenverkehrs im Berchtesgadener Raum standen Wallfahrten und Forschungsreisen im 17. und 18. Jahrhundert. Aus BECK (1982) geht hervor, dass Alexander von Humboldt 1798 in seinen „Beobachtungen des Bartholomäussees“ die Region um den Königssee besucht hat. Die Region wurde schnell durch Reisebeschreibungen im ausgehenden 18. Jahrhundert als Sommerresidenz und Jagdrevier der bayerischen Könige bekannt. Die touristische Nachfrage nahm bis zum ersten Weltkrieg allmählich zu, was vor allem dem Ausbau der Bahnstrecke von Bad Reichenhall nach Berchtesgaden im Jahre 1888 zu verdanken ist (Abbildung 9).

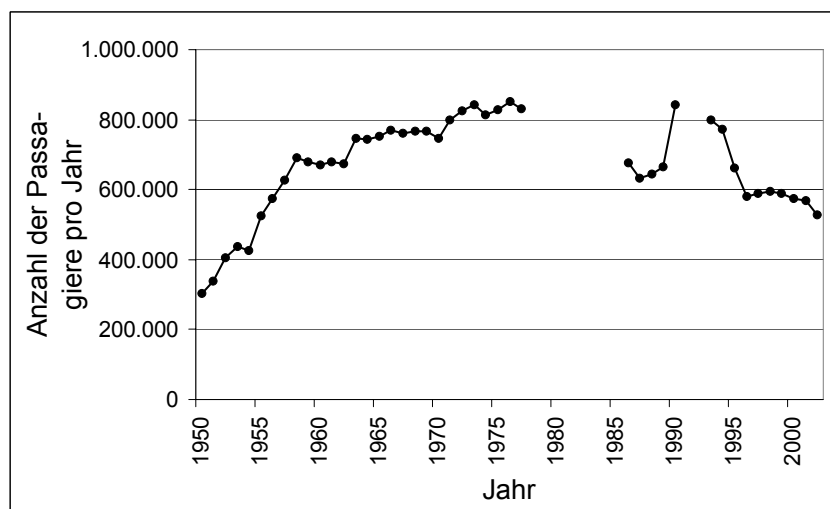




**Abbildung 9: Übernachtungs- und Gästezahlen in der Region Berchtesgaden 1880 bis heute**

(Zwischen 1942 und 1989 liegen keine Gästezahlen, vor 1948 keine Übernachtungszahlen vor. Datenquelle: SCHÖNER 1971 und 1974; BRETL 1978 und KURDIREKTION DES BERCHTESGADENER LANDES 2002)

Unmittelbar nach dem Einbruch des Fremdenverkehrs während des 1. Weltkrieges blühte dieser sofort wieder auf, so dass bereits 1924 Berchtesgaden an der Spitze der bayerischen Tourismusorte stand. Der Fremdenverkehr erlebte zur Zeit des Nationalsozialismus erneut einen Boom, da viele Besucher die Wahlheimat Hitlers kennen lernen wollten. Der Kriegsbeginn führte dann zu einem erneuten Rückgang. Seit 1948 konnte wieder ein allmählicher Anstieg der Besucherzahlen festgestellt werden, der bis in die Mitte der 70er Jahre anhielt. Zur Darstellung der touristischen Entwicklung in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts sollen stellvertretend die Zahlen der Königsseeschifffahrt verwendet werden (Abbildung 10).

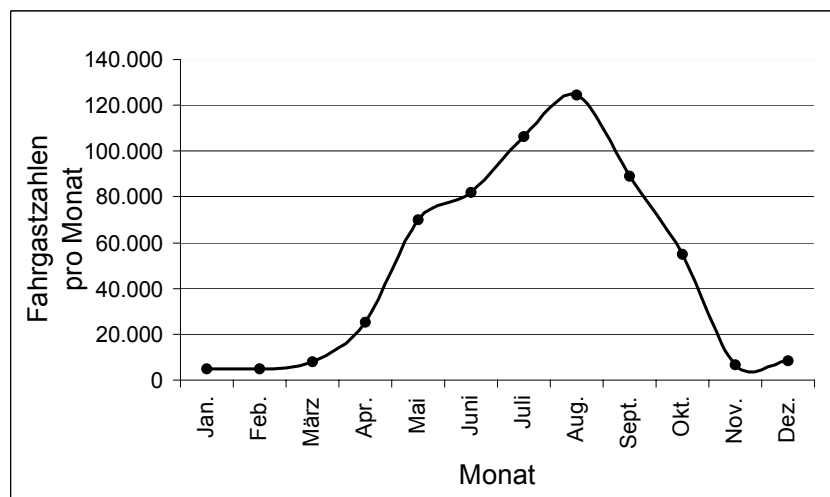


**Abbildung 10: Passagierzahlen der Königsseeschifffahrt 1950 bis heute**

(Aus den Zeiträumen 1978-1985 und 1991/92 liegen keine Daten vor. Datenquelle: STAATLICHE SEENSCHIFFFAHRT KÖNIGSSEE 2002)

Von 1950 bis in die 70er Jahre war eine stetige Zunahme des Fahrgastaufkommens der Königsseeschifffahrt zu verzeichnen. In der Folge setzte eine Abnahme der Passagierzahlen ein, welche erst durch den verstärkten touristischen Andrang nach der Wiedervereinigung abgefangen wurde. Seit 1996 sind die Zahlen bis heute wieder leicht rückläufig.

Die Jahreswerte alleine reichen allerdings nicht aus um abzuleiten, welche temporäre touristische Belastung unter Umständen im Untersuchungsgebiet herrscht. Abbildung 11 zeigt die saisonale Schwankungen des Fahrgastaufkommens, gemittelt über verschiedene Jahre. Deutlich wird, dass im Sommer ein höherer touristischer Andrang zu verzeichnen ist. 54% der Fahrgäste kommen in den Monaten Juli, August und September. Nach mündlicher Auskunft von Mitarbeitern der Königsseeschifffahrt können an einem schönen Sommertag in Ausnahmefällen durchaus bis zu 6000 Fahrgäste über den Königssee transportiert werden.



**Abbildung 11: Saisonale Schwankungen im Fahrgastaufkommen der Königsseeschifffahrt**

(Gemittelte Werte 1995-2002. Datenquelle: STAATLICHE SEENSCHIFFFAHRT KÖNIGSSEE 2002)

### **2.8.1.2 Heutige Touristische Nutzung**

Betrachtet man zusammenfassend die Zahlen zum Tourismus im UG, ist derzeit zwar ein Rückgang an Besuchern der Region zu erkennen, aber dennoch verbleibt das Fremdenverkehrsaufkommen auf hohem Niveau. Mit 2.362.080 Übernachtungen im Jahr 2001 in den fünf Gemeinden des Fremdenverkehrsverbandes (Berchtesga-

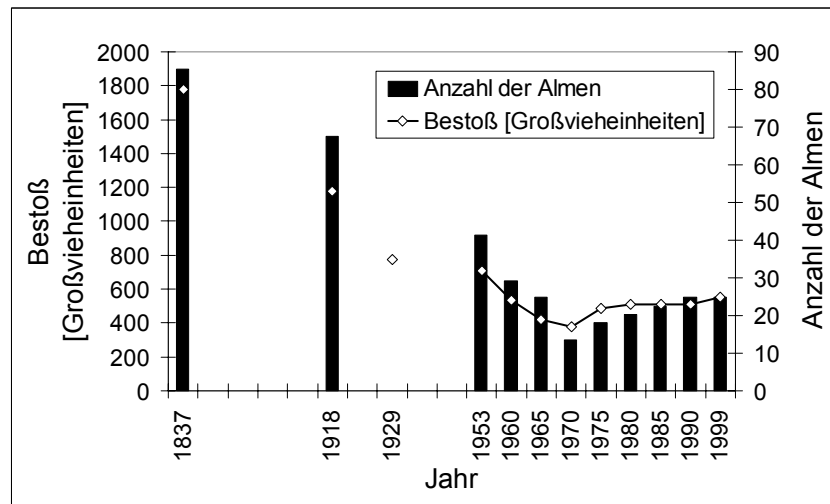
den, Schönau am Königssee, Bischofswiesen, Marktschellenberg und Ramsau) kann die Region als massentouristisches Zentrum bezeichnet werden.

Für die Untersuchungen zum Nährstoffkreislauf im UG ist noch von Bedeutung, wie die Entsorgung der Abwässer der Gaststätten oder Unterkünften im EZG stattfindet. Die Gaststätten mit dem höchsten Besucheraufkommen (St. Bartholomä und Salletalm) sind seit 1989 (bzw. Salletalm seit 1991) über eine Druckleitung direkt an die Kläranlage von Berchtesgaden angeschlossen (NATIONALPARKVERWALTUNG 2003). Das Kärlingerhaus, die Jenner Bergstation, das Schneibsteinhaus, die Gotzenalm, die Königsbachalm und die Fischunkelalm verfügen über Kleinkläranlagen (SIEBECK 1982).

### **2.8.2 Almwirtschaft**

#### ***2.8.2.1 Geschichte der almwirtschaftlichen Nutzung***

Wie oben angedeutet, geht die almwirtschaftliche Nutzung im Nationalpark Berchtesgaden auf eine lange, jahrhundertalte Tradition zurück. Vor allem die rechtliche Situation der Almen (Besitz-, Pacht-, Auftriebs- und Schwandrechte etc.) hat in dem Raum eine sehr wechselvolle Geschichte. Auch dies führte in der Almwirtschaft in der Vergangenheit zu ganz unterschiedlichen Nutzungsintensitäten (Abbildung 12). Eine ältere Einheit, in der die Auftriebsmenge ausgedrückt werden kann, sind KG (Kuhgräser-Einheiten). Bei unterschiedlichem Vieh wird durch diese Größe dem spezifischen Futterbedarf und dem Tiergewicht einzelner Arten Rechnung getragen. Beispielsweise entspricht 1KG einer Kuh, einem Jungrind entsprechen nur 0,5KG. Die neuere Kenngröße ist GVE (Großvieheinheiten). Der Unterschied der Bewertung der einzelnen Vieharten zwischen beiden Parametern ist gering. Betrachtet man die almwirtschaftliche Entwicklung seit 1837 (ab diesem Zeitraum liegen verhältnismäßig verlässliche Zahlen vor), ist zu erkennen, dass es bis in die Mitte der 70er Jahre des vorletzten Jahrhunderts eine permanente Abnahme der Zahl der Almen wie auch des Bestosses gab.



**Abbildung 12: Almwirtschaftliche Entwicklung im Gebiet des Nationalparks Berchtesgaden**

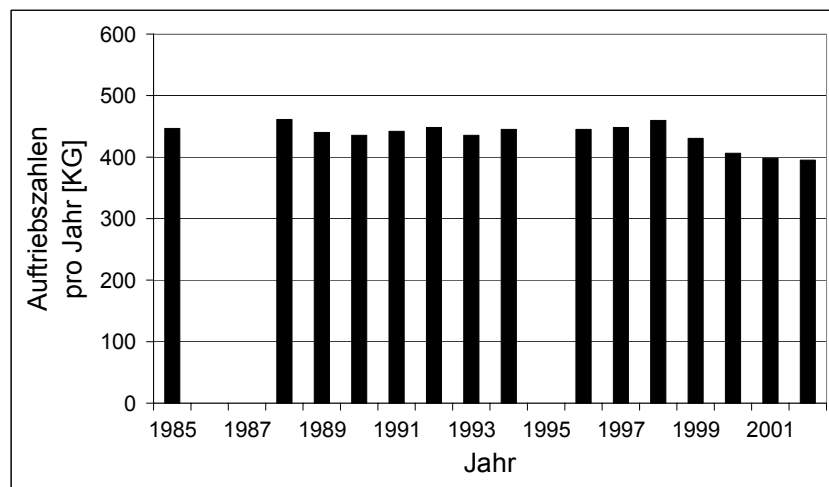
(Vor 1953 gibt es nur vereinzelt Daten. Datenquelle: NATIONALPARKVERWALTUNG BERCHTESGADEN 1990 und AMT F. ALMSTATISTIKEN D. LANDESKREISES BERCHTESGADENER LAND, LAUFEN / TRAUNSTEIN 2002)

### 2.8.2.2 Heutige almwirtschaftlichen Nutzung

In den letzten 20 Jahren sind die Auftriebszahlen mehr oder minder gleich geblieben (Abbildung 13). Erst die aktuellen Zahlen zeigen eine leicht rückläufige Tendenz, die damit zusammenhängt, dass in den vorausgegangenen Jahren die Almbauern verstärkt Fremdvieh (von anderen Landwirten) mit aufgetrieben hatten, was heute in dem Maße nicht mehr der Fall ist. Die Zahl der Almen und der Beschäftigten in der Almwirtschaft war in den letzten Jahren nahezu unverändert. Derzeit werden 25 Almen im Nationalpark bestoßen. Nach den Aussagen des Amtes für Landwirtschaft ist das Verhältnis zwischen den Interessen des Nationalparks und denen der Almbauern derzeit weitestgehend konfliktfrei.

Dass die almwirtschaftliche Nutzung im NP Berchtesgaden relativ stabil bleibt und auch in Zukunft nach Meinung des AMTES FÜR LANDWIRTSCHAFT IN LAUFEN/TRAUNSTEIN weiterhin bedeutend sein wird, hängt mit folgenden Umständen zusammen. Es gibt im wesentlichen heute – neben den Einnahmen durch die eigentliche landwirtschaftliche Tätigkeit – vor allem zwei weitere Einnahmequellen für die Almbauern. Zum einem sind dies die Fördermittel, die aus dem Kulturlandschaftsprogramm (KULAP, BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN 2002) den Almbauern gezahlt werden, zum anderen besteht die Möglichkeit der Nutzung des Betriebes als Gaststätte. Für Letzteres gibt es neben der Möglichkeit, eine Gaststätte als Gewerbe anzumelden, eine andere genehmi-

gungsfreie landwirtschaftliche Nebentätigkeit. Dies ist in einem Erlass der Regierung von Oberbayern vom 26.6.1991 geregelt (REGIERUNG VON OBERBAYERN 1991). Normalerweise bedarf der Betrieb eines Gaststättengewerbes der Erlaubnis. Laut den „Hinweisen zur Bewirtung auf Almen“ ist aber eine Bewirtung ohne Erlaubnis möglich, wenn es erstens an der erforderlichen Intensität der Gewinnerzielung fehlt, und wenn es sich zweitens um eine mit der landwirtschaftlichen Urproduktion nach allgemeiner Auffassung und Übung zusammenhängenden Tätigkeit (landwirtschaftliche Nebentätigkeit) handelt.



**Abbildung 13: Almauftrieb in Kuhgräser von 1985 bis 2002**

(Datenquelle: AMT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND ERNÄHRUNG LAUFEN / TRAUNSTEIN 2002)

Gemäß den Hinweisen fehlt es an der erforderlichen Intensität für ein Gewerbe zum einem, „wenn nur gelegentlich an Wanderer, die danach fragen, Getränke aus den eigenen Beständen nur gegen geringes Entgelt abgegeben werden (...)“. Punkt zwei hingegen regelt, dass die Bewirtung nur dann im Rahmen einer landwirtschaftlichen Nebentätigkeit liegt, wenn

- „eigene Produkte (Milch, Butter, Käse, u. U. auch Speck, Obstler) abgegeben werden,
- der Umfang der Bewirtung dem sonstigen Betrieb der Alm untergeordnet ist,
- nicht durch Aufstellen von Tischen und Stühlen besondere Vorkehrungen zur Aufnahme von Gästen getroffen werden.“

Da diese Hinweise verschieden ausgelegt werden können, ist es laut Auskunft des Amtes für Landwirtschaft in Laufen/Traunstein immer wieder zu Konflikten gekommen.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass die Erhaltung der Almwirtschaft in der heutigen Form sich darauf einstellen muss, im Spannungsfeld von wirtschaftlichen und

landschaftspflegerischen Interessen sowie von bergbäuerlichen Traditionen zu stehen. Da im Nationalpark zusätzliche Einkommensmöglichkeiten durch touristische Nutzung gegeben sind, ist anzunehmen, dass im Nationalparkgebiet weiterhin mit almwirtschaftlicher Nutzung von etwa gleichbleibender Intensität zu rechnen ist.

### **2.8.3 Schutzgebiet Nationalpark Berchtesgaden**

Naturschutzbestrebungen gehen in Berchtesgaden auf eine lange Geschichte zurück. Bereits 1910 wurde der „Pflanzenschonbezirk Berchtesgadener Alpen“ gegründet. Dieser Erfolg geht auf das Wirken des „Vereins zum Schutz und zur Pflege der Alpenpflanzen“ zurück. Die damals 83km<sup>2</sup> große Schutzfläche umfasste den südlichen Teil des heutigen Nationalparks mit dem Obersee, dem Königssee, und den direkt angrenzenden Gebirgsstöcken. Die zuerst nur botanischen Schutzintensionen wurden 1921 mit dem Ziel des Tierschutzes ergänzt. Mit der Gründung des Naturschutzgebietes Königssee wurde der ursprüngliche Pflanzenschonbezirk auf eine Fläche von fast 200km<sup>2</sup> erweitert, weil die Gebiete Hoher Göll, bayerisches Hagengebirge, der bayerische Teil des Steinernen Meeres, der Watzmann, Hochkalter und der südliche Teil der bayerischen Reiteralme integriert wurden. Erst 1972 beschloss der bayerische Landtag die Ausweisung eines besonderen Schutzgebietes, welches über die bisherigen Ansprüche hinausgehen sollte. Dies führte nach sechsjähriger Planung am 01.08.1978 zur Gründung des Nationalparks Berchtesgaden mit seiner heutigen Flächen von 210km<sup>2</sup>. Anfang der 90er Jahre des letzten Jahrhunderts wurde das Schutzgebiet noch einmal um sein Vorfeld auf insgesamt 460km<sup>2</sup> erweitert, welches zusammen mit der heutigen Nationalparkfläche das Biosphärenreservat Berchtesgaden bildet.

Um das hohe touristische Potential nicht ungenutzt zu lassen und die traditionelle Almwirtschaft mit ihren althergebrachten Almrechten in Einklang mit den strengen Vorgaben der IUCN (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources) zur Durchsetzung der Schutzziele in Nationalparks zu bringen, wurde ein Zonierungskonzept aufgestellt (EUROPARC und IUCN 2000). Der Anspruch der IUCN, welche eine Kernzone von 75% und eine Pflege- und Erhaltungszone von 25% der Gesamtfläche vorgeben, gilt in Berchtesgaden nur als Zielvorstellung. Derzeit gehören 67% der Fläche zur Kernzone. Die Planung geht dahin, diese Zone bis 2010 auf 77% zu erweitern (NATIONALPARK BERCHTESGADEN 2000).

### 3 Theoretische Grundlagen und Forschungsstand

Im folgenden Kapitel sollen sowohl allgemeiner Forschungsstand und theoretischer Hintergrund zum Arbeitsthema dargestellt werden, als auch der spezielle Untersuchungsstand im UG erläutert werden.

Es folgt hier keine ausführliche Darstellung der im Ergebnisteil verwendeten limnologischen Grundlagen, da dies den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde und ohnehin in vielen Lehrbüchern bestens aufbereitet ist (z. B. HUTCHINSON 1957; BOHLE 1995; WETZEL 2001). Da aber im Ergebnisteil die Auswirkungen einer möglichen Klimaveränderung auf den Königssee viel Raum einnehmen und diesbezüglich zusammenhängende, umfassende theoretische Erläuterungen kaum zu finden sind, fallen die Ausführungen zum Forschungsstand und theoretischen Hintergrund ausführlicher aus. Eine Zusammenschau der aktuellen einschlägigen Literatur soll in Kap. 3.1 gegeben werden. Kap. 3.2 erläutert Quellen und Dynamik von Nährstoffen in quasi-natürlichen Systemen. Diese Zusammenhänge sind relevant, um die dargestellten Beobachtungen aus Kap. 5.5 einordnen zu können. Die für die Problematik dieser Untersuchung relevanten Erforschungen im UG sind in Kapitel 3.3 erwähnt.

Da in diese Studie auch Global Change mit seinen Auswirkungen Thema ist, sollen vorweg dazu noch einige Bemerkungen gemacht werden. Seit es die ersten Anzeichen eines Globalen Wandels gibt, vermehrt sich auch rapide die Anzahl der Publikationen zu diesem Thema. Neben den vielen spezifischen Einzelartikeln, deren Nennung an gegebener Stelle erfolgt, sind einerseits viele Veröffentlichungen allgemeiner Art über Beobachtungen, Nachweise aber auch Handlungsempfehlungen zum Global Change (z. B. IPCC 2001; STRZEPEK 1995; COENEN 2001; DIKAU et al. 1998) erfolgt, andererseits gibt es aber viel Spezialliteratur, die sich mit den Folgen des Global Change für hydrologische Ressourcen befasst (z. B. WHEATER 1998; KLIWA 2001). Gleichmaßen sind zur Untersuchung von Klimaveränderungen mit regionalem Schwerpunkt (MAURER et al. 1994; BAYFORKLIM 1995) oder gar eine Aufsatzsammlung zum Thema des Global Change in Schutzgebieten publiziert (VISCONTI 2001). An derzeit laufenden Großprojekten wie beispielsweise GLOWA-DANUBE (MAUSER et al. 2002), welches sich mit dem Wandel des globalen Wasserkreislaufes und dessen Auswirkungen beschäftigt, zeigt sich die fortwährende Bedeutung dieses Themas.

### **3.1 Zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf aquatische Systeme**

Unter Berücksichtigung der Aussage von HUPFER (1998), dass sich die deutlichsten Signale auf Klimaveränderungen in Gewässersystemen der Hochgebirgsregionen auswirken, ist zuvor zu klären, wie die Einflussfaktoren dieser Veränderungen zu beschreiben sind, und wie deren theoretische Wirkungszusammenhänge liegen.

Bei der Bestimmung des Wärmehaushaltes von Seen ist in erster Linie die Strahlungsbilanz für einen See aufzustellen. Sie kann mit der Formel in Abbildung 14 (gelbes Kästchen) ausgedrückt werden. Vor allem die Elemente  $I(G)$ ,  $D(G)$ ,  $LG(EA)$ ,  $LA(EA)$ ,  $R$ ,  $d$  und  $L$  sind für den Wärmehaushalt in einem See maßgebend. Weitere Einflussfaktoren, wie etwa Bewegungsenergiegewinne, Niederschlag auf der Seeoberfläche etc. sind von eher untergeordneter Bedeutung. Ausführlich sind diese Einflussfaktoren bei MICHLER (1974) beschrieben.

Der primäre Energielieferant ist demnach die Sonneneinstrahlung  $I(G)$ ,  $D(G)$  und  $LG(EA)$ . Wenn diese Strahlung die Wasseroberfläche erreicht, werden im Durchschnitt 30% an der Wasseroberfläche durch Spiegelung oder durch Partikel im Gewässers reflektiert ( $R$ ,  $d$ ). Somit gelangen im Mittel 70% der Strahlung in den Wasserkörper, wovon der nahezu gesamte Anteil durch Absorption in Wärme umgewandelt wird. Durch konvektive Wärmeleitung zurück zur Oberfläche und durch Verdunstung kann dieser Wärmezugewinn wieder geschmälert werden ( $L$  oder  $E$ ).

Die von der Sonne ausgehende Strahlung setzt sich bekanntlich aus verschiedenen Wellenlängen zusammen. Von diesen Wellenlängen ist wiederum die Strahlungsex-tinktion im Wasser abhängig. Hinzu kommt, dass Wasser von unterschiedlicher Reinheit bzw. Färbung entsprechend verschiedene Transmissionseigenschaften besitzt. Eine Möglichkeit, diese Verschiedenheit zum Ausdruck zu bringen, besteht durch die Angabe der relativen spektralen Transmission in Bezug auf verschiedene Wässer. Ausführlich ist dies in SIEBECK (1982) unter Berücksichtigung der spezifischen Gegebenheiten des Königssees dargestellt.

Auf Grund der geringen Eindringtiefe von Lichtstrahlen erwärmen sich direkt durch Absorption lediglich die oberen Schichten des Wasserkörpers. Die Erwärmung der unteren Schichten eines Sees geschieht in geringen Umfang über Konvektionsströmung und vor allem infolge windbedingter Durchmischung des Wasserkörpers. Das Durchmischungsverhalten eines Sees ist demnach abhängig vom Einfluss der Wind-

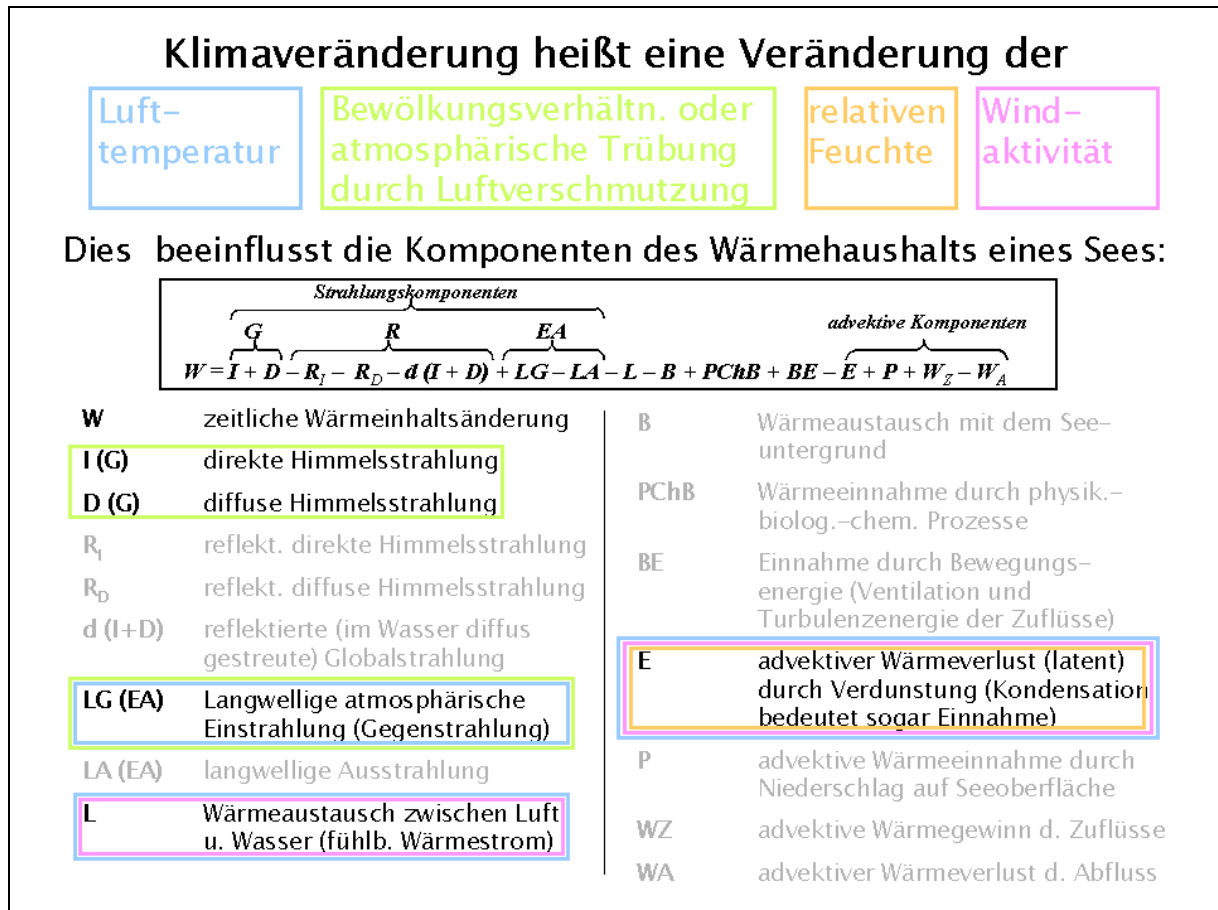


energie. In Bezug zur geographischen Lage und dem klimatischen Geschehen kann dies folglich in jedem Jahr ganz unterschiedlich sein. Daher kann man Seen in Abhängigkeit von ihrem Durchmischungsverhalten in verschiedene Klassen einteilen. Diese Einteilung geht auf FOREL (1892) zurück, ist aber auch in den Standardwerken zur Limnologie zu finden (HUTCHINSON 1957; WETZEL, 2001).

Entsprechend der oben genannten Einflussfaktoren für den Wärmehaushalt von Seen ist die Frage zu erläutern, wie sich eine Veränderung von klimatischen Randparametern auf den Wärmehalt eines Sees auswirken kann. Abbildung 14 verdeutlicht die Zusammenhänge: Vier der oben genannten wesentlichen Einflussfaktoren für den Wärmehaushalt eines Sees hängen mit dem Witterungsgeschehen zusammen, welches im Falle eines Klimawandels entsprechenden Veränderungen unterliegt. Dies ist Lufttemperatur, Bewölkungsverhältnisse bzw. atmosphärische Trübung, relative Feuchte sowie Windaktivität (vgl. EDINGER et al. 1968; LIVINGSTONE 2003).

Eine Kausalität zwischen der Seeoberflächentemperatur und der regionalen Lufttemperatur ist naheliegend. Ansätze zur Quantifizierung dieses Zusammenhanges sind u. a. in EDINGER et al. (1968) oder LIVINGSTONE (2001) aufgezeigt. Insbesondere zur Auswirkung der lokalen Lufttemperatur auf das Temperaturverhalten von großen Wasserkörpern liegen zahlreiche Untersuchungen vor (z. B. MC COMBIE 1959; SHUTER et al. 1983; MAURER 1994; HOLLAN 2001). Eine Beziehung zwischen der Sommertemperaturvariabilität der Luft und der Oberflächentemperatur von Seen mit der absoluten Höhe über dem Meeresspiegel ist in LIVINGSTONE (1999) aufgeführt. Die Gründe für die Temperaturerhöhung können vielfältig sein, und seit den ersten gesicherten Erkenntnissen für eine Klimaveränderung wird auch nach deren Ursachen und Zusammenhängen geforscht.

Dies auszuführen, ist nicht Thema dieser Arbeit; im IPCC-Bericht (IPCC 2001) sind Hinweise auf weiterführende Literatur zu finden. Allerdings sei hier darauf hingewiesen, dass nach neueren Erkenntnissen die NAO (North Atlantic Oscillation), welche nachweislich einen Einfluss auf das winterliche Klimageschehen im europäischen Raum hat, der Schlüssel für die Erklärung der Ausprägung verschiedener Klimaphänomene sein könnte (HURRELL et al. 2003).



**Abbildung 14: Beeinflussung der Komponenten des Wärmehaushaltes eines Sees durch Klimaveränderung**

(Quelle: eigene Zusammenstellung aus MICHLER 1974 und LIVINGSTONE 2003)

Die Aufzeichnung über Eisbedeckungen von Seen in der Vergangenheit erlaubt es, zumindest Aussagen über die winterlichen Wassertemperaturverhältnisse zu geben (HUPFER 1998; LIVINGSTONE 1999; OHLENDORF et al. 2000). Die Untersuchung von Veränderungen der Eisdeckenbildung auf Seen im Zusammenhang mit Klimaveränderungen soll in dieser Arbeit aber nicht weiter ausgeführt werden. Die oben genannte Literatur zu dieser Thematik bietet weiterführende Hinweise.

Da die Temperatur eine wesentliche Einflussgröße für physikalische, chemische und biologische Prozesse in einem Gewässer ist, sollte ein besonderes Augenmerk auf deren Verhalten gelegt werden. Schon geringfügige Temperaturveränderungen können zu merklichen Folgen führen, da die Temperatur auf alle chemischen Prozesse im Sinne des Vant' Hoff' schen Gesetzes wirkt. Ein Gewässer spiegelt gewissermaßen die verschiedenen Einflüsse des Einzugsgebietes und auch der regionalen Klimabedingungen wider.

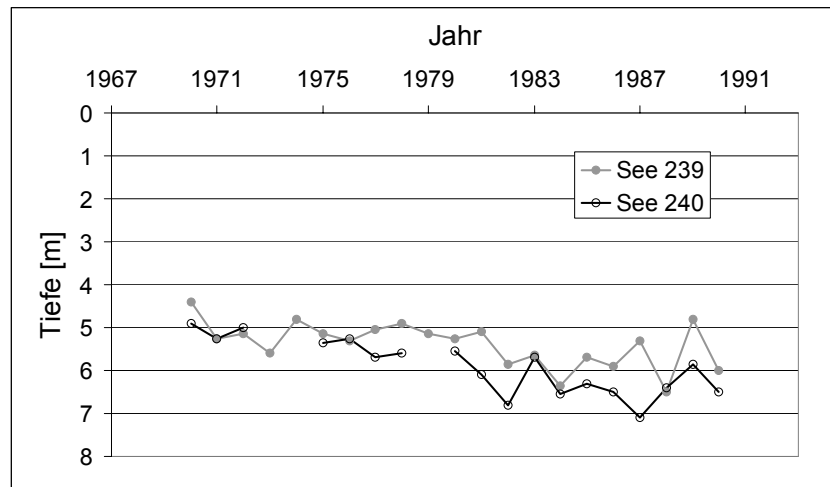
Untersuchungen von Auswirkungen eines Global Change durch veränderte Strahlungsbedingungen und erhöhten Wärmeenergieinput haben zunehmend Interesse in der limnologischen Forschung gefunden. Sowohl Zusammenhänge als auch Dimensionen zwischen Umweltveränderungen und Reaktionen von aquatischen Systemen lassen sich über die Auswertung historischer Quellen bzw. Untersuchungen von Seesedimenten aufzeigen (z. B. BIRKS und BIRKS 1980, SMOL 1990; SMOL et al. 1991; MICHLER 1982).

Eine andere Herangehensweise ist, die Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Binnengewässer über numerische Modellierungsansätze zu erforschen (HONDZO und STEFAN 1993; STEFAN und FANG 1998; GERTEN und ADRIAN 2001; GÜSS et al. 1998; SCHLENKENHOFF 1996; ROBERTSON und RAGOTZKIE 1990). Der Versuch, die im LAKE-Projekt festgestellten Beobachtungen in verschiedene Modellierungskonzepte einzubauen ist von FISCHER (2002) vorgenommen worden. Auf Grund des enormen Aufwandes konnte die Umsetzung bislang jedoch nicht realisiert werden, ist aber zu einem späteren Zeitpunkt angedacht (vgl. Kap. 5.9).

Nach den Modellrechnungen von HONDZO und STEFAN (1993) ergäben sich bei weiterhin steigender CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre infolge des Anstieges der mittleren Lufttemperatur folgende Konsequenzen für dimiktische Seen im nördlich-zentralen Bereich Nordamerikas: Das Epilimnion würde sich erwärmen, allerdings um einen geringeren Betrag als die Lufttemperatur, die Hypolimniontemperatur bliebe gleich oder wäre gar niedriger. Die Ausbildung der Schichtung würde früher einsetzen und würde später aufgelöst, der Stabilitätswert wäre im Sommer und Frühling höher als gegenwärtig.

Diese Modellierungsergebnisse decken sich mit den tatsächlichen Beobachtungen, wie beispielsweise in der Experimental Lake Area (ELA) in Kanada dargestellt wurde. 1990 hatten bereits SCHINDLER et al. (1990, ausführlicher in SCHINDLER et al. 1996) in Ergebnissen aus der ELA aufgezeigt, dass in kleineren Seen (z. B. der See Nr.239 aus dieser Untersuchung mit einer Größe von 54,28ha, mittlerer Tiefe von 10,9m und max. Tiefe von 30,4m) die Wassertemperatur in 18 Jahren um 2K gestiegen ist, gleichermaßen wie die Lufttemperatur dieser Region. Gesteigerte Windintensität und bessere Transmissionseigenschaften des Seewassers haben die Thermokline nach unten verlagert (Abbildung 15). Die Sulfatkonzentrationen im Gewässer sind angestiegen. Der Wassertemperaturanstieg hat darüber hinaus zur Folge, dass

einige Arten mit enger Temperaturschwankungstoleranz im Gewässer ausgestorben sind.



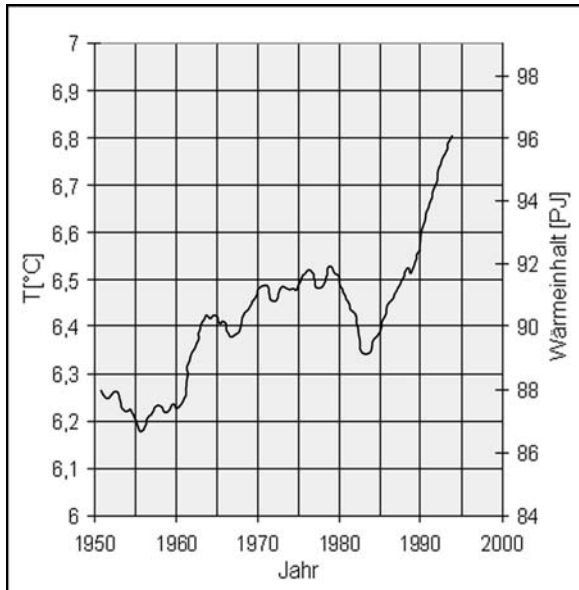
**Abbildung 15: Beobachtete Verlagerung der Thermokline bei kanadischen Seen**

(Datenquelle: SCHINDLER et al. 1990, verändert)

Ähnliche Temperaturerhöhungen von Seewasser wurden im mitteleuropäischen Raum (HOLLAN 2001; LIVINGSTONE 2003), in Norditalien (AMBROSETTI und BARBANTI 1999) oder in Zentralspanien (GRANADOS und TORO 2000) festgestellt. LIVINGSTONE (2003) hat für den Zürichsee bei der Auswertung von monatlichen Temperaturmessungen im Profil (136m) aufgezeigt, dass sich beim Vergleich der verschiedenen auf Dekaden gemittelten Einzelwerte im Zeitraum zwischen 1947-1998 in den obersten 20m des Sees ein Anstieg von ungefähr 0,24K pro Dekade, unterhalb von 20m immerhin noch eine Erhöhung von ca. 0,13K pro Dekade ergab. Diese Temperaturveränderungen haben unterschiedliche Auswirkungen. Eine unmittelbare Folge ist die Beeinflussung der Schichtungsverhältnisse im See. Die thermische Stabilität stieg um 20% und die sommerliche Stagnationsphase hat sich um zwei bis drei Wochen verlängert (Abbildung 16, Abbildung 18 und Abbildung 19).

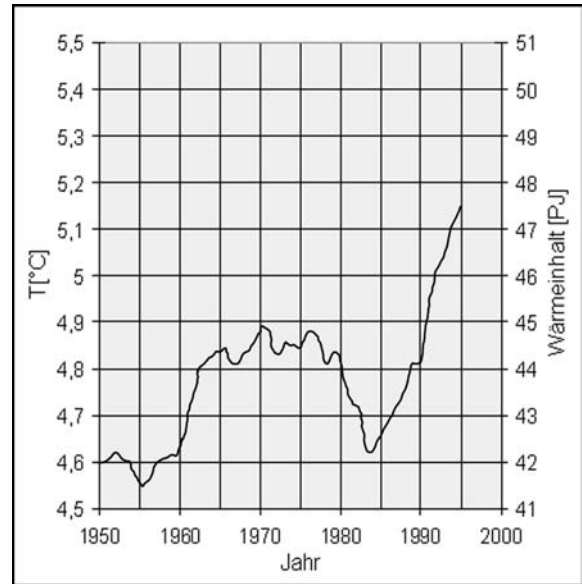
Eine Steigerung der Wassertemperatur in Seen muss in der Konsequenz auch zur Erhöhung des Wärmeinhalts (SCHINDLER et al. 1990) führen. Dies vor allem durch die Anhebung der Epilimniontemperatur, aber auch durch die Zunahme des hypolimnischen Temperaturwertes (AMBROSETTI und BARBANTI 1999 oder LIVINGSTONE 2003; siehe auch Abbildung 17).

### 3 Theoretische Grundlagen und Forschungsstand



**Abbildung 16: Wärmeinhaltsveränderung des Zürichsees**

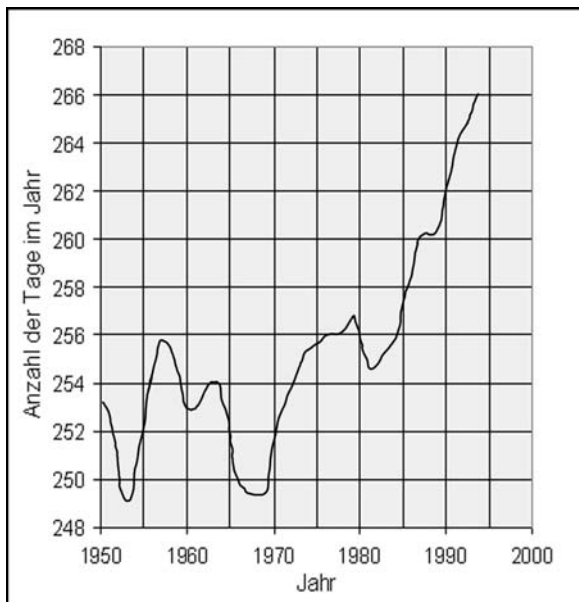
(Quelle: LIVINGSTONE 2003, verändert)



**Abbildung 17: Anstieg der hypolimnischen Temperatur im Zürichsee**

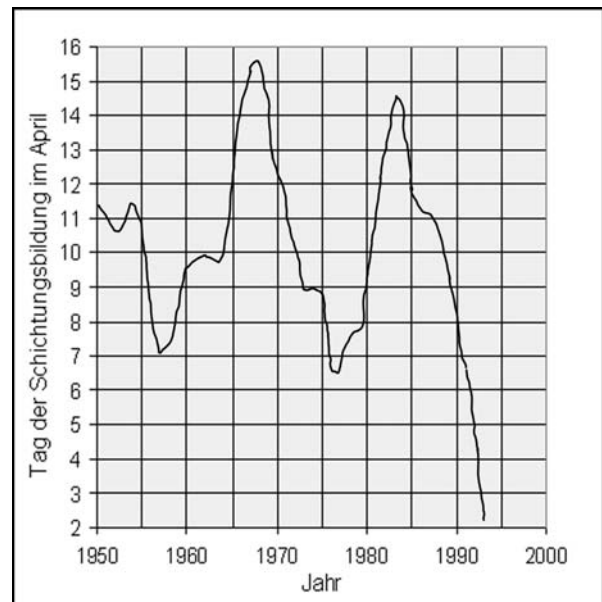
(Quelle: LIVINGSTONE 2003, verändert)

Auch SCHINDLER et al. (1996), LIVINGSTONE et al. (1996) und LIVINGSTONE (1997) zeigen Veränderungen in der Länge des Schichtungszeitraumes von Seen sowie des Beginns und der Auflösung der Schichtung auf.



**Abbildung 18: Länge der Stagnationsphasen im Zürichsee**

(Quelle: LIVINGSTONE 2003, verändert)



**Abbildung 19: Apriltag der Schichtungsbildung im Zürichsee**

(Quelle: LIVINGSTONE 2003, verändert)

In Hinblick auf die Veränderung der Wassertemperatur in unseren Gewässern und deren Folgen betrachtet HUPFER (1998) Seen, die in wärmeren Klimaten liegen. Er

will Schlussfolgerungen auf unsere künftigen Verhältnisse ziehen, falls es zu einer Verschiebung in der von FOREL (1892) aufgestellten Klassifizierung von Seen hinsichtlich Ihres Durchmischungsverhaltens in Abhängigkeit von klimatischen Randparametern käme. Auch GELLER (1992) stellt dar, dass und wie sich die Oberflächentemperaturen von Seen mit dem Breitengrad korrelieren lassen.

Im Zusammenhang mit festgestellten Veränderungen im Sauerstoffhaushalt von Seen (LIVINGSTONE 1993, 1997) ist zu erwarten, dass sich diese auch in irgendeiner Form auf die biotischen Verhältnisse in Seen auswirken müssten. ADRIAN et al. (1995) geben Hinweise auf solche Veränderungen für eutrophe Seen.

Ausmaß und Dauer der Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser ist nach HUPFER (1998) die Folge von temperaturbedingten, erhöhten Sedimentationsraten auf Grund der gesteigerten Primärproduktion durch Respirations- und Abbauvorgänge organischer Substanz.

In eutrophen Gewässern sind die Zusammenhänge komplexer und mit mehr Besorgnis zu betrachten (vgl. HUPFER 1998). Da jedoch der Königssee zu den oligotrophen Gewässern gehört, soll dieser Zusammenhang an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden.

Ist es in der Vergangenheit gelungen, Messungen von Auswirkungen in Binnenseen unter extremen Klimaverhältnissen durchzuführen, lassen sich u. U. Abschätzungen über das besondere Verhalten von Gewässern unter heutigen Sonderverhältnissen machen. Beispielsweise haben HOLLAN (2001) und LIVINGSTONE (1997) für große Wasserkörper nachgewiesen, dass einschneidende Kältephasen noch zu späteren Zeitpunkten im Temperaturverhalten des Hypolimnions nachweisbar sind. Die tieferen Schichten eines Sees haben gewissermaßen ein „klimageschichtliches Gedächtnis“. Nicht für längere Zeiträume, wie dies Gletschereis oder Seesedimente vermögen, sondern eher für kürzere Zeiträume von einigen Monaten bis wenigen Jahren. Wenn es in einem See nicht zu einer Vollzirkulation kommt, dann werden die Verhältnisse zur letzten Vollzirkulation sozusagen im Parameter Temperatur „abgespeichert“ (vgl. LIVINGSTONE 1993; AMBROSETTI und BARBANTI 1999). Dies ist vor allem für den Königssee von Bedeutung, da dieser nicht immer eine Vollzirkulation erreicht. LIVINGSTONE (1997) und HOLLAN (2001) beschreiben in diesem Zusammenhang auch, dass die unteren Schichten tiefer Seen besondere Verhältnisse aufweisen. Sauerstoffgehalt und Temperatur lassen sich dort durch „sägezahnartige“ Kurven darstellen, ein Phänomen was sich darin begründet, dass ein Eintrag von

kälterem Oberflächenwasser in das Hypolimnion zu den Zirkulationszeiten in der Regel auch eine Verlagerung von Sauerstoff in die Tiefe mit sich bringt. In der Folge geht demnach in den Bereichen, die von der Zirkulation betroffen sind, eine abrupte Temperaturenniedrigung mit einer Erhöhung des Sauerstoffgehaltes einher. Bei der Darstellung dieser beiden Parameter über mehrere Jahre in einem Diagramm, ergibt sich eben dieser „sägezahnartige“ Verlauf.

Die Postulierung des Zusammenhanges zwischen globaler Erwärmung und Veränderungen in der Temperaturdynamik von Binnengewässern wird auch kritisch gesehen. HUPFER (1998) führt an, dass die Effekte globaler Erwärmung zu gering und deshalb bisher nicht von saisonalen und anthropogenen Schwankungen zu unterscheiden sind.

Es ist davon auszugehen, dass sich Global Change auch in irgendeiner Form auf Fließgewässer auswirkt (z. B. SCHINDLER et al. 1996). Im Rahmen der vorliegenden Ausführungen sollen in erster Linie die Auswirkungen auf stehende Gewässer angesprochen werden, weil Fließgewässer im UG diesbezüglich nur randlich betrachtet wurden. Da allerdings Fließgewässer meist in stehende Gewässer münden und ohnehin schwer getrennt vom gesamten aquatischen System behandelt werden können, sei hier noch auf folgende Zusammenhänge hingewiesen: Einerseits ist mit einer Veränderung der Wasserführung vor allem im Jahresverlauf zu rechnen (LIEBSCHER 1996). Dies wirkt sich folglich auch auf den Transport von Schweb- und Nährstoffen aus. Aus den Untersuchungen von SCHMIDT und FRÜHAUF (2000 und 2002) lässt sich erahnen, welche Eintragsraten an Nitrat sich bei zusätzlich verstärkter Abtragung beispielsweise im Zusammenhang mit einem Hochwasserereignis im Vergleich zu durchschnittlichen Abflussverhältnissen ergeben (vgl. hierzu auch LIENER 2000). Dies ist gerade bei der im UG spärlich ausgeprägten Vegetation und den flachgründigen Bodenverhältnissen zu berücksichtigen. Nach HUPFER (1998) ist bei Niedrigwasser in Fließgewässern eine Belastung des Sauerstoffhaushaltes zu erwarten, da die Konzentrierung und Ablagerung sauerstoffzehrender Substanzen zunimmt, der mikrobielle Abbau bei erhöhter Temperatur verstärkt wird und die Durchmischungsfähigkeit sowie der Eintrag von Sauerstoff bei erhöhter Temperatur abnimmt.

Überhaupt ist dem Sauerstoff als Indikator hinsichtlich der Veränderung in limnischen Systemen bezüglich ihres ökologischen Zustandes besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Die Bedeutung dieses Parameters für die Beurteilung des Trophiegrades

von Seen ist in der Vergangenheit immer wieder herausgearbeitet worden (MICHLER 1987; GROTE 1934; FINDENEGG 1936). Die Verwendung dieser Größe hat allerdings bei der vorliegenden Studie im Ergebnisteil zur ökologischen Bewertung nur untergeordnete Bedeutung, da die gegenwärtigen Sauerstoffverhältnisse im Untersuchungsobjekt Königssee keine negative Entwicklung befürchten lassen. Die Auswertung der Sauerstoffmessungen wurden hauptsächlich verwendet, um Aussagen zu einer möglichen klimabedingten Veränderung im Zirkulationsverhalten des Königssees zu treffen, welche allein aus der Temperaturverteilung nicht zulässig wären. Nach HUPFER (1998) nehmen Sulfat- und Stickstoffverluste bei zunehmender Erwärmung von Gewässern zu. Die Denitrifikation führt zu verstärkter Abgabe von  $N_2$  an die Atmosphäre.

### ***3.2 Nährstoffdynamik und Nährstoffquellen in quasi-natürlichen Einzugsgebieten***

Auf Grund der Restriktionen, die sich durch den Nationalparkstatus des Untersuchungsgebietes ergeben, hat die Landwirtschaft für den direkten Eintrag von Nährstoffen ins EZG des Königssees einen geringen Stellenwert. Lediglich almwirtschaftliche Auswirkungen (vgl. Kap. 2.8.2) können hier als Quelle angesehen werden. WEIGAND et al. (2002) haben in diesem Zusammenhang allerdings gezeigt, inwiefern almwirtschaftliche Tätigkeit einen spürbaren Einfluss auf das Gewässer haben kann. Es wurde festgestellt, dass entgegen den Hintergrundmesswerten (aus Gebieten möglichst geringer anthropogener Beeinflussung) des Nationalparks Hohe Tauern/Österreich von 4,4 und 5,4mg/l Nitrat in untersuchten Fließgewässern die Messwerte in almwirtschaftlich beeinflussten Gebieten (6,4 und 8,0mg/l Nitrat) entsprechend höher liegen. Ob und in welcher Form dies auch für den Nationalpark Berchtesgaden zutrifft, wird in Kap. 5 behandelt.

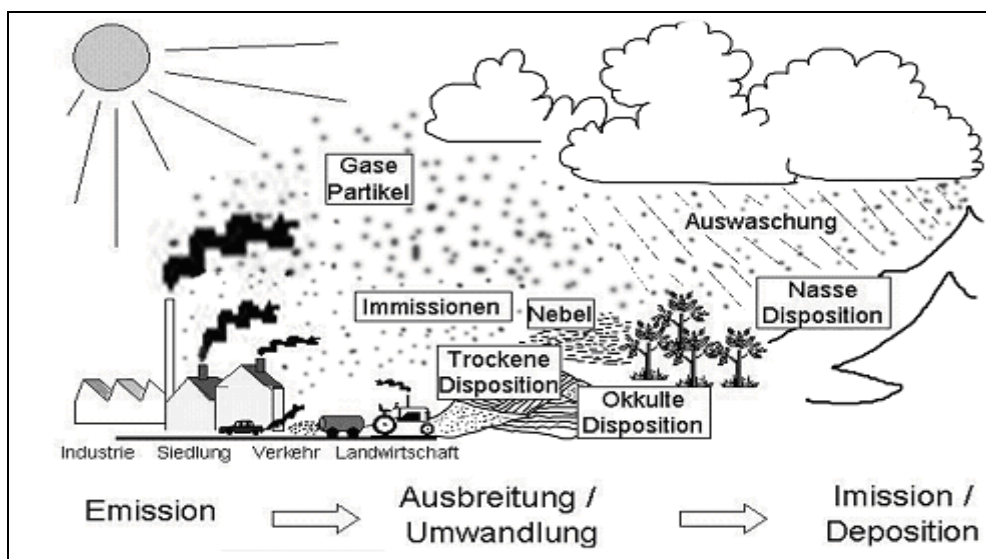
Neben almwirtschaftlichen Quellen sind auch anthropogene Quellen nicht auszuschließen, da ein Teil der touristischen Einrichtungen im Nationalpark nur über Kleinkläranlagen verfügen. Da dieser Einfluss aber außerordentlich schwer zu erfassen und zu quantifizieren ist, konnte er im Rahmen dieser Studie nur am Rande betrachtet werden. Daher erübrigen sich an dieser Stelle weitere theoretische Ausführungen.



Ein weiterer Nährstoffinput ins EZG ist überregional über die Atmosphäre zu erwarten. Abbildung 20 verdeutlicht, welchen Einfluss Schadstoffe in einem natürlichen oder quasi-natürlichen Ökosystem haben können. Ähnliche Verhältnisse sind im Nationalpark und seinem Vorfeld zu vermuten, vor allem unter Berücksichtigung der besonderen atmosphärischen Strömungsverhältnisse, wie sie in Kap. 2.4 erwähnt wurden.

Bei Betrachtung des Stickstoffkreislaufes in Abbildung 21 wird der Einfluss auf den Nitratgehalt durch Nitrifikation oder durch die aus der Atmosphäre eingebrachten Stickoxide deutlich.

STAHR (1998) führt die Pufferwirkung von Böden im Zusammenhang mit dem Stickstoffhaushalt im Naturhaushalt aus. Der Stickstoffhaushalt steht in deutlichem Zusammenhang mit dem Humushaushalt des Bodens. Allerdings ist zu bedenken, dass Stickstoff, im Vergleich zu Kohlenstoff, leichter dazu neigt, in den gasförmigen Zustand überzugehen. Darüber hinaus sind Ammonium und Nitrat in Wasser löslich, was beim Kohlenstoff lediglich für die Kohlensäure zutrifft. Die Besonderheit des Stickstoffes liegt in der Entstehung von Ammonium und später Nitrat, falls es zur Mineralisierung von organischer Substanz kommt. Diese Ionen können von Mikroorganismen und Pflanzen direkt aus dem Boden aufgenommen werden, und verbleiben so im Kreislauf an Ort und Stelle.



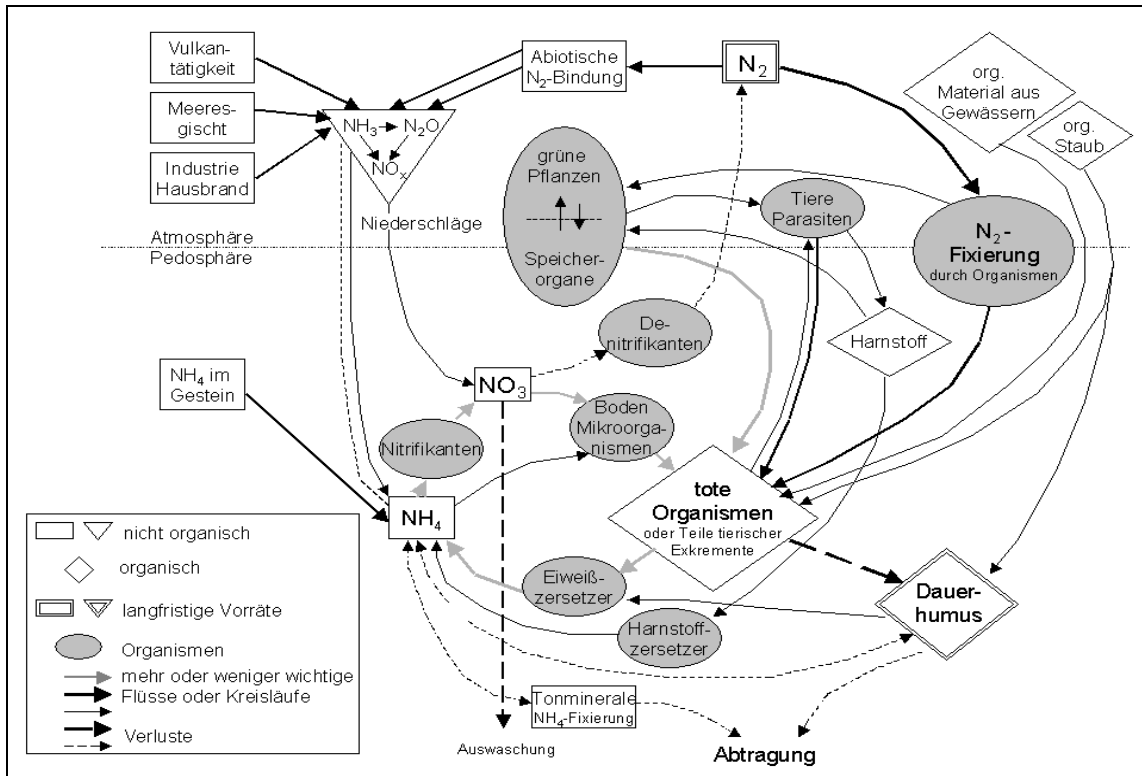
**Abbildung 20: Schadstoffeintrag in die Landschaft**

(Quelle: WANNER et al. 1998, verändert)

Anders ist dies beim Kohlenstoff, die gasförmige Variante  $\text{CO}_2$  kann entweichen. Eine Konsequenz ist, dass während des Abbaus organischer Substanz im Kreislauf

### 3 Theoretische Grundlagen und Forschungsstand

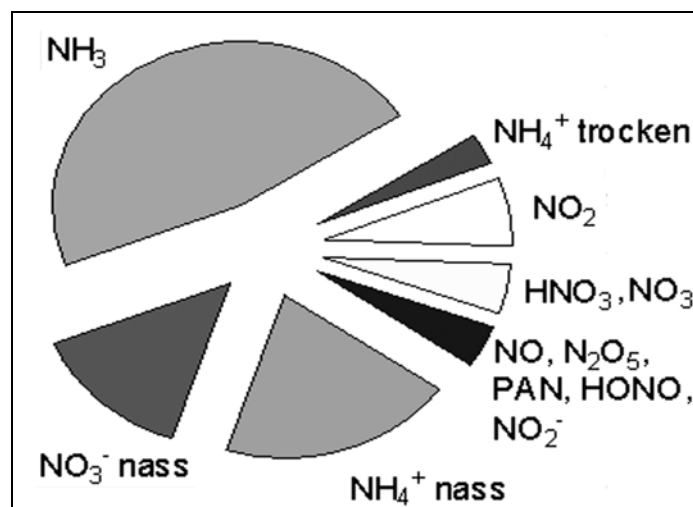
eine Verarmung an Kohlenstoff, hingegen eine permanente Anreicherung an Stickstoff stattfindet. Dies ist nur bis zu einem Grenzwert möglich, jenseits diesen Wertes kann der freigesetzte Stickstoff nicht mehr verwertet werden und verlässt dann als Gas oder als Auswaschung den Boden.



**Abbildung 21: Stickstoffkreislauf**

(Quelle: FINKE 1994, verändert)

Wie sich die Aufteilung des Stickstoffs über atmosphärischen Eintrag in naturnahe Systemen ergibt, ist in Abbildung 22 dargestellt.



**Abbildung 22: Stickstoffeintrag aus der Luft in naturnahe Ökosysteme**

(am Beispiel des zentralen Schweizer Mittellandes. Quelle: EUGSTER 1994, verändert)

### **3.3 Forschungsstand im Untersuchungsgebiet**

Die Forschungsaktivität im UG war und ist hoch. Als Zeitmarke für den vermutlichen Beginn von wissenschaftlich-geographischer Erforschung in diesem Raum lassen sich die Abhandlungen von ALEXANDER VON HUMBOLDT (1814-1825, zitiert aus BARTHELMESS 1997) verwenden. Den Altmeister der Geographie lockte damals schon die Besonderheit des Königssees und erstaunlicherweise hatte HUMBOLDT auch schon Temperaturwerte vom Königssee gesammelt. Seine Messungen liefern die ältesten bekannten Temperaturwerte.

Einer Vielzahl von Einzelstudien ist es zu verdanken, dass Erkenntnisse zur Naturraumcharakteristik und Nutzungsgeschichte dieser Region detailliert vorliegen. Generell ist aber anzumerken, dass die Forschung im Nationalpark Berchtesgaden z. T. sehr speziellen, abgegrenzten Themen und Teiluntersuchungsräumen, bzw. tier- oder pflanzenartenspezifischen Fragestellungen folgt. Integrative, ökosystemübergreifende Forschung ist eher selten anzutreffen, obgleich dies das besondere Eignung dieses Untersuchungsgebietes dafür benannt wurde (SIEBECK und TRAUNSPURGER 1994).

Die für die in der Zielstellung dieser Studie besonders bedeutenden hydrologisch-limnologischen Erforschungen der Vergangenheit sollen im folgenden aufgeführt werden.

Neben den Temperaturmessungen von HUMBOLDT im April 1798 fanden vereinzelt zur Mitte und gegen Ende des 19. Jahrhunderts Temperaturmessungen statt (BARTHELMESS 1997). Von 1947-1949 hat SCHINDLER (1950) am Königssee Temperaturmessungen durchgeführt. Diese Publikation hat ihren Schwerpunkt in den biologischen Verhältnissen im Königssee. Es liegen einzelne Messwerte aus dieser Veröffentlichung vor, die hohe Wassertemperaturen zeigen. Bedauerlicherweise sind diese Werte schwer in Beziehung zu anderen Untersuchungen zu setzen: Es geht aus der Veröffentlichung nicht hervor, ob es sich um Einzelmessungen handelt und zu welcher Tageszeit diese durchgeführt wurden.

Meter	30. V. 47	4. VII. 47	13. VIII. 47	28. IX. 47	2. IX. 48	8. IX. 48	5. XI. 49
0	17.2°	22.4°	18.6°	16.1°	15.9°	14.4°	8.4°
3	15.7°		18.3°		13.37°	14.3°	8.2°
5	12.4°	14.6°	12.1°	15.3°	9.3°	10.4°	8.2°
10	7.7°	8.9°	7.9°	9.1°	6.8°	6.9°	8.1°
15	6.2°		6.2°	6.3°			8.0°
20	5.3°	5.1°	5.3°	5.3°	5.4°		7.3°
30			4.6°				4.7°
40	4.5°	4.5°	4.4°				
50	4.5°		4.4°	4.55°		4.43°	
185						5.1°	

**Tabelle 5: Wassertemperaturen des Königssees zur Mitte des 20. Jahrhunderts**

(Datenquelle: SCHINDLER 1950, verändert)

Zweifelsohne ist der Beitrag zur Erforschung des Sees durch die Arbeitsgruppe Königssee der Abteilung Limnologie des Zoologischen Institutes der Universität München besonders hervorzuheben. Über den Zeitraum von 1978-1980 ist durch über 90 Tiefenprofilmessungen verschiedener Termine eine Datenbasis entstanden (ARBEITSGRUPPE LIMNOLOGIE DER ABTEILUNG ZOOLOGIE DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 1978, 1979, 1980; MÜLLER 1981 und SIEBECK 1982), welche für das LAKE-Projekt eine wertvolle Vergleichsmöglichkeit darstellt. Auch wenn seinerzeit die Zielsetzung eher biologisch ausgerichtet war, ergeben sich aus den Untersuchungen wichtige Hinweise auf die abiotischen Verhältnisse in diesem Zeitraum.

Von April bis Dezember 1992 wurde der Königssee von BARTHELMESS (1997) genauer untersucht. Obwohl hier der Schwerpunkt auf der Erforschung der saisonalen Planktonsuccession lag, bieten die Untersuchungen dennoch einige sehr brauchbare Vergleichsdaten für das LAKE-Vorhaben. Allerdings ist zu beachten, dass zur Ermittlung der Stabilitätsparameter (Schmidtstabilität oder relativer thermischer Widerstand, vgl. Kap. 4.7) in der genannten Arbeit verschiedene Messsysteme verwendet wurden. Außerdem wurde im Tiefenprofil zum Teil nicht in engen Vertikalabständen gemessen; zeitweise nur alle vier Meter.

Darüber hinaus hat es durch die technische Gewässeraufsicht der Wasserwirtschaftsämter verschiedene Untersuchungen des Königssees gegeben. Von 1993 bis

1996 und im Jahr 2000 wurde der Königssee im Rahmen des Standardmessprogramms mituntersucht. Es wurden dabei jedoch in der Regel nur sechs Profile pro Jahr gemessen.

SPIEGEL-SCHMIDT (1988) macht weitere Angaben zur Erforschung des Königsseegebietes.

An den Fließgewässern im Einzugsgebiet des Königssees hat es bislang noch keine längerfristig angelegte Untersuchungsreihe hinsichtlich der Wasserqualität oder des Stofftransportes gegeben. Lediglich von SEITZ (1979) liegen Einzeldaten vor.

Das derzeit laufende Forschungsvorhaben CARBOMONT (CARBOMONT 2003) untersucht u. a. den Eintrag von Stickstoff- und Kohlenstoff in natürliche Gebirgsökosysteme am Beispiel des Nationalparks Berchtesgaden.

Eine größer angelegte Erforschung ist im Nationalpark Berchtesgaden und sein Vorfeld vor allem innerhalb des „MAB-Projekt“ gelaufen. Im Rahmen des MAB 6 (Teilvorhaben des „Man and Biosphere“-Projektes der UNESCO) war die Zielstellung, Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf den Hochgebirgsbereich zu untersuchen (FRANZ 1985; MESSERLI und MESSERLI 1979). Obgleich es vielfältige Arbeitsbereiche in diesem über zehn Jahre gelaufenen Projekt gab (z. B. DEUTSCHES MAB-NATIONALKOMITEE 1983, 1984; D'OLEIRE-OLTMANN 1984; HABER et al. 1989), ist der Königssee und sein Einzugsgebiet kaum integrativ landschaftsökologisch betrachtet worden, wie es im Rahmen der vorliegenden Studie beabsichtigt ist.

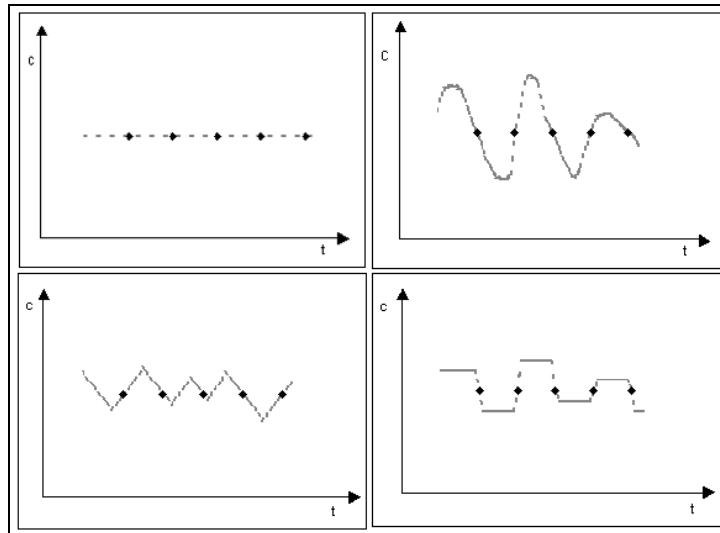
## 4 Methodik

### 4.1 Landschaftsökologischer Methodikansatz

Ganz im Sinne der vier Kernmerkmale der Landschaftsökologie (MOSIMANN 1998) ist der Ansatz dieser Studie *verknüpfend* (1.), da diese Arbeit versucht, die Aspekte des Stoff-, Energie- und Wasserhaushaltes mit Charakteristik und Verhalten des Einzugsgebietes und des Seewasserkörpers zu verbinden. Sie *beschäftigt sich mit Landschaftsräumen* (2.), denn die Untersuchung bezieht sich auf einen Ausschnitt der Erdoberfläche, bei dem die verschiedenen Kompartimente des Landschaftshaushaltes betrachtet werden müssen. Die Studie ist *anwendungsorientiert* (3.), d.h. die gewonnenen Erkenntnisse können für die Nationalparkverwaltung oder das Wasserwirtschaftsamt in eventuelle Handlungsstrategien oder Managementkonzeptionen auf Grund gesetzlicher Vorgaben eingehen. Letztlich hat diese Studie eine *sozioökonomische Komponente* (4.), da die beobachteten Phänomene im Naturhaushalt in Beziehung zur Nutzung durch den Menschen im Untersuchungsgebiet gesetzt werden.

Der landschaftsökologische Methodikansatz zeigt sich bereits in der Wahl des Untersuchungsgebietes. Es wurde ein Seeinzugsgebiet ausgesucht, um Stoff- und Energieflüsse im Landschaftshaushalt zu erkunden. Ein solches Umweltsystem ist relativ gut abgrenzbar, und der See fungiert in stofflicher und energetischer Hinsicht als integrierendes Merkmal des umliegenden größeren Einzugsgebietes.

Untersuchungen komplexer Systeme mit hoher zeitlicher und räumlicher Veränderlichkeit erfordern die Erfassung diverser Parameter mit enger Messfrequenz. SCHMIDT (1999) stellt dar, welches methodische Problem sich aus diesem Anspruch ergibt (Abbildung 23): Lediglich zum Zeitpunkt der Messung kann in einem System welches zeitlichen Veränderungen unterliegt, eine Aussage über den tatsächlichen Wert eines Parameters getroffen werden. Wie sich der Parameter zwischen zwei Messungen verhält, wird nicht erfasst. Umso höher die Messfrequenz ist, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass das System richtig abgebildet wird.



**Abbildung 23: Möglicher Verlauf zwischen Messzeitpunkt und Parameterveränderung in einem dynamischen System**

(Punkte: Messzeitpunkte, gestrichelte Linie: tatsächlicher Verlauf. Quelle: SCHMIDT 1999, verändert)

Für arbeits- und zeitintensive Geländearbeiten ist dieses Problem besonders bedeutsam. Ein Kompromiss zwischen Aussagekraft und logistischer Bewältigung der Geländeeinsätze muss gefunden werden.

Aber der Untersuchung von Umweltveränderungen der vorliegenden Arbeit haftet noch ein weiterer Mangel an: Durch die Auswahl und den Vergleich zweier Perioden in einem zeitlichen Kontinuum, könnten eventuell zwei völlige Sondersituationen betrachtet werden (vgl. Abbildung 23). Eine Möglichkeit, dieses Problem gering zu halten, besteht darin, Vergleichsstudien mit ähnlicher Zielstellung heranzuziehen, die zeitlich durchgehende Messreihen besitzen. Obgleich sich die Vergleichsstudien dann auf einen anderen Raum beziehen, können unter Berücksichtigung der theoretischen Zusammenhänge die Erkenntnisse auf die im UG spezifischen Verhältnisse übertragen werden.

## **4.2 Auswertung vorhandener Quellen**

In der ersten Phase des Forschungsprojektes fand nach gründlichem Literatur- und Datenstudium eine landschaftsökologische Bestandsaufnahme des Untersuchungsgebietes statt. Dazu konnte auf einen reichhaltigen Fundus der im GIS-Format vorliegenden Daten des Nationalparks zurückgegriffen werden. Die computergestützte Kartenauswertung sowie die Erfassung der historischen und aktuellen Nutzung im UG durch Literatursauswertung bildeten die Grundlage für die Auswahl der Mess-

standorte. In der zweiten Projektphase dienten diese Standorte als Messpunkte für die regelmäßigen hydrologischen und hydrochemischen Untersuchungen. Ebenso hat in dieser Phase die Erhebung von Daten des anthropogenen Einflusses stattgefunden (Expertenbefragungen im Amt für Landwirtschaft und Tourismusverband, von Mitarbeitern der Nationalparkverwaltung, von Rangern im Nationalpark, von Experten des geologischen Landesamtes sowie der regionalen und landesweiten Ämter zur Wasserwirtschaft).

Als Vergleichsmöglichkeit zu einem früheren Zustand des Umweltsystems Königssee konnte im wesentlichen eine limnologische Studie von Anfang der 80er Jahre (SIEBECK 1982) herangezogen werden. Durch die Zusammenstellung der Daten und durch deren Auswertung mit einem GIS konnten Umweltveränderungen mit anthropogenen und natürlichen Einflüssen in Beziehung gesetzt werden.

### ***4.3 Allgemeiner Ablauf der Geländeuntersuchungen***

Kern der Untersuchungen waren die Gewässeranalysen. Die Erstellung eines hydrologisch-hydrochemischen Tiefenprofils erfolgte mit einer Multiparametersonde, welche von einem Forschungsboot aus verwendet wurde. Abbildung 24 zeigt den Königssee mit seinen verschiedenen Messstellen und den dort durchgeführten Untersuchungen.

Seit Juni 1999 bis heute wurden im wöchentlichen (im Winter 14-tägigen) Rhythmus Tiefenprofile vom Königssee zu Temperatur und Sauerstoff, aber auch zur Leitfähigkeit, pH-Wert und Trübung genommen. An den Zu- und Abflüssen des Königssees und vom See selbst wurden Wasserproben zur Analyse entnommen. An den Zuflüssen wurde zusätzlich ein automatisches Abflussmesssystem mit Dataloggern installiert, die ebenfalls wöchentlich ausgelesen wurden. Auf dem See konnte versuchsweise eine Windmessplattform installiert werden, welche unmittelbar die Windströmungsverhältnisse an der Seeoberfläche registrierte.



# Spektrum der Geländeuntersuchungen

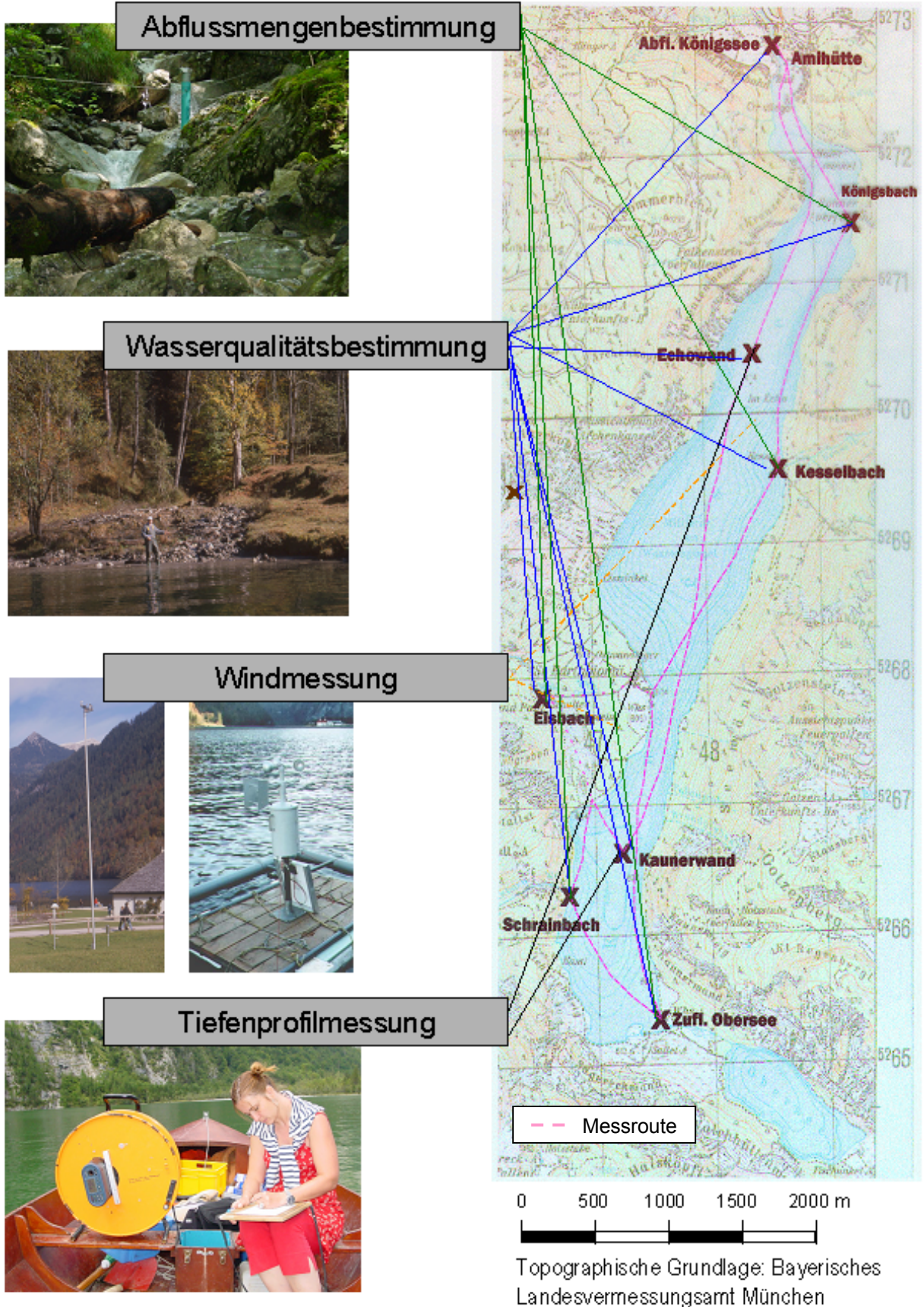


Abbildung 24: Ablauf der Geländeuntersuchungen mit Messstellen

#### **4.4 Hydrochemische Untersuchungen**

Die Abstände der Messungen im Tiefenprofil richteten sich nach verschiedenen Standardprogrammen der Gewässeraufsicht (z. B. SCHAUMBURG 1996; ROSS-KNECHT 1998), wurden aber durch Erweiterung an die speziellen Verhältnisse des Königssees angepasst: Bis 15m Tiefe wurde im Meterabstand gemessen (zusätzlich noch in 0,5m Tiefe), anschließend in 20, 40, 60, 80, 90, 95, 100 Metern sowie in der Maximaltiefe an der Kaunerwand und an der Echowand zusätzlich in 120, 140, 160, 170, 175, 180, 185, 190 Metern sowie in der Maximaltiefe.

Für die Untersuchungen des Wasserkörpers in situ im Tiefenprofil wurden während des gesamten Messzeitraumes zwei Sonden (siehe unten) eingesetzt und miteinander verglichen. Von der Fa. SEBA wurde eine Multiparametersonde eingesetzt, über welche pH, Sauerstoff, Temperatur, Redoxpotential und Trübung ermittelt werden konnten. Die theoretische Messfunktionalität dieser Sonde wäre für die Untersuchungen tauglich gewesen, bedauerlicherweise aber erfüllte sie in der Messpraxis nicht alle Anforderungen an ein geländefähiges Gerät (instabile Softwarekonfiguration, zu schwach dimensionierte Akkus, zu geringe Druckwiderstandsfähigkeit und zu hohe Anfälligkeit gegenüber unvermeidbarer mechanischer Beanspruchung). Die Messleistung der angeschlossenen Sensoren hingegen war durch verschiedene Vergleichsmessungen (siehe unten) als durchaus akzeptabel anzusehen. Der Vorteil der SEBA-Sonde in der Messmethodik ist, dass die analogen Messsignale an den Sensoren gleich zu digitalen Werten im Sondenkopf umgewandelt und dann zum Anzeigergerät gesendet werden. Dadurch können Störungen während der Übertragung bei langem Kabel vermieden werden. Die Genauigkeit bei der Temperaturmessung ist mit  $\pm 0,15K$  angegeben.

Aufgrund der oben beschriebenen Probleme im Geländeeinsatz mit der SEBA-Sonde wurden seit September 1999 die Temperatur- und Sauerstoffprofile mit einer modifizierten Sonde der Firma WTW erstellt. Die Genauigkeit bei der Temperaturmessung wurde mit  $\pm 0,1K$ , bei der Sauerstoffmessungen mit  $\pm 0,5\%$  vom Messwert angegeben. Im Lieferprogramm sind normalerweise nur Sonden mit einer Kabellänge von 100m vorgesehen; für die besondere Tiefe am Königssee wurde das Kabel somit auf 200m verlängert. Da für diese Sonderausführung keine Erfahrungswerte vorlagen, wurde im Projekt die Tauglichkeit der Messungen bei der getätigten Kabelverlängerung überprüft. Dem Vergleich der beiden Sonden unter Berücksichtigung der Sauer-

stoffmessung nach WINKLER wurde eine eigene Diplomarbeit gewidmet (SCHNEIDER 2001). Die Ergebnisse sowie der Vergleich der Temperaturmessungen mit dem SEBA-Gerät zeigten keinerlei bedenkliche Abweichungen. Die Messwertstabilität bei der Übertragung des Messsignals wurde durch eine Prüfleitung im Kabel gewährleistet. Eine statistische Auswertung der Differenzen der Temperaturmesswerte beider Sonden bei Parallelmessungen ergab einen Mittelwert von 0,0266K mit einer Standardabweichung von 0,04966 (N=130). Dies bedeutet, dass die SEBA-Sonde im Durchschnitt um diesen Mittelwert geringfügig höhere Werte misst als die WTW-Sonde.

Da die im LAKE-Projekt gewonnenen Daten mit denen aus der Studie von SIEBECK (1982) verglichen werden sollten, erscheint es ratsam, auf die damals verwendete Methodik und Messgenauigkeit einzugehen. Herr Siebeck gab den freundlichen Hinweis, dass seinerzeit der Hydropolytester HPT 77 der Firma ZÜLLIG verwendet wurde. Recherchen im Archiv des Unternehmens ergaben, dass in der Sonde ein Temperaturfühler (Typ YSI 44018) des nordamerikanischen Anbieters YELLOW SPRINGS installiert war. Nach dessen Angaben lag die Messgenauigkeit bei +/- 0,065K. Die Temperaturmessungen im Jahr 1980 wurden mit einem Kipp-Thermometer durchgeführt, welches sogar eine Messgenauigkeit von +/- 0,02K haben soll (MÜLLER 1981).

Im Vergleich zu anderen Messprogrammen (LIVINGSTONE 2003 oder HOLLAN 2001) wurden in der vorliegenden Studie die Messungen zumeist zeitlich und räumlich enger durchgeführt. Dies darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass der gesamte Untersuchungszeitraum bislang noch kürzer ist.

Zusätzlich wurden an den beiden Standardmessstellen des LAKE-Projektes mit einem Schöpfergerät der Firma SEBA unter Verwendung des Schöpfersystem „Dr. Blasy“ jeweils eine 2 Liter Wasserprobe aus 100m und 180m Tiefe an der Echowand und aus 100m Tiefe an der Kaunerwand entnommen. Der Vorteil dieses Schöpfers, im Gegensatz zu anderen Geräten, liegt darin, dass er beim Herablassen mit dem Probenwasser vollständig durchspült wird, so dass keine Verschleppung von Probenwasser stattfinden kann.

Mit diesen und den Proben von der Oberfläche dieser beiden Messstellen sowie verschiedener repräsentativer Zu- und Abflüsse des Königssees, konnten im Department für Geo- und Umweltwissenschaften der Sektion Geologie, Abteilung Hy-

drogeologie, anschließend ionenchromatographische Untersuchungen auf Nitrat, Phosphat, Sulfat und Chlorid durchgeführt werden.

Die Entnahme der Wasserproben aus den Fließ- und Stillgewässern sowie deren Transport, Konservierung und Untersuchung orientieren sich an den DIN- bzw. EU-Normen (DEV 1996). Nach dem gekühlten Transport in das Labor der Sektion Geographie des Departments für Geo- und Umweltwissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität München erfolgte die Filtration unter Druck mit Membranfiltern aus Celluloseacetat mit einer Porenweite von 0,45µm.

In Tabelle 6 sind Messgenauigkeiten und untere Messbereichsgrenzen dargestellt.

Element	Messgenauigkeit	Messbereichsuntergrenze
Cl	+/- 30-50%	0,1998
NO <sub>3</sub>	+/- 2-3%	0,2369
PO <sub>4</sub>	o. A.	0,2849
SO <sub>4</sub>	+/- 30-50%	0,1541

**Tabelle 6: Messgenauigkeit und Messbereichsuntergrenzen der ionenchromatographischen Untersuchungen**

Hier ist unter anderem zu erkennen, dass es bei den Phosphatuntersuchungen erhebliche messmethodische Probleme gab, da die Proben in der Regel unterhalb der Messbereichsuntergrenze lagen. Folglich können die Phosphatverhältnisse nicht in die Betrachtung mit eingehen. Es lässt sich lediglich festhalten, dass die Phosphatgehalte nahezu ausnahmslos unter dieser Messbereichsgrenze liegen.

Erste Versuche, die Nährstoffverhältnisse geländephotometrisch zu bestimmen, hätte den Vorteil gehabt, Einwirkungen auf die Proben während des Transportes ins Labor auszuschließen. Aber auf Grund der geringen Gehalte nahe der Nachweisgrenze stellte sich diese Methode als zu ungenau bzw. als gänzlich unzureichend dar.

#### **4.5 Abflussmessungen**

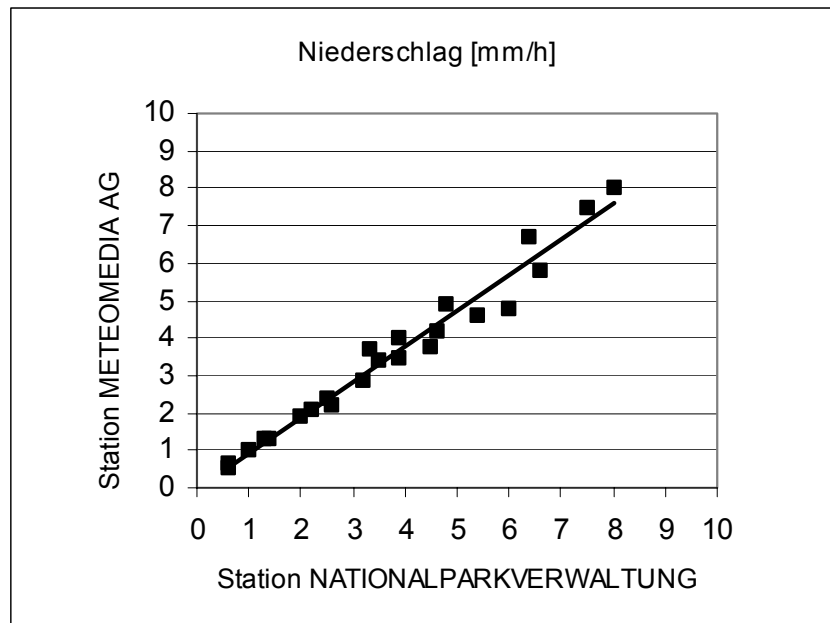
Zur Messung des Abflussgeschehens in den Teileinzugsgebieten des Königssees wurden an den Hauptzuflüssen Pegelrohre zusammen mit einem Datalogger aufgestellt, welcher die Wasserstandsschwankungen jede Minute registriert. Zur Kalibrierung der Wasserstands-/Abfluss-Beziehung wurden regelmäßige Abflussmessungen mit Salz als Tracer zu möglichst unterschiedlichen Wasserführungen getätigt (Me-

thodik hierzu: LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER UND BUNDESMINISTER FÜR VERKEHR 1991; vgl. auch TASCH 2001).

Dieser Teil des Projektes erwies sich als außerordentlich wartungsintensiv. Diverse methodische Probleme (Pegelsturz oder Sedimentation im Pegelrohr führten dazu, dass sich der Schwimmer nicht mehr frei bewegen konnte) gestalteten die Auswertung der Daten als besonders schwierig. Deshalb wurden im Ergebnisteil nur die Salzabflussmessungen zur Bestimmung des Abflusses ausgewertet. Dadurch war zwar keine Berechnung des Wasserhaushalt im Einzugsgebiet möglich, aber exemplarisch konnten Abflussmengen der einzelnen Zuflüsse dargestellt werden.

### **4.6 *Klimatologische Messungen***

Der Nationalpark verfügt über ein hervorragendes Klimamesssystem mit hohem Instrumentierungsgrad, welches im Untersuchungszeitraum für die projektspezifischen Anforderungen noch erweitert wurde. Freundlicherweise wurden die Klimadaten für diese Arbeit von Seiten der Nationalparkverwaltung zur Verfügung gestellt. Für die Messungen im LAKE-Projekt boten sich die Stationen St. Bartholomä, Schönau und Bischofswiesen-Winkl an. Die Niederschlags- und Windmessstation St. Bartholomä des Nationalparks befindet sich ungefähr 200m südlich der Anlegestelle der Königsseeschifffahrt in ca. zehn Metern Entfernung vom Königsseeufer. Diese Messstelle wurde erst im Sommer 2002 eingerichtet. Im Oktober 2000 wurde auf der Halbinsel St. Bartholomä aber auch noch eine Station der METEOMEDIA AG errichtet, die ebenfalls wertvolle Messdaten lieferte. Diese Station, die sich ursprünglich auf einer Wiese in ca. 20m Entfernung vom Wirtshaus St. Bartholomä befand, wurde am 30.04.2002 an einen Standort direkt neben der Anlegestelle der Königsseeschifffahrt versetzt. Auch wenn der Standort aus klimatologischen Gesichtspunkten wenig günstig erscheint, so lieferten doch die Niederschlagsdaten eine akzeptable Übereinstimmung mit den Werten der Nationalparkstation. Abbildung 25 zeigt stellvertretend den Zusammenhang der sich mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,985 bei einem 23-stündigen Niederschlagsereignis vom 6./7. August 2002 ausdrücken lässt. Da die Station Schönau erst ab Februar 2001 mit einer Niederschlagsregistrierung ausgestattet wurde, konnten diese Werte nicht in einen Vergleich mit eingehen.



**Abbildung 25: Korrelation von Messwerten verschiedener Klimamessstationen zu einem Niederschlagsereignis**

(Datenquelle: METEOMEDIA AG und NATIONALPARKVERWALTUNG BERCHTESGADEN)

#### **4.7 Datenverarbeitung, Berechnungsgrundlagen und statistische Verfahren**

Die gewonnenen Daten aus den Tiefenprofilen sowie die Daten zu den Fließgewässern wurden anschließend statistisch ausgewertet und mit dem Mann-Whitney-U-Test für nichtparametrische Daten mit den Werten früherer Messungen in Beziehung gesetzt. Dazu wurde das statistische Auswertungsprogramm SPSS verwendet.

Für die Berechnung bestimmter limnologischer Kennwerte wurden folgende Verfahren angewandt:

Der Wärmeinhalt eines Sees lässt sich folgendermaßen bestimmen:

$$\Delta W = \sum_{z_i=0}^{z_i=z_{\max}} c_p t(z_i) \Delta V(z_i)$$

$\Delta W$	= Wärmeinhalt in Kilo Joule
$c_p$	= 4,1868
$\Delta V(z)$	= Volumen der Schicht z einer Tiefenstufe
$t(z)$	= mittlere Temperatur der Schicht z in °C

Dieses komfortable Verfahren gilt unter der vereinfachten Annahme, dass ein See einen Wärmeinhalt von Null hat, wenn die Temperatur im ganzen Seekörper Null

Grad Celsius aufweist. Diese Annahme ist zwar aus physikalischer Sicht willkürlich, stellt aber aus limnologischer Sicht eine durchaus sinnvolle Bezugsgröße dar, denn bei Null Grad Celsius gefriert i. d. R. Wasser. Man kann diese Bezugsgröße verwenden, um zu ermitteln, wie viel Wärmeenergie aus einem bestimmten Zustand abgegeben werden muss, damit dieser Nullpunkt erreicht wird. Ebenso gilt dies für den umgekehrten Fall, wie viel Wärmeenergie der See aufnehmen muss, um von dem Wärmeinhalt Null auf einen bestimmten Wert zu gelangen. Diese Wärmeinhaltsveränderung kann mit der oben genannten Formel ausgedrückt werden. Aspekte dieser Problematik werden bei MICHLER (1974) diskutiert.

Je stärker sich bei einem See dessen Fläche mit zunehmender Tiefe verändert, umso deutlicher sollte die Differenzierung zur Berechnung des Wärmeinhaltes in unterschiedlichen Tiefenstufen erfolgen. Beim Königssee spielt dies aber auf Grund der speziellen morphologischen Situation (vgl. Kap. 2.5) eine untergeordnete Rolle. Dennoch konnte durch die Anpassung des digitalen Geländemodells für den Königssee eine genaue Volumenschichtenberechnung durchgeführt werden.

Durch Datenauswertung aus der früheren Studie (SIEBECK 1982) konnte zum direktem Vergleich nach dem selben Verfahren der Wärmeinhalt berechnet werden. Die Ermittlung wurde letztlich über eigens erstellte Programme in VISUAL BASIC unter zu Hilfenahme von EXCEL realisiert.

Für die Berechnung der Stabilität mussten zwei Programme geschrieben werden, da zuvor die spezifische Dichte eines bestimmten Wasserpaketes zu bestimmen war. Zur deren Berechnung aus Leitfähigkeit und Temperatur, wurden folgende Gleichungen verwendet (aus BÜHRER und AMBÜHL 1975; vgl. auch CHEN und MILLERO 1986):

Temperaturkorrektur der Leitfähigkeit:

$$\chi_{20^\circ} = \chi * (-0,00001222651 * T^3 + 0,00114842 * T^2 - 0,0541369 * T + 1,721118)$$

Temperaturkorrektur der Dichte:

$$d_{H_2O} = (0,059385 * T^3 - 8,56272 * T^2 + 65,4891 * T) * 10^{-6} + 0,99984298$$

(gilt zwischen 0°C und 24°C mit +/- 0,000001)

Berechnung der Dichte des Seewassers:

$$d_{Seewasser} = d_{H_2O} + 0,64 * 10^{-6} * \chi_{20^\circ}$$

d = Dichte in g/cm<sup>-3</sup>

d<sub>H<sub>2</sub>O</sub> = Dichte von destilliertem Wasser in g/cm<sup>-3</sup>

T = Temperatur in Grad Celsius

χ = Leitfähigkeit in μS/cm<sup>-1</sup>

Die Schmidtstabilität (SCHMIDT 1928) wurde nach der Veränderung von IDSO (1973) mit folgender Formel berechnet:

$$S = \frac{g}{A_0} \int_0^{z_m} (z-z^*) (\rho_z - \langle \rho \rangle) A_z dz$$

S	=	Schmidtstabilität
g	=	ortspezifische Gravitationskraft
A <sub>0</sub>	=	Fläche an der Seeoberfläche
Z	=	Tiefe in m
z*	=	Tiefe in m, an der sich der Dichteschwerpunkt in einem geschichteten Profil vor der Durchmischung befindet
Z <sub>m</sub>	=	maximale Tiefe des Sees
ρ <sub>Z</sub>	=	Dichte in der Tiefe z
⟨ρ⟩	=	durchschnittliche Dichte des ungeschichteten Profils

Die Ermittlung des relativen thermischen Widerstandes fußt auf den Zusammenhängen, die VALLENTYNE (1957) rechnerisch umgesetzt hat: Bezieht man den Dichteunterschied zwischen den übereinanderliegenden Wasserschichten auf den Dichteunterschied von Wasser zwischen 4°C und 5°C, dann kann formal diese Differenz als Größe für den relativen thermischen Widerstand ausgedrückt werden. Zur Berechnung dieses Parameters musste ebenfalls nach Berechnung der Dichte ein Programm nach den oben genannten Zusammenhängen erstellt werden.

Die räumlichen Daten wurden mit einem GIS verarbeitet. Hier wurde das ESRI-Produkt ArcView verwendet. In diesem Zusammenhang ist noch mal darauf hinzuweisen, dass die digitale Speicherung räumlicher Daten in Verknüpfung mit einer Datenbank im GIS der Nationalparkverwaltung beispielhaft verfügbar gemacht worden wurde (z. B. SPANDAU und SIUDA 1985) und Dank der freundlichen Freigabe auch dem Nutzer zur Verwendung steht. Für die räumliche Analyse wurden neben den Grundfunktionen des GIS die Extensions „Hydrologic Modeling“ und „Spatial Analyst“ verwendet. Durch die Vermessung des Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft aus dem Jahre 1981 und des Digitalen Geländemodells der Nationalparkverwaltung liegt eine gute kartographische Grundlage vor. Da es auf Grund der engen Lage der Isobathen in den steilen Bereichen des Seekörpers zur Überlagerung in dem ursprünglichen Digitalen Geländemodell kam, mussten die Tiefenlinien für die Modellierung aufwendig aufbereitet werden. Dies war nötig, um die genauen Tiefenschichtvolumina zu ermitteln.



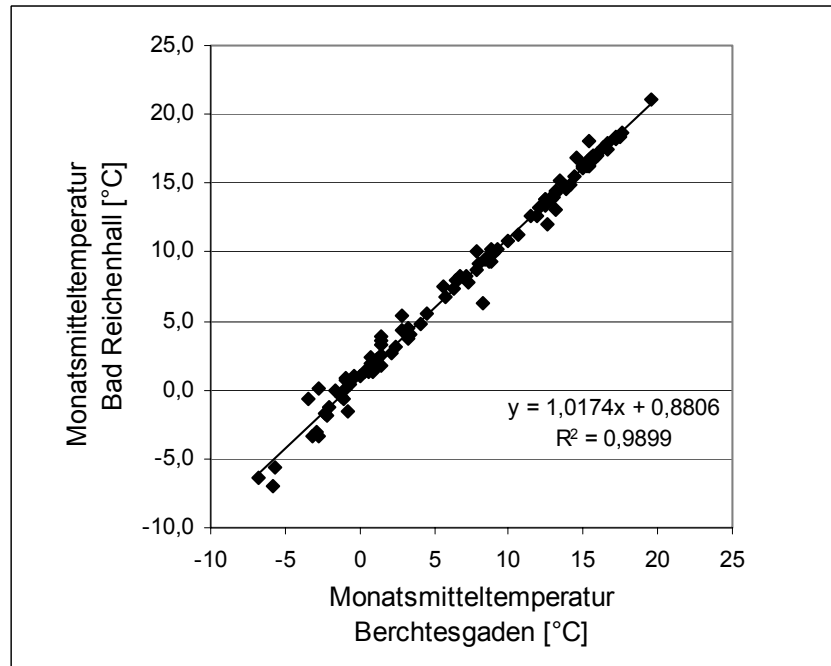
## 5 Ergebnisse und Diskussion

Wie oben beschrieben, sollen im LAKE-Projekt Stoff- und Energiehaushalt im Untersuchungsgebiet erforscht werden, um eventuelle Umweltveränderungen und deren Zusammenhänge aufzudecken. Kap. 5.1 bis 5.4 stellen die Ergebnisse zur Untersuchung des Energiehaushaltes dar, und Kap. 5.5 bis 5.7 behandeln die Aspekte zum Stoffhaushalt im Untersuchungsgebiet. Kap. 5.8 beschreibt die wesentlichen Unterschiede zwischen der Zeitperiode von 1978 bis 1980 und den heutigen Verhältnissen. Kap. 5.9 beantwortet die noch offenen Fragen der Zielstellung. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse erfolgt im Rahmen der Gesamtzusammenfassung der Arbeit in Kap. 6.

### 5.1 *Veränderung klimatischer Randparameter*

Wenn die Zusammenhänge zwischen einer Änderung der Umweltsituation im EZG des Königssees und Klimaveränderungen erläutert werden sollen, muss zuerst überprüft werden, ob und inwiefern dieser Klimawandel überhaupt stattgefunden hat.

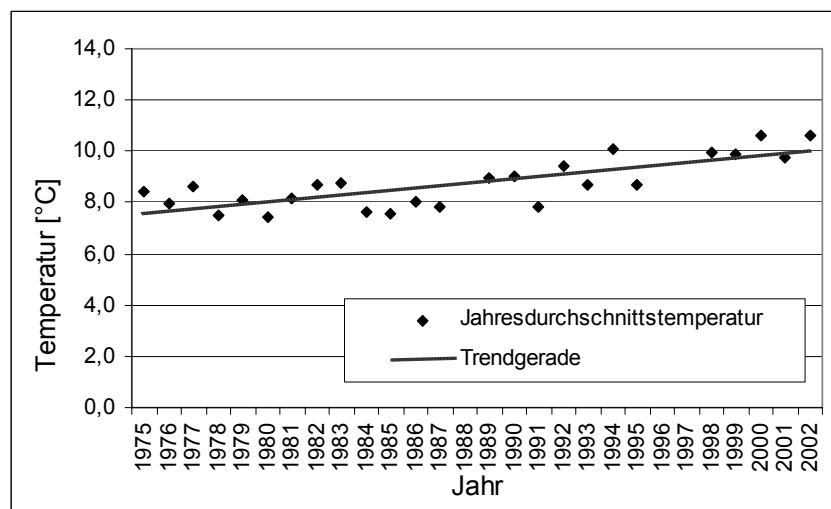
Die Klimamessstation Berchtesgaden (vgl. Abbildung 2) steht für den aktuellen Vergleich nicht mehr zur Verfügung, da deren Betrieb 1990 eingestellt wurde. Es ist zwar ein leichter Trend der Temperaturerhöhung (1950-1990) aus diesen Daten zu ermitteln, aber auf Grund der Datenlücken und vor allem auf Grund des Fehlens der Werte seit 1990 ist die Aussagekraft relativ schwach. Für einen Vergleich der klimatischen Verhältnisse 1978-1980 mit der Periode 1999-2003 musste eine Messstation gefunden werden, die beide Zeiträume abdeckt. In der Nähe des Untersuchungsgebietes war dies nur die Station Bad Reichenhall (47°43' N, 12° 53' E in 470m. ü. NN). Ein Vergleich der Daten von Bad Reichenhall und Berchtesgaden über den Zeitraum von 1980-1990 zeigt einen Korrelationskoeffizienten von 0,9899, und am y-Achsendurchgang ( $x=0$ ) der Geraden kann man sehen, dass die Werte bei Berchtesgaden im Durchschnitt um ca. 0,9K niedriger liegen (Abbildung 26). Dies kann möglicherweise auf den Höhenunterschied der beiden Stationen zurückgeführt werden.



**Abbildung 26: Vergleich der Monatsmittelwerte 1980-1990 der Klimastationen Bad Reichenhall und Berchtesgaden**

(Datenquelle: DWD und NATIONALPARKVERWALTUNG BERCHTESGADEN)

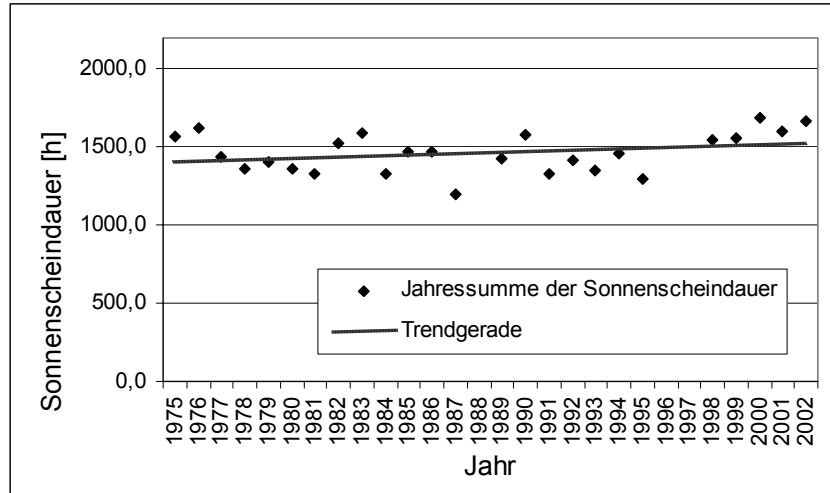
Dieser ziemlich deutliche Zusammenhang – zumindest bei Betrachtung der Monatsmittelwerte – ist hinreichend, um eine Aussage über die Klimaverhältnisse für den Berchtesgadener Raum zu treffen. Dadurch wird es möglich, Abbildung 27 zur Betrachtung der Jahresmittelwerte der Lufttemperatur über die letzten 28 Jahre hinweg zu verwenden. Bemerkenswerterweise liegen gemäß der Trendgeraden die Lufttemperaturwerte der heutigen Zeit (2000-2002) in etwa 2K höher, als dies 1978-1980 der Fall war.



**Abbildung 27: Jahresdurchschnittswerte der Lufttemperatur der Klimastation Bad Reichenhall mit Trendgerade**

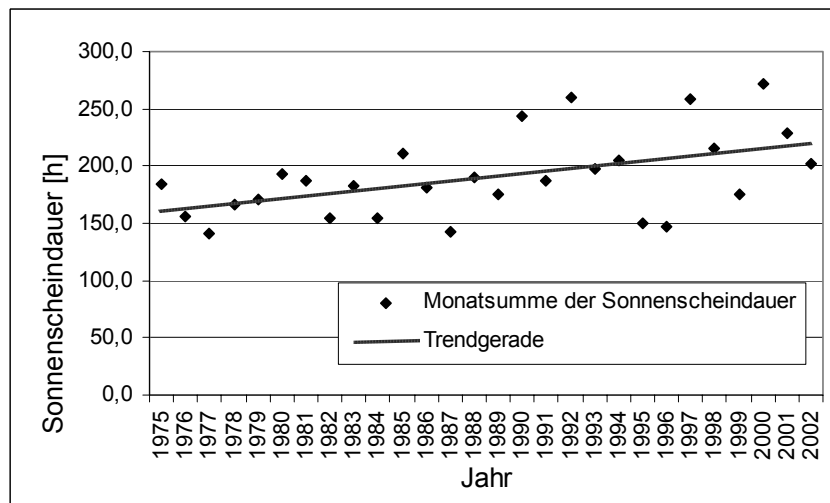
(Datenquelle: DWD)

Neben der Lufttemperatur werden heute aber auch deutlich mehr Sonnenscheinstunden pro Jahr registriert (vgl. Abbildung 28), vor allem im Sommer ist dieser Trend besonders deutlich zu sehen (Abbildung 29).



**Abbildung 28: Jahressummen der Sonnenscheindauer Bad Reichenhall**

(Datenquelle: DWD)



**Abbildung 29: Monatssumme der Sonnenscheindauer im August für Bad Reichenhall**

(Datenquelle: DWD)

Sollten sich die Modellberechnungen (beispielsweise BAYFORKLIM 1999) unter der Annahme des weiter steigenden CO<sub>2</sub>-Gehaltes in der Atmosphäre für den Berchtesgadener Raum bestätigen, dann wird auch in Zukunft damit zu rechnen sein, dass sich die klimatischen Verhältnisse verändern. BAYFORKLIM (1999) nimmt für die Region Bad Reichenhall bei einer Verdoppelung des jetzigen CO<sub>2</sub>-Gehaltes in der Atmosphäre eine Lufttemperatursteigerung im Winter von 0,8K und im Sommer von

5K an. Für die Region Berchtesgaden liegen die Werte für den Winter bei 0,5K und 4,5K im Sommer.

Fazit: Klimamessungen in der Nähe des Untersuchungsgebietes zeigen verhältnismäßig starke durchschnittliche Steigerungen von Lufttemperatur und Sonnenscheindauer; Klimamodellrechnungen sagen für die Zukunft weitere Temperatursteigerungen voraus. Diese Veränderungen werden auf das Ökosystem im UG einwirken (vgl. Abbildung 14).

### **5.2 Temperaturverhalten im Königssee – Zirkulations- und Stagnationsphasen**

Abbildung 30 bis Abbildung 33 zeigen Aspekte des Energiehaushaltes für den Parameter Wassertemperatur des Königssees, dargestellt an den Standorten Kaunerwand und Echowand. Abbildung 30 und Abbildung 31 verdeutlichen das Temperaturverhalten über den Zeitraum von gut vier Jahren an der Echowand. Die Graphik ist so aufgebaut, dass auf der Ordinate die Tiefe des Sees in Metern abgetragen ist, an der Abszisse ist der zeitliche Verlauf angegeben. Die Färbungen geben die unterschiedlichen Temperaturen an, rote Farbe spricht für höhere, gelbe Farbgebung für tiefere Temperaturen. Es ist darauf hinzuweisen, dass zum Teil nur ein geringes Spektrum abgebildet wird (Abbildung 30 und Abbildung 33 zeigen nur den Bereich zwischen 4 und 7°C).

Über den gesamten Zeitraum betrachtet sieht man, wie sehr die Temperaturverteilung von einzelnen Durchmischungsereignissen zu den Übergangsjahreszeiten geprägt war. Der See ging mit relativ warmem Tiefenwasser von über 4,8°C in den Herbst 1999. Der anschließende Wintereinbruch führte bei starker Windtätigkeit zum Eintrag von kaltem Wasser in die Tiefe (um 4,5°C). Da sich in den darauffolgenden Wintern nicht wiederholt ein so starker Eintrag von kaltem Wasser in die Tiefe ereignete, stieg die Temperatur des Tiefenwassers im Königssee allmählich wieder an, bis im Sommer 2002 der See wieder ähnliche Temperaturverhältnisse wie im Sommer 1999 aufwies. Direkt im Anschluss daran, zum Herbst 2002 kam es zu einer erneuten heftigen Durchmischung, die wiederum kaltes Wasser in die Tiefe brachte, welches sich in einer Erniedrigung der Temperatur des Tiefenwassers auf 4,6°C darstellte.

Entscheidend für die ökologische Situation eines Sees ist, ob das sauerstoffreiche, kältere Oberflächenwasser zur Zirkulationszeit bis in die tieferen Bereiche vorzudringen vermag. Zur Untersuchung dieses Phänomens kann die Abbildung 30 herangezogen werden. Die winterlichen Temperaturen 1999/2000 führten im südlichen Teil des Königssees zur Vereisung. An der Echowand hingegen, der Teil der etwas nördlicher liegt, ist der See relativ breit, und die Möglichkeit des Zufrierens dadurch erschwert. Kam es dann – bei relativ kalten Lufttemperaturen – zur Windaktivität (vgl. Abbildung 34), gelangte das kalte Oberflächenwasser, welches nur geringfügig über Null °C liegt, schnell in die tieferen Schichten des Sees. Dies war zwischen Dezember 1999 und März 2000 zu beobachten. Deutlich wird aber auch, dass die Durchmischung nicht den kompletten Wasserkörper betraf. Ein Einfluss war hier bis ca. 140m Tiefe erkennbar. Also kann hier nicht von einer Vollzirkulation die Rede sein. Ein Jahr später war der Winter deutlich milder und auch die Windaktivität war im Durchschnitt geringer, so dass dann das ohnehin nur wenig kältere Wasser auch kaum in die tieferen Bereiche gelangen konnte. Insgesamt zeigte dieser Winter die geringsten Zirkulationswirkung im gesamten Messzeitraum. Bemerkenswerter war dann wiederum die Jahreswende 2001/2002. Dieser Winter war deutlich kälter, so dass sich dann bei ebenfalls geringerer Windaktivität im Dezember eine Eisdecke auf dem gesamten See ausbilden konnte. Die Anfang Februar verstärkte Windaktivität konnte sich somit nicht mehr auf den Seekörper auswirken. Erst nach dem Auftauen konnte das dann nur leicht über Null Grad befindliche Wasser in die Tiefe transportiert werden, allerdings nicht in dem Maße, wie es 1999/2000 der Fall war. In diesem Winter war der Zeitraum, der zur Zirkulation im gesamten Wasserkörper zur Verfügung stand, sehr viel länger, da sich keine Eisdecke ausgebildet hatte.

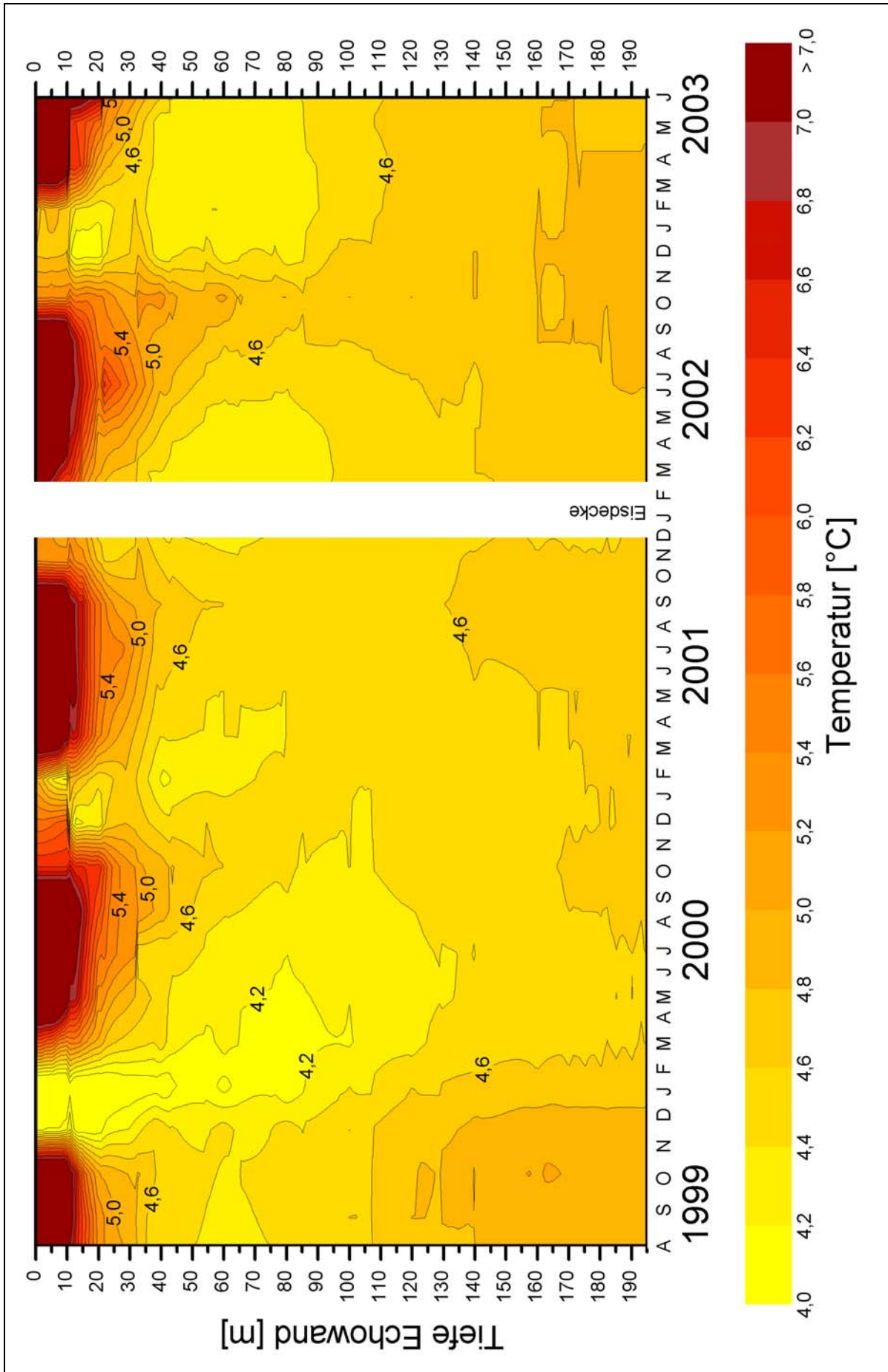


Abbildung 30: Temperaturverhalten an der Echowand im gesamten Tiefenprofil

Bei einem Blick auf Abbildung 34 zu den Windverhältnissen im Untersuchungszeitraum springt der hohe Windwert im November 2002 ins Auge. Dieser hat auch eine Entsprechung im Durchmischungsverhalten. Die ohnehin verstärkte Windtätigkeit hatte im Spätsommer 2002 bei gleichzeitig geringeren Durchschnittstemperaturen in den Monaten September und Oktober im Vergleich zu den Vorjahren zu einer Schwächung der Stabilität beigetragen. Dies ist gut sichtbar in Abbildung 45: Bereits zum September waren die Werte des relativen thermischen Widerstandes im Vergleich zu den Vorjahren so gering, dass die Schichtung schon fast vollständig aufgelöst war. Der an der Wasseroberfläche angreifende Wind konnte nun leichter den schon erhöhten Wärmeinhalt der oberen Schichten in die tieferen Bereich transportieren. An der Echowand gelang das sogar bis in die tiefsten Regionen, was sich auch in der Sauerstoffverteilung widerspiegelte, worauf weiter unten eingegangen werden soll (vgl. Kap. 5.3).

Deutlich erkennbar ist in Abbildung 31, dass das Epilimnion selten und nur kurzfristig im Sommer ausgeprägt war, diese Verhältnisse sind auch schon von SIEBECK (1982) beobachtet worden. Eine deutlich erkennbare Sprungschicht konnte in den Sommermonaten nur an wenigen Messterminen an den besonders eng beieinander liegenden Isophleten erkannt werden (z. B. August 1999 in ungefähr 4m Tiefe, Juni 2000 in 3m und Juli 2001 in 4m). Die isothermischen Verhältnisse im Winterzeitraum zeigen die deutlich ausgeprägte Winterstagnation.

Die Frage, welche klimatologischen Voraussetzungen beinahe zu einer Vollzirkulation an der Echowand geführt hatten, lassen sich beim Vergleich der Abbildung 34, Abbildung 35 und Abbildung 36 klären: Eine hohe Windaktivität von einem Tagesdurchschnittswert von mehr als 4m/s (18.01.2000) bzw. mit Durchschnittswerten über 2m/s (19./22./21./30.01.2000), gepaart mit besonders tiefen Lufttemperaturen (zwischen dem 6.01.-29.01. hat es eine Frostperiode mit einem durchschnittlichen Temperaturwert von unter  $-4^{\circ}\text{C}$  gegeben), bei insgesamt geringer Stabilität im Wasserkörper, welche aber zu dieser Jahreszeit typisch ist.

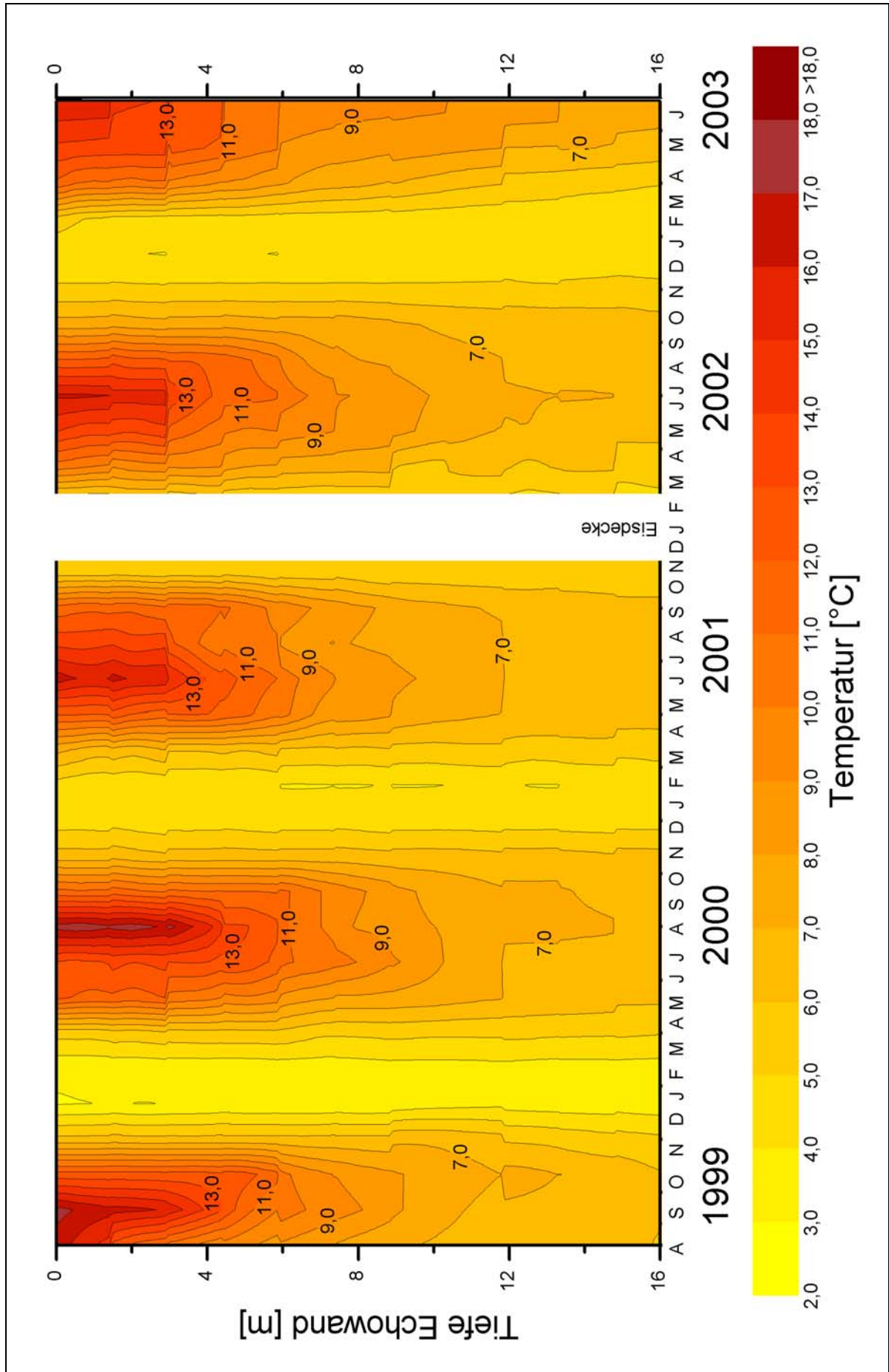


Abbildung 31: Temperaturverhalten an der Echowand 0m bis 16m



Die Frage, unter welchen Umständen die Durchmischung besonders tiefgreifend wirkt, lässt sich bei der Gegenüberstellung der Windintensität (Abbildung 34) mit der Abbildung 30 zum Temperaturverhalten im gesamten Wasserkörper ablesen. Wenn es in den Zeiten winterlicher schwacher Schichtung (vgl. dazu Abbildung 45 zum relativen thermischen Widerstand) zu starker Windtätigkeit kam, führte dies relativ deutlich zu einer Durchmischung bis in tiefere Schichten. Hingegen kann eine nahezu ähnlich starke Windaktivität bei stabiler Schichtung im Wasserkörper viel weniger ihre Wirkung entfalten. Ganz deutlich ist dies im Winter 2000 zu beobachten: Starke, relativ langanhaltende Windaktivität führte hier zu einer viel deutlicheren Durchmischung als beispielsweise die Starkwindphase Mitte Mai 2002, die sich auf Grund der Stabilität der Schichtung nur sehr geringfügig auf die Durchmischung auswirkte.

Wie lassen sich die wärmeren Temperaturen im Profil im Spätsommer 2002 in den mittleren Tiefen des Königssees erklären? Das Jahr 2002 ist insgesamt durch geringere Schichtungsstabilität gekennzeichnet (vgl. Abbildung 45). Damit hängt zusammen, dass die Temperaturen im Epilimnion im Frühsommer auch nicht so hoch waren wie im Jahr zuvor (Abbildung 31). Als es dann im Frühherbst zu einer verstärkten Windaktivität (Abbildung 34) kam, so konnte diese deutlich kräftiger angreifen und das relativ warme Wasser der oberflächennahen Schichten in die Tiefe verteilen. Bemerkenswerterweise gab es ungefähr einen Monat später (Mitte Dezember 2002) eine weitere Phase heftiger Windtätigkeit. Bei gleichzeitig relativ niedrigen Temperaturbedingungen (Abbildung 36), wurde das bereits stark abgekühlte Oberflächenwasser wieder in die tieferen Schichten (bis ca. 120m) „untergepflügt“.

An der Messstelle Kaunerwand (Abbildung 32 und Abbildung 33) verhielt sich der Wasserkörper deutlich anders als an der Echowand. Insgesamt reagierte die Wassersäule homogener auf äußere Durchmischungseinflüsse. Sowohl bei den Durchmischungsereignissen zu warmen als auch zu kälteren Zeiten scheint sich dies auf den gesamten Tiefenbereich auszuwirken. Gerade bei den besonders starken Durchmischungsereignissen im Winter 1999/2000 und 2002/2003 zeigte sich an der Kaunerwand eine Zirkulation über das ganze Profil.

Aufschlussreich ist – wie oben schon angedeutet - die Tatsache, dass sich das kältere Wasser in den tieferen Bereichen des Sees auch über die Sommermonate halten konnte. Dies geschah so lange, bis durch eine neue intensive Windaktivität im Herbst 2000 das durch den Sommer erwärmte Oberflächenwasser in die Tiefe verlagert wurde (Oktober-Dezember 2000). Dann hatte sich das Wasser in den oberen Schich-

ten wieder so weit abgekühlt, dass sich zum Beginn des Jahres 2001 wieder isothermische Verhältnisse einstellten, allerdings auch nur im Einflussbereich bis in eine Tiefe von ungefähr 70m.

Der Winter 2000/2001 war in der Region Berchtesgaden milder, und offensichtlich war auch die Windaktivität in dieser Zeit nicht so intensiv wie im Winter zuvor. Die Messungen zeigen, dass es lediglich zu einer Durchmischung der obersten 30-40m des Sees kam. Die Kaltwasserschicht von ungefähr 4,4°C in 60-70m Tiefe scheint sich aus dem Vorjahr noch erhalten zu haben. Der August 2001 war vergleichsweise warm. Dort konnte am 15.08.2001 an der Oberfläche des Königssees mit 21,3°C ein sehr hoher Wert für den ganzen Messzeitraum festgestellt werden. Die sich anschließende Herbstzeit mit verstärkter Windaktivität verlagerte dann dieses wärmere Wasser wieder in die tieferen Schichten des Sees. So kam es, dass im Oktober/November 2001 in den tieferen Schichten bis ca. 140m Tiefe relativ einheitliche Temperaturverhältnisse vorlagen. Zum Dezember 2001 hin, waren die Messungen nicht mehr möglich, da weder trag- noch bruchfähiges Eis auf dem gesamten Königssee die Untersuchungen bis März 2002 verhinderten. Im Anschluss wurde in ungefähr 50-70m Tiefe eine kältere Wasserschicht mit Temperaturen zwischen 4,1 und 4,3°C ausgemacht. Da die Oberflächentemperatur zu diesem Zeitpunkt schon höher war, liegt die Vermutung nahe, dass sich die kälteren Temperaturverhältnisse seit Herbst 2001 unterhalb der Eisdecke gehalten hatten.

Im Winter 2000/2001 verhinderte die relativ starke und permanente Windtätigkeit, dass sich eine Eisschicht ausbildete, was auch im Vergleich zum Winter 2001/2002 auffällt: Damals hatte es deutlich geringere Windgeschwindigkeiten gegeben, so dass eine Eisbildung möglich war.

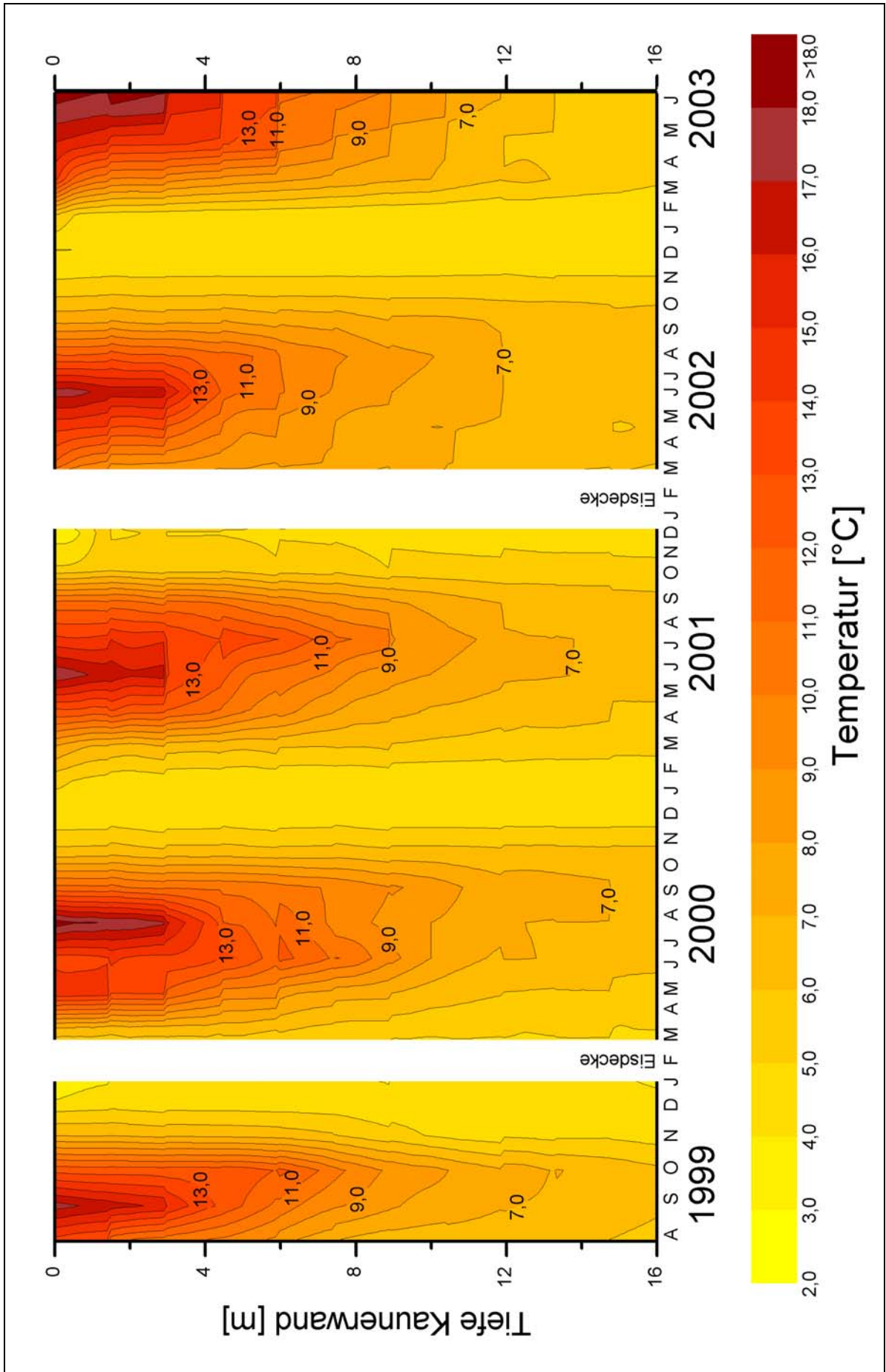


Abbildung 32: Temperaturverhalten Kauerwand 0m bis 16m

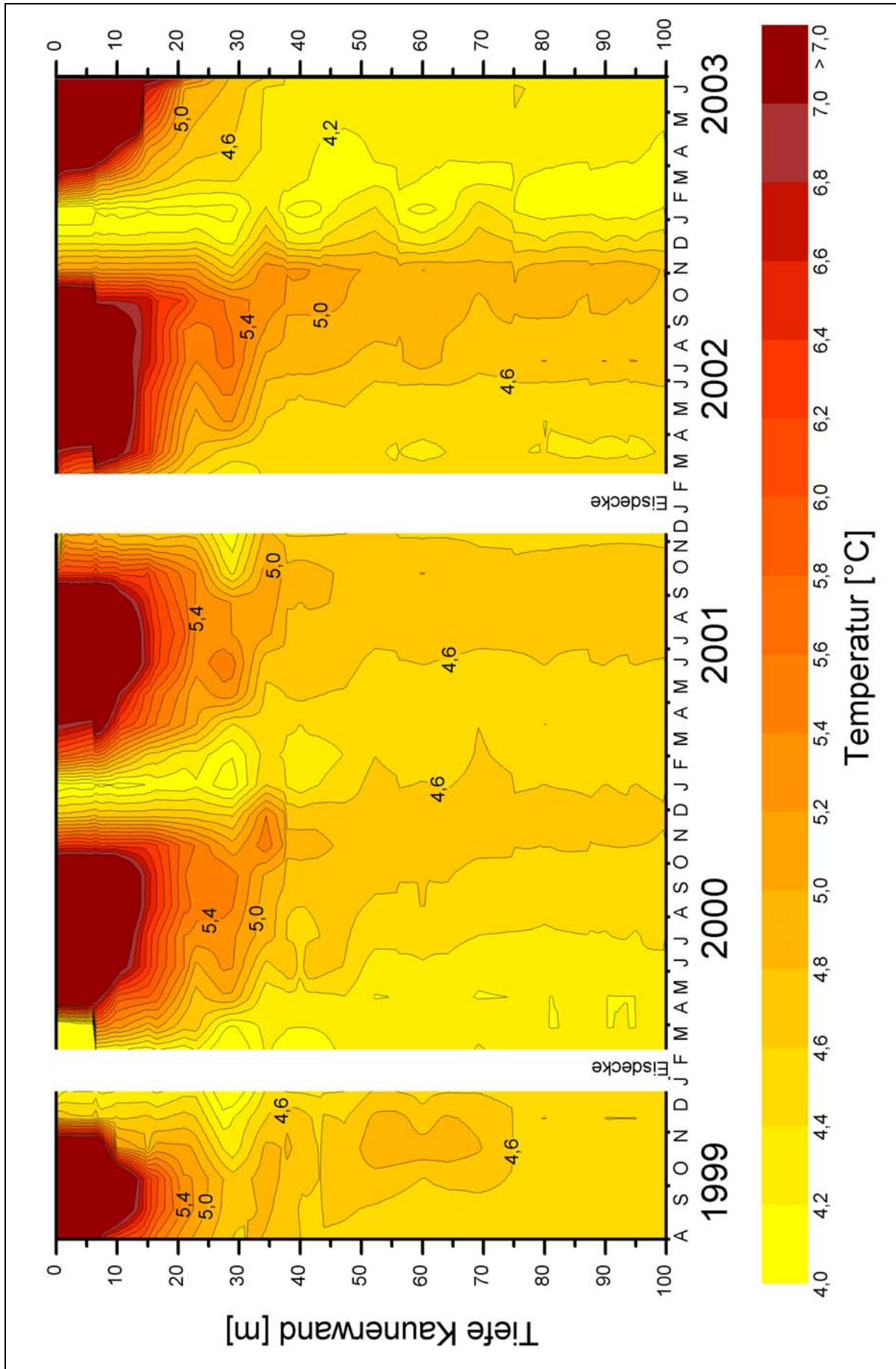
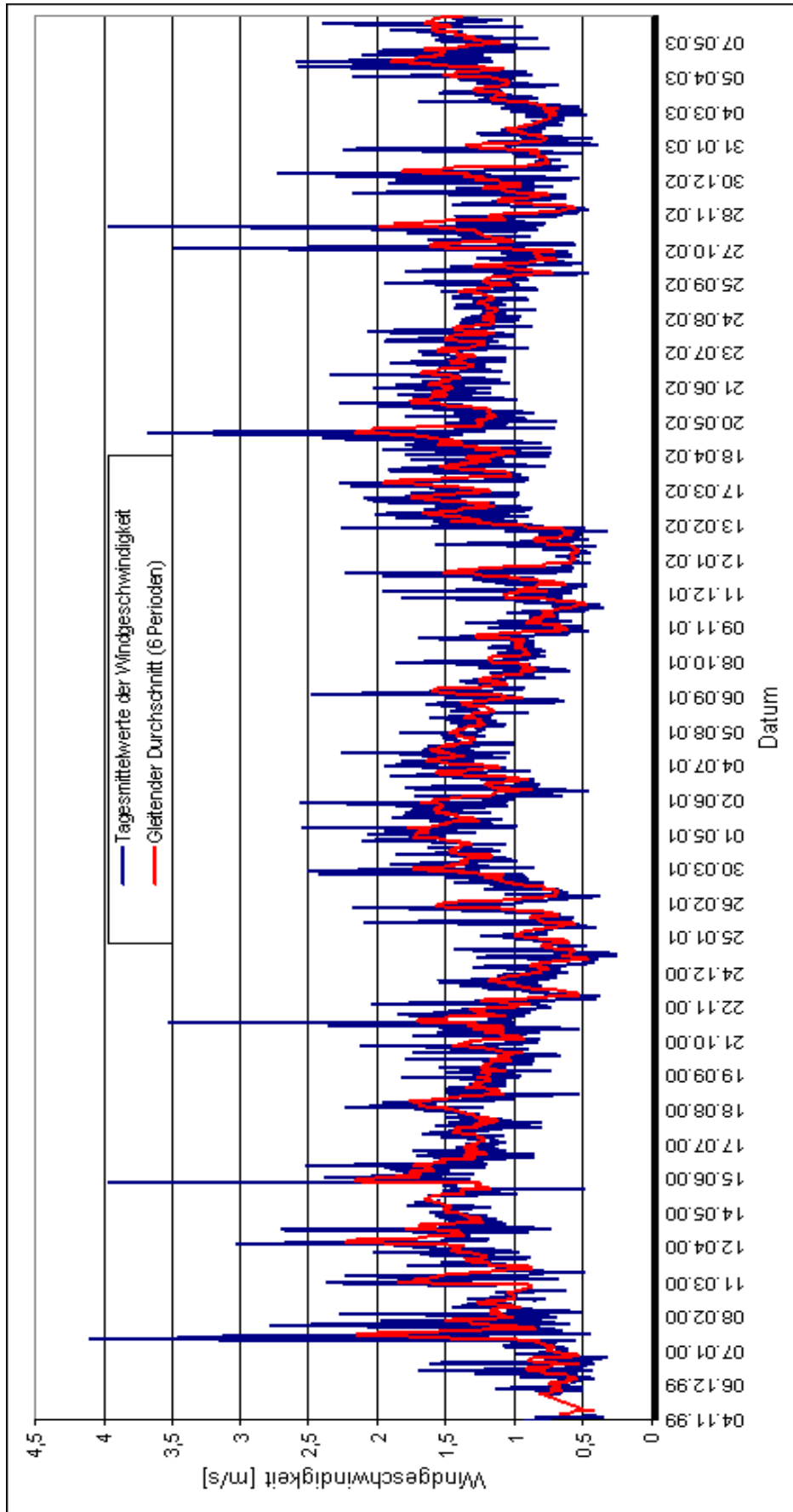


Abbildung 33: Temperaturverhalten an der Kaunerwand im gesamten Tiefenprofil



**Abbildung 34: Windaktivität im Untersuchungszeitraum (Messstelle Schönau)**  
 (Datenquelle: DWD und NATIONALPARKVERWALTUNG BERCHTESGADEN)

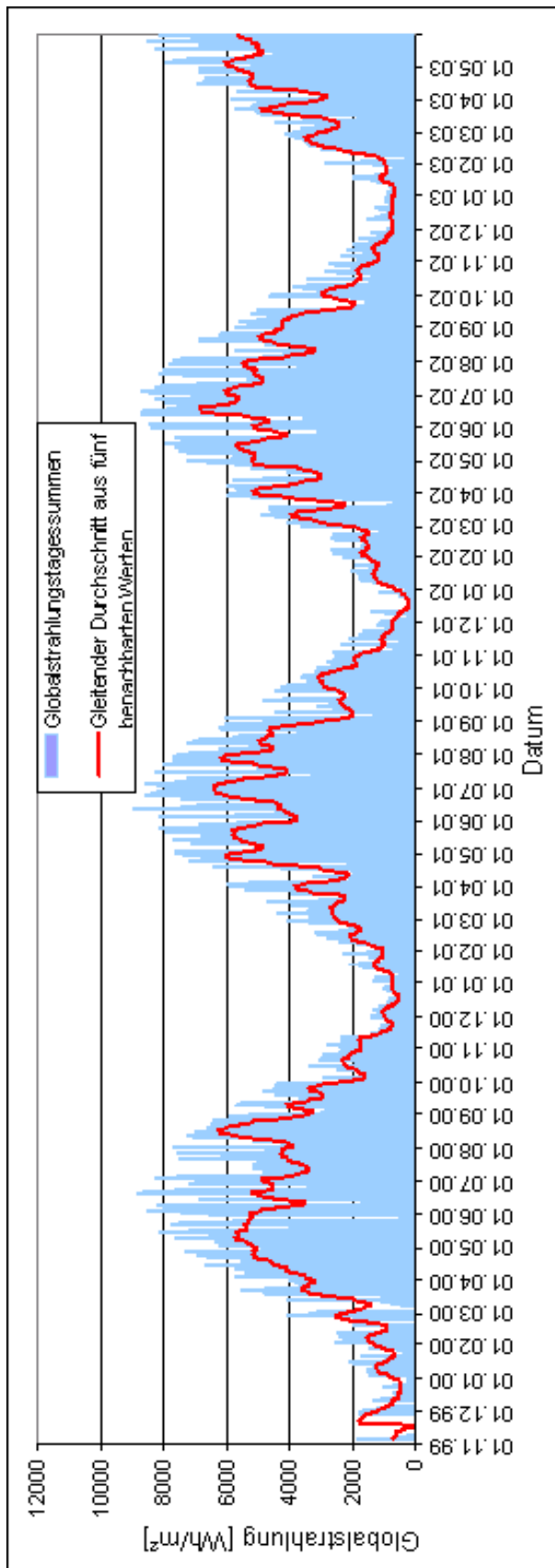


Abbildung 35: Globalstrahlungswerte im Untersuchungszeitraum (Messstelle Schönau)

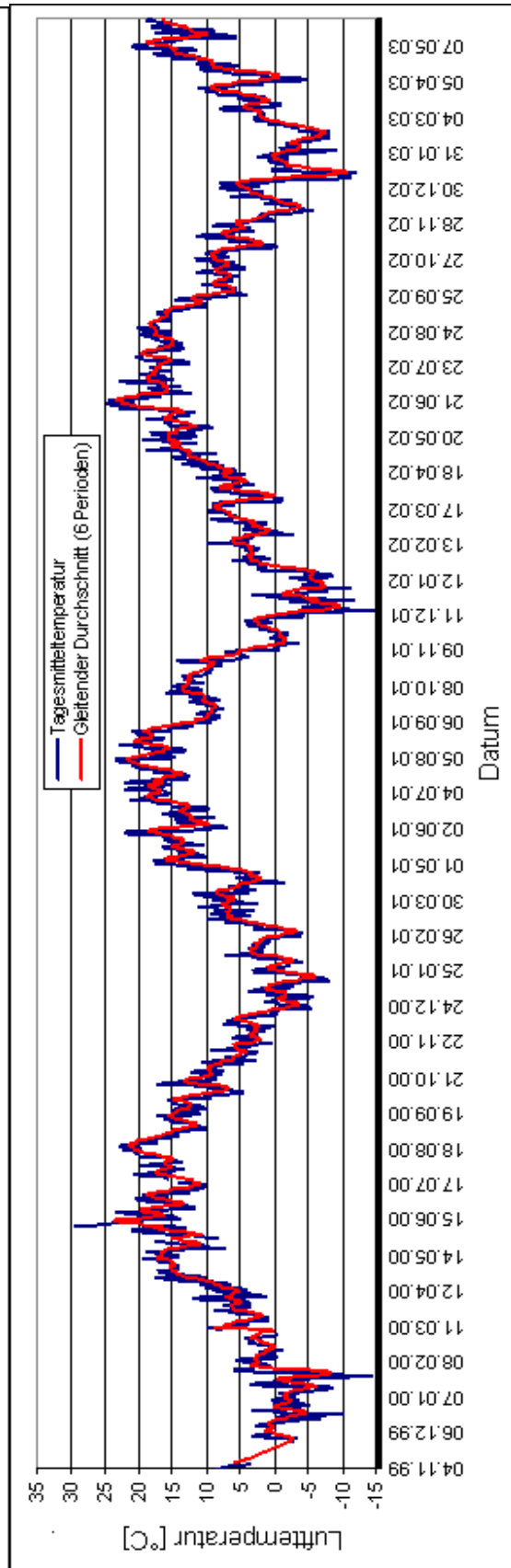
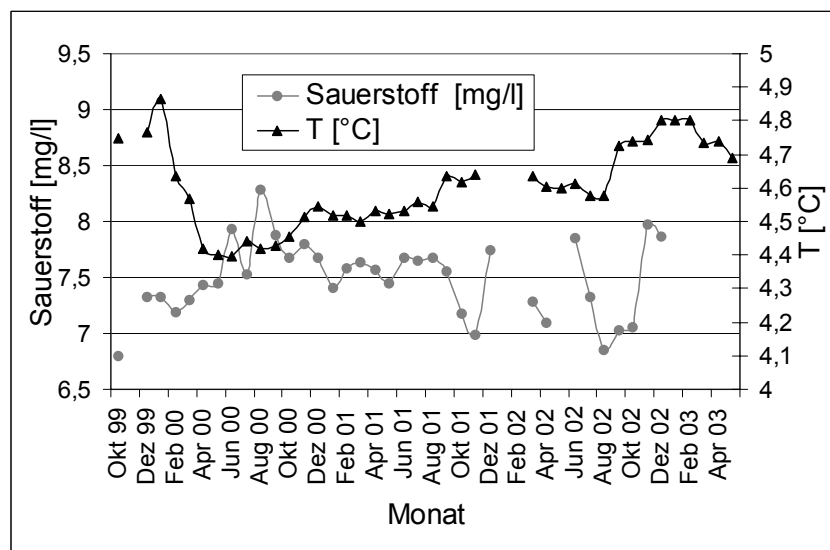


Abbildung 36: Lufttemperaturwerte im Untersuchungszeitraum (Messstelle Schönau)

(Datenquelle: DWD und NATIONALPARK BERCHTESGADEN)

In diesem Zusammenhang ist es von Bedeutung, die Frage der Erneuerung bzw. des Austausches von Tiefenwasser im Königssee zu diskutieren. Die von LIVINGSTONE (1997) bei tiefen Seen festgestellte „sägezahnartige“ (vgl. Kap. 3.1) Temperaturveränderung des Tiefenwassers ist in den Messergebnissen erkennbar. Sie entspricht auch den Beobachtungen von HOLLAN (2001). Er verweist ebenso darauf, dass die Erneuerung des Tiefenwassers nicht jedes Jahr im gleichen Maße stattfindet. Wie und ob es tatsächlich zu einer Erneuerung kommt, kann man gut verfolgen, wenn man zu den Temperaturwerten noch den Sauerstoffverlauf hinzu zieht.

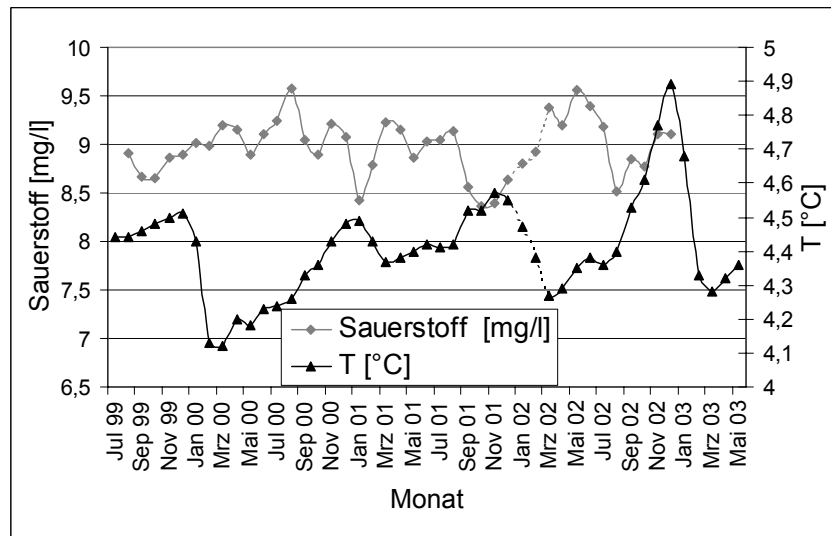
Abbildung 37 zeigt, die aus den einzelnen Messmonaten und über die drei Messtiefen (60, 80 und 100m) gemittelten Temperatur- und Sauerstoffwerte über den Untersuchungszeitraum. Bis in diesen Tiefenbereich sieht man, dass eine Absenkung der Temperatur auch gleichzeitig mit einer Erhöhung des Sauerstoffgehaltes zu den Zirkulationszeiten einher ging. Noch deutlicher ist dies in Abbildung 38 für den Tiefenbereich 120-160m zu erkennen. Lediglich im Winter 2002/2003 ist in dieser Graphik der Trend nicht auszumachen, da keine Sauerstoffwerte vorliegen.



**Abbildung 37: Sauerstoff- und Temperaturverhalten des Tiefenwassers (60m, 80m und 100m) an der Echowand**

HOLLAN (2001) beschreibt die Erneuerung des Tiefenwassers im Bodensee durch das seitliche Einschichten von seeeigenem Wasser eines anderen Teilbeckens des Gewässers. Sich dort befindliches Wasser mit höherer Dichte könnte demnach in die tieferen Bereiche gleiten. Eine ähnliche Situation könnte man auf Grund der morphometrischen Situation des Königssee auch erwarten. Da sich aber zwischen dem Nord- und Südbecken des Königssees eine deutliche Schwelle mit einer engen

Austauschfläche befindet, war dies am Königssee an Hand unserer Untersuchungen nicht nachweisbar.



**Abbildung 38: Sauerstoff- und Temperaturverhalten des Tiefenwassers (120m, 140m und 160m) an der Echowand**

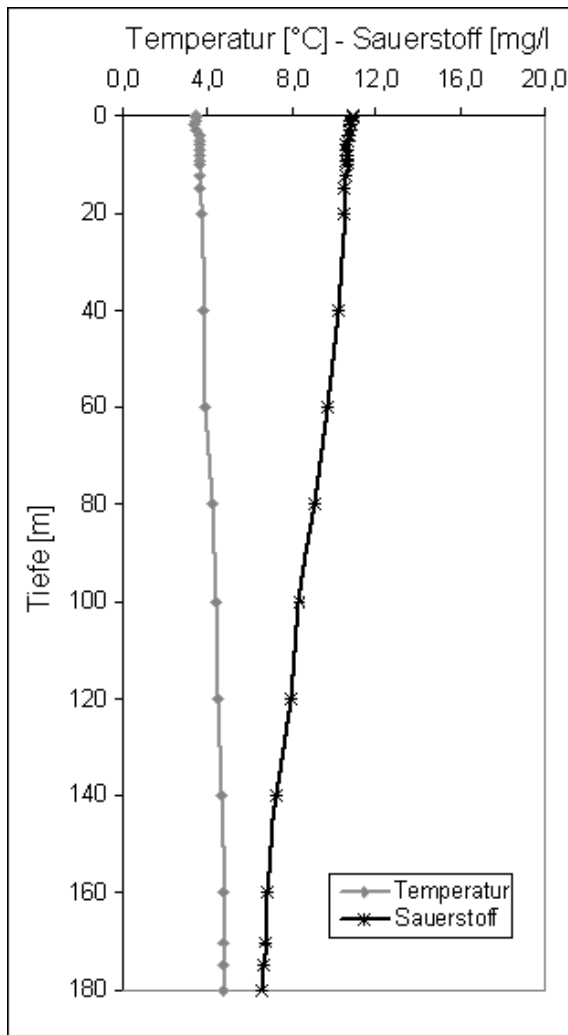
(Gestrichelte Linie: Werte interpoliert)

Der Vollständigkeit halber muss noch erwähnt werden, dass die mit zunehmender Tiefe steigenden Dichteverhältnisse auf Grund des anwachsenden Gehaltes an gelösten Stoffen die temperaturbedingten Dichteverhältnisse überlagern, so dass es zu einer inversen Tiefentemperaturschichtung kommt (vgl. auch BARTHELMESS 1997 oder SIEBECK 1982).

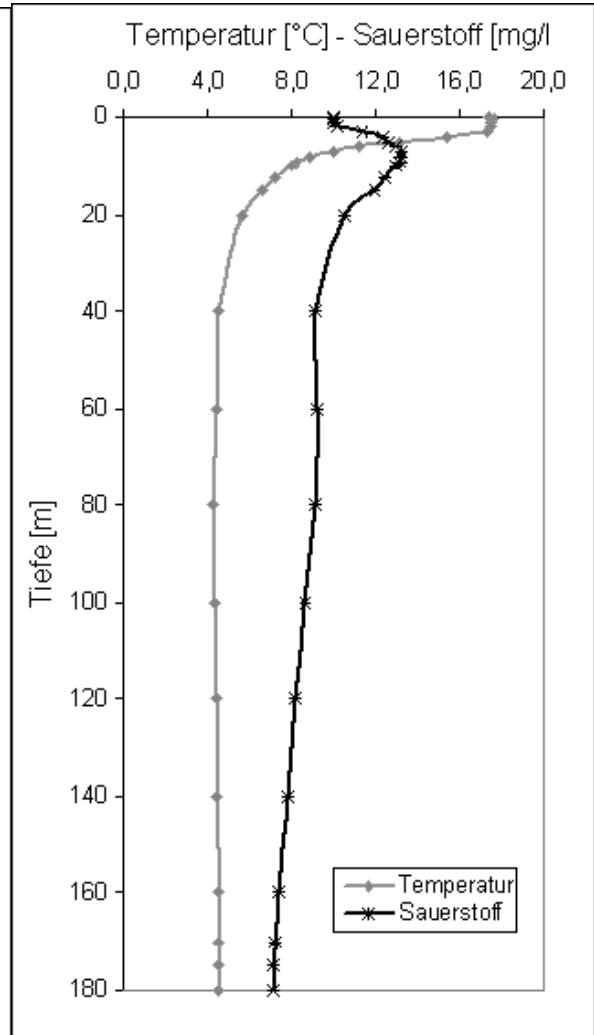
### 5.3 Zur Sauerstoffverteilung im Königssee

Der Königssee gehört zur Gruppe der Seen, die nach der Einteilung von ÅBERG und RODHE (1942, zit. nach HUTCHINSON 1957) mit einem  $\beta$ -orthograden Verlauf der Sauerstoffverteilungskurve mit leicht positiv heterograden Überprägung ausgestattet sind. Dies ist auch schon von MÜLLER (1981) und MICHLER (1987) festgestellt worden. In Abbildung 39 und Abbildung 40 stehen ein typisches winterliches und sommerliches Tiefenprofil gegenüber. Das Vorhandensein von Sauerstoffmaxima im oberen Bereich des Sees zur Zeit der Sommerstratifikation führt zur Ausweisung des Profils als positiv heterograd.





**Abbildung 39: Sauerstoff- und Temperaturwinterprofil des Königssees vom 02.02.00**



**Abbildung 40: Sauerstoff- und Temperatursummerprofil des Königssees vom 29.08.00**

Auch bei Betrachtung der Abbildung 41 und Abbildung 43, welche die Sauerstoffverhältnisse im Messzeitraum für den Tiefenbereich von 0-16m darstellen, fallen als erstes die deutlichen Sauerstoffmaxima in den Sommermonaten in den Tiefen zwischen 4 und 12m bzw. 14m auf. Diese haben allerdings in den einzelnen Jahren eine unterschiedliche Ausprägung, welche sich gut mit den äußeren klimatischen Verhältnissen erklären lassen.

Für das Jahr 2000 soll hier einmal ein typischer Jahresverlauf beschrieben werden (Messstelle Kaurerwand, Abbildung 43): Die Ausbildung des epilimnischen Sauerstoffmaximums stand in Beziehung zur Einstrahlungsintensität und zur Windtätigkeit: Im April 2000 konnte sich dieses Maximum bei insgesamt relativ hohen Einstrahlungsverhältnissen (Abbildung 35) und moderater aber merklicher Windaktivität (Abbildung 34) deutlich ausbilden. Ende Mai, Anfang Juni 2000 waren die Sauerstoffproduktionsverhältnisse geringer, was auch seine Entsprechung in den klimato-

logischen Parametern hatte. Die Einstrahlung war geringer als in der Zeit zuvor, was gleichermaßen in der geringen durchschnittlichen Temperatur zum Ausdruck kommt (Abbildung 36). Eine Durchmischung dieser obersten Schichten infolge der Windaktivität war gegeben, es kam zu einer Abnahme der Sauerstoffverhältnisse durch Verlagerung oder Zehrung. In der folgenden Zeit bei hoher Einstrahlung und geringer Windaktivität bildete sich dann erneut ein Sauerstoffmaximum in einem relativ stabil geschichteten See (vgl. Abbildung 45) aus. Prinzipiell fördert aber die entstandene Schichtung bei Erwärmung des Sees die Entwicklung von Sauerstoffmaxima und deren Verbleib in entsprechender Tiefe, da durch die Dichteunterschiede keine nennenswerten Vertikalbewegungen möglich waren.

Anders war dies bei Windaktivität, welche dann wieder zur Durchmischung des Vertikalprofils führte. Dies zeigte sich umso deutlicher bei der Abnahme der Einstrahlungsintensität im Verlauf des Herbst 2000, bei gleichzeitig steigender Windaktivität, welche eine gleichmäßige Verteilung des Sauerstoffs im Epilimnion zur Folge hatte.

Sehr deutlich war dies auch im Spätherbst 2002 zu beobachten: Besonders starke Windaktivität und eine relativ hohe Sauerstoffproduktion bei vergleichsweise hoher Einstrahlung führten zu einer zeitlich und räumlich homogenen Sauerstoffverteilung für die Monate Oktober bis Dezember. Die zunehmende Abkühlung der Wassertemperatur und der regelmäßige Nachschub von Sauerstoff aus der Atmosphäre durch Windtätigkeit konnten die Zehrung überkompensieren.

Etwas anders sehen die Verhältnisse aus, wenn sie über das ganze Profil dargestellt werden, wie dies in Abbildung 42 am Beispiel der Echowand dargestellt wurde. Die Windaktivität vermochte nicht den ganzen Wasserkörper zu durchmischen (vgl. Kap. 5.2), was zur Folge hatte, dass diese homogene Sauerstoffverteilung im Vertikalprofil kaum erwartet werden konnte. Vermutlich kommt hinzu, dass im Hypolimnion zusätzlich eine Zehrung der Sauerstoffvorräte stattfand.

Dass Starkwindverhältnisse einen Beitrag zum Sauerstoffdargebot in den oberen Schichten des Sees haben können, ließ sich an der Echowand zeigen (Abbildung 41). Die kräftigen Winde der zweiten Dekade im November 2002 führten zu einem deutlich erhöhten Sauerstoffwert in den oberen Metern. Ähnlich waren die Verhältnisse im Juni/Juli 2002: Kräftige Zirkulation führte zum Nachschub von Sauerstoff bis in die tiefsten Bereiche des Seekörpers.

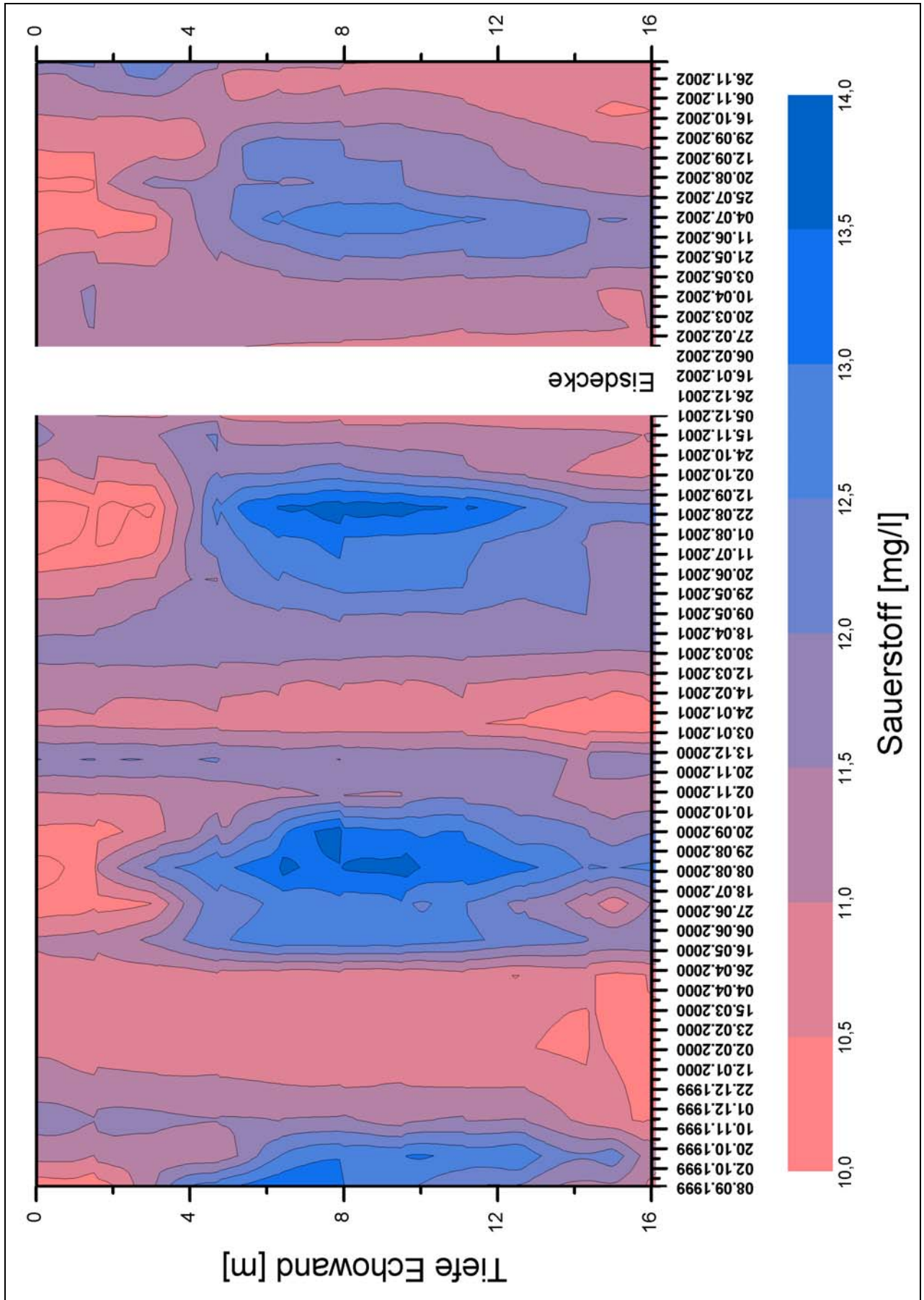


Abbildung 41: Sauerstoffverteilung an der Echowand 0m bis 16m

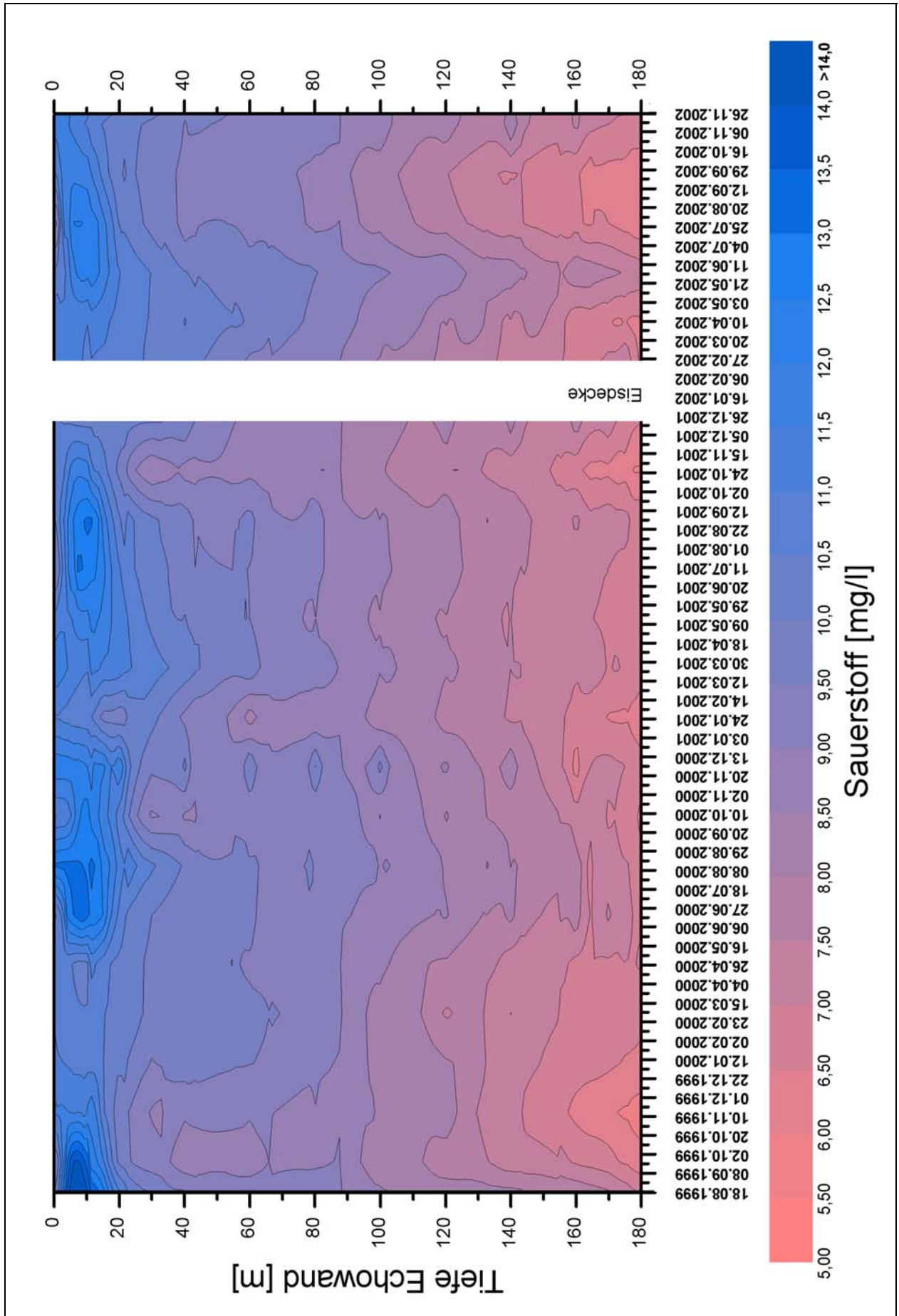


Abbildung 42: Sauerstoffverteilung an der Echowand im gesamten Tiefenprofil

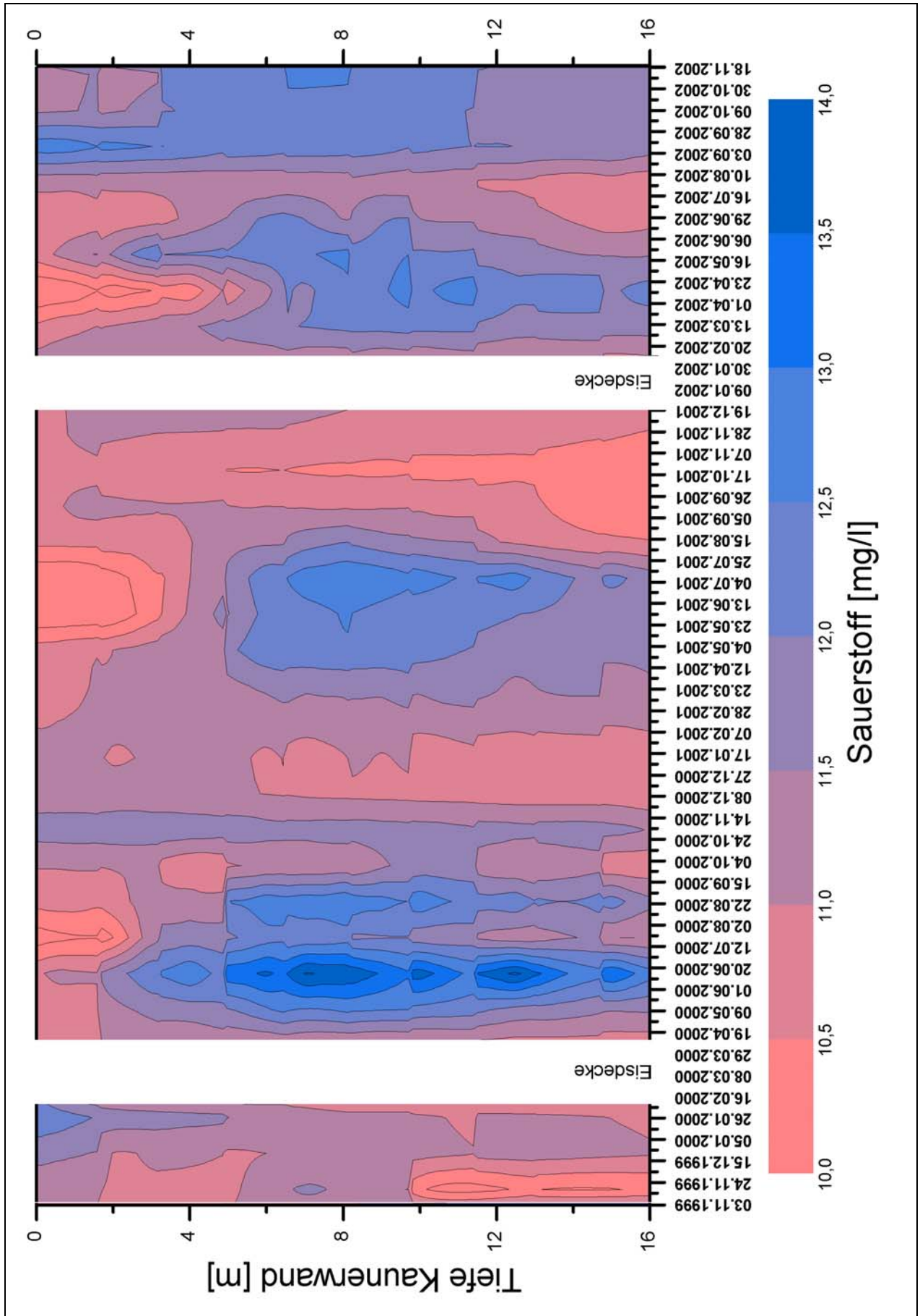


Abbildung 43: Sauerstoffverteilung an der Kaunerwand 0m bis 16m

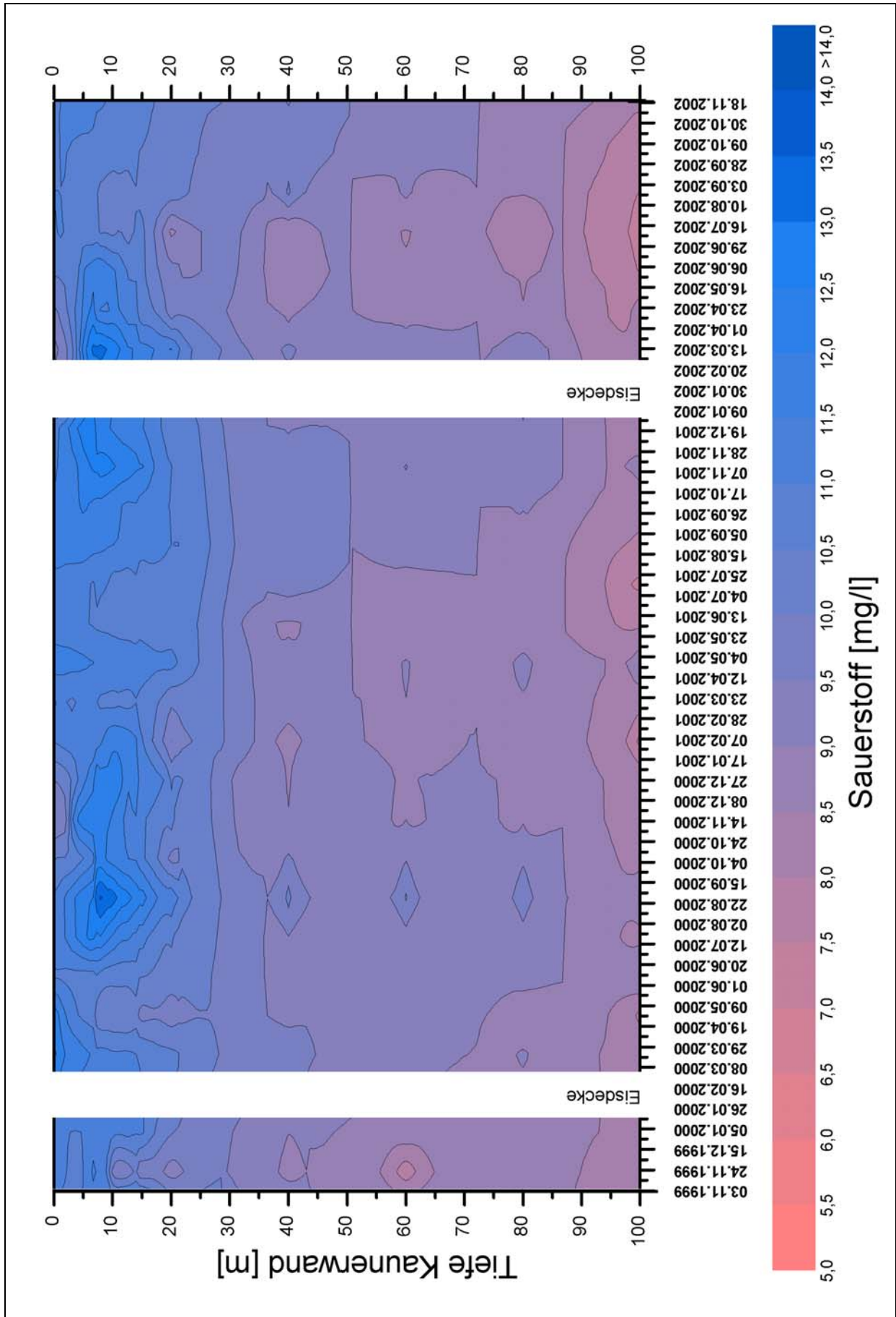


Abbildung 44: Sauerstoffverteilung an der Kaunerwand im gesamten Tiefenprofil

Noch ein Phänomen wird deutlich: Das verhältnismäßig windarme Jahr 2001 (vgl. Abbildung 34) hatte zur Folge, dass sich das Sauerstoffmaximum an der Kaunerwand punktuell mehr in den Kerntiefen aufhielt und sich weniger vertikal über das Profil verteilte, wie es in den Jahren 2000 und 2002 der Fall war (Abbildung 43). So wird klar, dass stärkere Windtätigkeit zu homogeneren Verhältnissen in der Verteilung des Sauerstoffs im Profil führten (Juni 2000 oder im Mai 2002). Dass die Sauerstoffverteilung neben den Temperaturverhältnissen ein gutes Indiz für das Durchmischungsverhalten der obersten Meter des Königssee zu den Übergangsjahreszeiten war, ließ sich an der Kaunerwand Ende Februar, im September 2000, Oktober 2001 und September 2002 beobachten. Zudem waren die besonders warmen und windzirkulationsarmen Verhältnisse im August 2000 auch an der deutlichen Sauerstoffproduktion an der Kaunerwand nachweisbar.

### **5.4 Schichtungsstabilität im Königssee**

Abbildung 45 gibt Auskunft über die Verhältnisse zum relativen thermischen Widerstand (vgl. Kap. 4.7) nach VALLENTYNE (1957).

Da sich diese Kenngröße über den Quotienten der Dichte zweier benachbarter Wasserschichten definiert und diese Dichteunterschiede in erster Linie durch unterschiedliche Temperaturen gegeben sind, bestehen an den Orten mit dem größten relativen thermischen Widerstand auch die größten Temperatursprünge. Somit kann die Lage und Stärke der Sprungschicht verfolgt werden. Diese Kenngröße kann auch zum Vergleich der unterschiedlichen Verhältnisse in den einzelnen Jahren herangezogen werden: Bildete man beispielsweise die Summe aller thermischen Widerstandszahlen jeweils über ein Jahr, so bekäme man für 2000 den hypothetischen Wert 1746,0 (dimensionslos), für 2001 den Wert 1770,8 und für 2002 nur 1585,9 bekommen. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass es im Jahr 2002 eine deutlich geringere Schichtungsstabilität als in den zwei Jahren zuvor gegeben hatte. Dafür lassen sich klimatische Einflüsse wie Windtätigkeit verantwortlich machen.

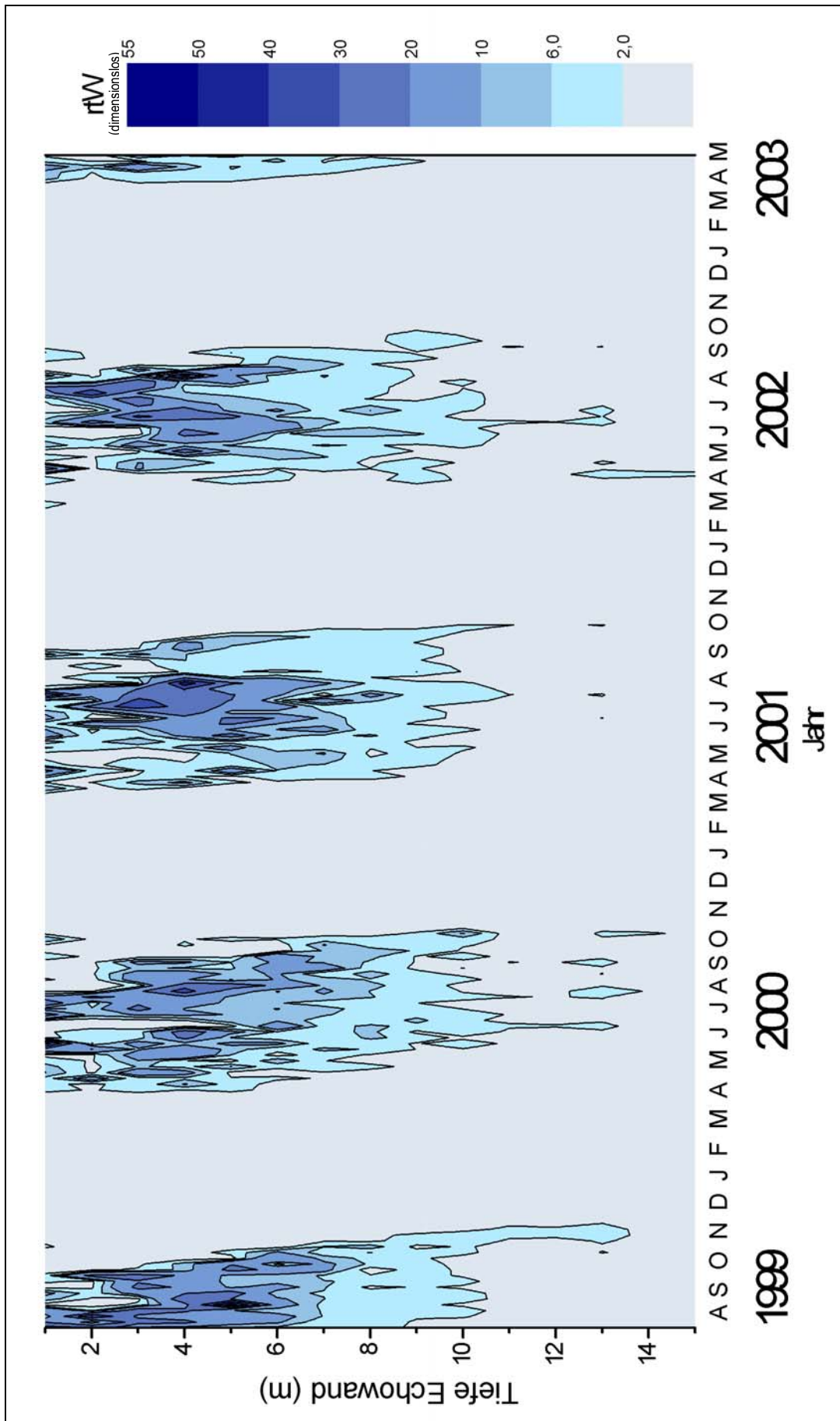


Abbildung 45: Relativer thermischer Widerstand im Königssee an der Echowand





**Abbildung 46: Abhängigkeit der Schichtungsstabilität im Königssee von Windeinfluss und Globalstrahlung**

(Datenquelle: DWD und eigene Erhebungen)

Abbildung 46 zeigt deutlich, wie die Schichtungsstabilität durch Windereignisse reduziert werden konnte. Dies gilt vor allem für die winterlichen Verhältnisse. Im Sommer hingegen ist der Einflussfaktor Einstrahlung stärker zu berücksichtigen. In der Summe dieser Einflussfaktoren sieht man, dass die Ausbildung der Stabilität ein wenig zeitlich versetzt zu den Maxima der Einstrahlung steht: Das Seewasser musste sich erst aufheizen, damit sich eine Schichtung ausbilden konnte. Treten dann heftige Windereignissen auf, wie sie beispielsweise im Juni 2000 oder Anfang Mai 2002 der Fall waren, kam es sofort zu einer sichtbaren Erniedrigung des Stabilitätswertes. Waren nach solchen Ereignissen durch besondere Witterungsverhältnisse die Einstrahlungswerte nicht so hoch, hatte dies zur Folge, dass die Schmidtstabilität nicht unmittelbar wieder anstieg (z. B. Juni/Juli 2000).

## 5.5 Charakteristik des Einzugsgebietes

### 5.5.1 Aufteilung des Königsseeinzugsgebietes

Ein neues Ergebnis im LAKE-Projekt ist die Darstellung der Fließgewässerverhältnisse in Beziehung zu ihren Einzugsgebietspezifika mit einem GIS. Im Vergleich zur Studie von SIEBECK (1982) wurden zusätzlich zwei weitere Einzugsgebiete ausgliedert (Kaunerwand und Echowand), die auf Grund der hohen Reliefenergie fast unmittelbar in den See entwässern, ohne dass sie zuvor ein nennenswertes Gerinne ausbilden. Tabelle 7 stellt die Ergebnisse dieser Neuberechnung den Zahlen von SIEBECK (1982) gegenüber, Abbildung 49 verdeutlicht diese Verhältnisse im Kartenbild.

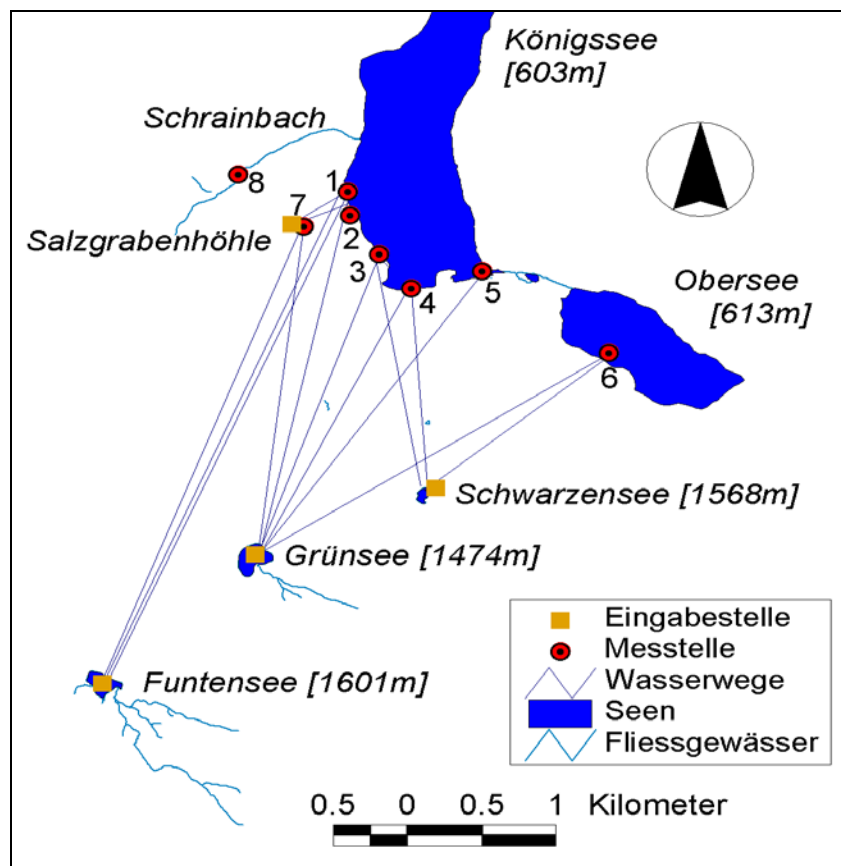
Da die Grenzen des Geländemodells nahezu mit der Nationalpark- bzw. Bundesgrenze zusammenfallen, fehlte anfangs der südliche Teil des Einzugsgebietes für eine vollständige Berechnung. Dieses Gebiet wurde somit aus der Österreichischen Karte 1:25000 (BUNDESAMT FÜR EICH- UND VERMESSESSUNGSWESEN 1996) digital ergänzt und dann im GIS neu berechnet.

EZG [km <sup>2</sup> ]	Echo- wand	Eis- bach	Schrain- bach	Ober- see	Kauner- wand	Kessel- bach	Königs- bach	Summe
<b>Nach SIEBECK (1982)</b>		14,69	50,39	39,32		15,50	11,23	<b>131,13</b>
<b>Eigene Erhebungen</b>	5,40	10,02	48,25	40,92	7,21	7,90	10,92	<b>130,62</b>

Tabelle 7: Neuberechnung der Aufteilung der Teileinzugsgebiete des Königssees

Die Bezeichnung der Einzugsgebiete deutet auf den Hauptzufluss hin, welcher in den Königssee entwässert, weitere Nebenzuflüsse der Teileinzugsgebiete haben daran zusätzlichen Anteil (vgl. Abbildung 48).

Bei dieser Betrachtung ist allerdings ein Umstand entscheidend, auf den hingewiesen werden muss: Durch die Kalkgesteine (vgl. Kap. 2.2) im Einzugsgebiet treten Verkarstungsprozesse auf. Dies bedeutet, dass zuvor zu klären ist, inwieweit das oberirdische EZG vom unterirdischen abweicht. Seit wenigen Jahren laufen unter der Leitung des Geologischen Landesamtes München Tracerversuche im Nationalpark Berchtesgaden, die für das EZG des Königssees folgende Erkenntnisse hervorgebracht haben (APEL et al. 2001):

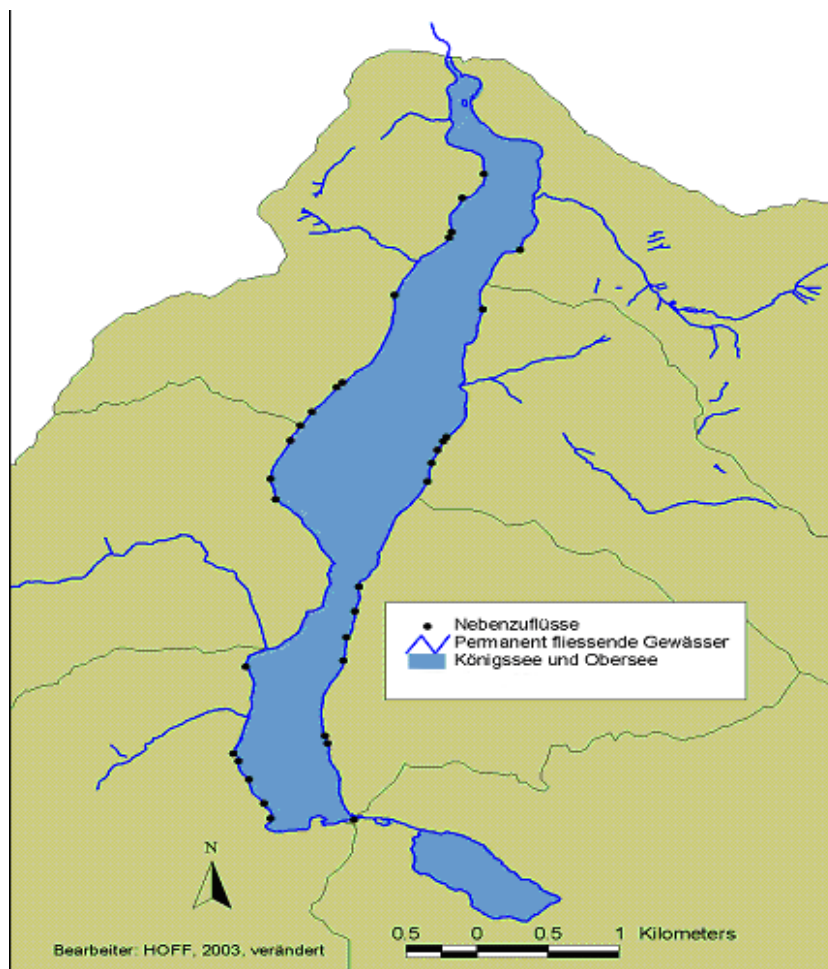


**Abbildung 47: Wasserwege im Einzugsgebiet des Schrainbachs**

(Quelle: APEL et al. 2001, verändert)

Aus den o. g. Teileinzugsgebieten Schrainbach und Obersee gelangen neben den Hauptzuflüssen und zusätzlichen Quellen über das SW-Ufer auch auf unterirdischem Wege Wasser in den Königssee. Tracereingaben am Funtensee, Grünsee und Schwarzensee konnten an den Messstellen Schradlloch (1), Kastl (2), Grüne Brunnen (3), Lagune (4), Salet (5), Obersee (6), Salzgrabenhöhle (7) und Schrainbach (8) nachgewiesen werden (Bedeutung der Ziffern in Abbildung 47). Damit ist

auch der Hinweis darauf erbracht, dass die Abwässer des Kärlingerhauses die Wasserqualität an Messstellen 1-4 beeinflussen können. Hinsichtlich der Fließgeschwindigkeit konnte festgestellt werden, dass Tracereingaben am Funtensee nach knapp drei Stunden im Königssee in ca. 60m Entfernung vom SW-Ufer zu messen waren. Dieser Wert verdeutlicht den raschen Durchgang des Wassers durch die Karsthöhensysteme. Es ist davon auszugehen, dass das gesamte Gebiet des Steinernen Meeres in den Königssee entwässert (lt. mündl. Mitteilung Herr Dr. BÜTTNER, Geologisches Landesamt von Bayern, München, 4.8.2003).



**Abbildung 48: Nebenzuflüsse in den Königssee**

(Quelle: Hoff 2003, verändert)

Im Rahmen einer Kartierung konnten dargestellt werden, welche weiteren Zuflüsse im EZG des Königssees zu finden sind (Abbildung 48). Demnach ist also festzuhalten, dass die Hauptzuflüsse nur einen Teil der Teileinzugsgebiete repräsentieren, da ein großer Teil des gesamten Einzugsgebietes diffus oder über Nebenzuflüsse entwässert wird.

5.5.2 Geologie der Teileinzugsgebiete

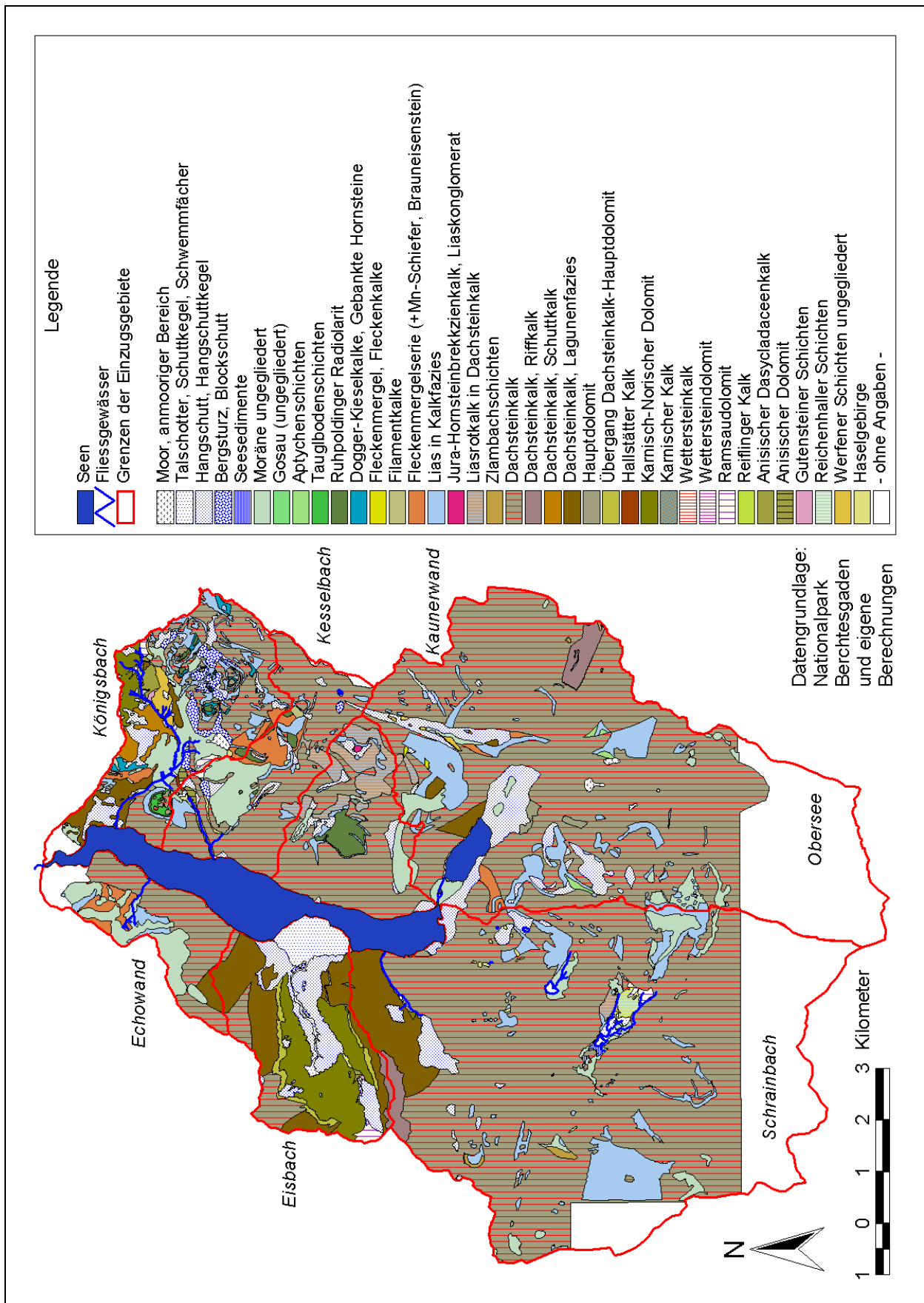


Abbildung 49: Geologische Verhältnisse im Einzugsgebiet des Königssees

## 5 Ergebnisse und Diskussion

Geologie (Angaben in %)	Hauptbestand- teile	Ober- see	Schrain- bach	Echo- wand	Kessel- bach	Kauner- wand	Königs- bach	Eis- bach
nicht kartiertes Gebiet		18,66	18,09	10,89			3,15	
Moor, anmoori- ger Bereich		0,19				0,23	0,84	
Talschotter, Schuttmaterial, Schwemm- fächer	meist CaCO <sub>3</sub> mit CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	6,56	3,38		5,62	6,04	15,17	29,30
Moräne unge- gliedert		3,45	3,47	25,50	12,70	5,82	11,96	
Tauglboden- schichten	SiO <sub>2</sub>				0,06		0,92	
Ruhpoldinger Radiolarit	SiO <sub>2</sub>		0,01		1,56	6,46	1,23	0,07
Dogger- Kieselkalke, Gebankte Horn- steine	CaCO <sub>3</sub> mit SiO <sub>2</sub>						2,28	
Fleckenmergel- serie (+Mn- Schiefer, Brauneisen- stein)	CaCO <sub>3</sub> mit Mn, SiO <sub>2</sub>	0,67	0,01	7,19	5,58		3,31	
Lias in Kalkfa- zies	CaCO <sub>3</sub> mit ger. Gehalten an Fe und Mn	7,97	7,94	4,97	6,59	4,53	10,75	
Liasrotkalk im Dachsteinkalk	CaCO <sub>3</sub> mit ger. Gehalten an Fe und Mn	0,23	0,31		3,08	16,68		
Dachsteinkalk	CaCO <sub>3</sub>	61,28	65,59	51,45	61,67	59,90	40,03	39,18
Übergang Dachsteinkalk- Hauptdolomit	CaCO <sub>3</sub> und CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>							4,65
Karnisch- Norischer Do- lomit	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		0,02				4,18	24,95
Ramsaudolomit	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		0,19		0,37		0,92	1,37
Anisischer Dolomit	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>				1,58		0,37	0,24
Werfener Schichten un- gegliedert	CaCO <sub>3</sub>	0,14	0,03				2,39	
Haselgebirge	NaCl, K <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Mg(SO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> * H <sub>2</sub> O, CaSO <sub>4</sub>		0,13		0,67		0,09	
Andere		0,83	0,84		0,53	0,35	2,40	0,24

**Tabelle 8: Geologische Verhältnisse in den Teileinzugsgebieten des Königssees**

(Datenquelle: NATIONALPARKVERWALTUNG BERCHTESGADEN und eigene Erhebungen)

Dass der südliche Teil des Einzugsgebietes von seiner Ausstattung her nicht im GIS des Nationalparks erfasst ist, führt zu einem methodischen Problem, da geplant war, die Spezifik des Hauptgewässers des Einzugsgebietes in Abhängigkeit von dessen hydrochemischer Charakteristik zu untersuchen. Dies betrifft allerdings nur die Teil-

einzugsgebiete des Schrainbachs und des Obersees. Hinsichtlich der geologischen Verhältnisse konnte entsprechend der Geologischen Karte 1:25000 (LANGENSCHIEDT u. OTHOLD 1989) die Datenbasis im GIS erweitert werden, bezüglich der Nutzung und der Vegetation war dies nicht möglich, da keine Erhebungen vorlagen. Die geologischen Verhältnisse sind in Abbildung 49 dargestellt und deren prozentuale Flächenverteilung in Tabelle 8 erfasst. Unter der Annahme, dass die Verhältnisse den sich nördlich anschließenden, noch kartierten Bereichen ähneln, entfallen auf die Teileinzugsgebiete des Obersees und des Schrainbachs über 90% Dachsteinkalke bzw. Kalke des Lias. Da vermutlich die quartäre Auflage eine ähnliche Materialzusammensetzung besitzt (Fernmoränen hat man in diesem Gebiet nicht gefunden), ist davon auszugehen, dass in diesen Gebieten der geogene Background fast ausschließlich aus  $\text{CaCO}_3$  besteht. Im Eisbachgebiet verhält es sich etwas anders: Die anstehenden Gesteine bestehen mengenmäßig größten Teils auch aus Dachsteinkalken, aber hier ist vermehrt auch Dolomitgestein mit Spuren von Mangan und Eisen zu finden. Das Lockermaterial wird sicherlich von ähnlicher Zusammensetzung sein. Geologisch abwechslungsreicher sind hingegen die Teileinzugsgebiete des Königsbachs und des Kesselbachs. Zwar dominieren auch hier Kalkgesteine, aber im Gebiet des Kesselbachs kommen noch Fleckenmergelserien (mit Mn-Schiefern, Brauneisenstein, Quarzen und Tonmineralen) mit einem Anteil von immerhin 6% hinzu. Im Königsbachgebiet taucht ebenso dieses Material auf, es kommen aber auch noch Radiolarite und andere kieselsäurehaltigen Gesteine vor. Bei beiden Teileinzugsgebieten ist darüber hinaus damit zu rechnen, dass das Moränen- und Schuttmaterial auch noch stellenweise von diesen Gesteinen unterlagert ist.

### 5.5.3 Böden in den Teileinzugsgebieten

Hinsichtlich der Bodenverhältnisse (Abbildung 50, Tabelle 9) konnte der südliche Teil nicht ergänzt werden, da kein Datenmaterial vorlag. Dadurch können zu großen Teilen der Einzugsgebiete des Obersees und des Schrainbachs keine Angaben gemacht werden. Durch Geländebeobachtungen und durch Rückschlüsse aus den geologischen Bedingungen kann allerdings davon ausgegangen werden, dass sich im Bereich des Steinernen Meeres auf Grund der speziellen Gesteinsoberfläche und den besonderen, in dieser Höhe herrschenden Klimaverhältnissen wenig Bodenentwicklungsmöglichkeit gegeben ist.

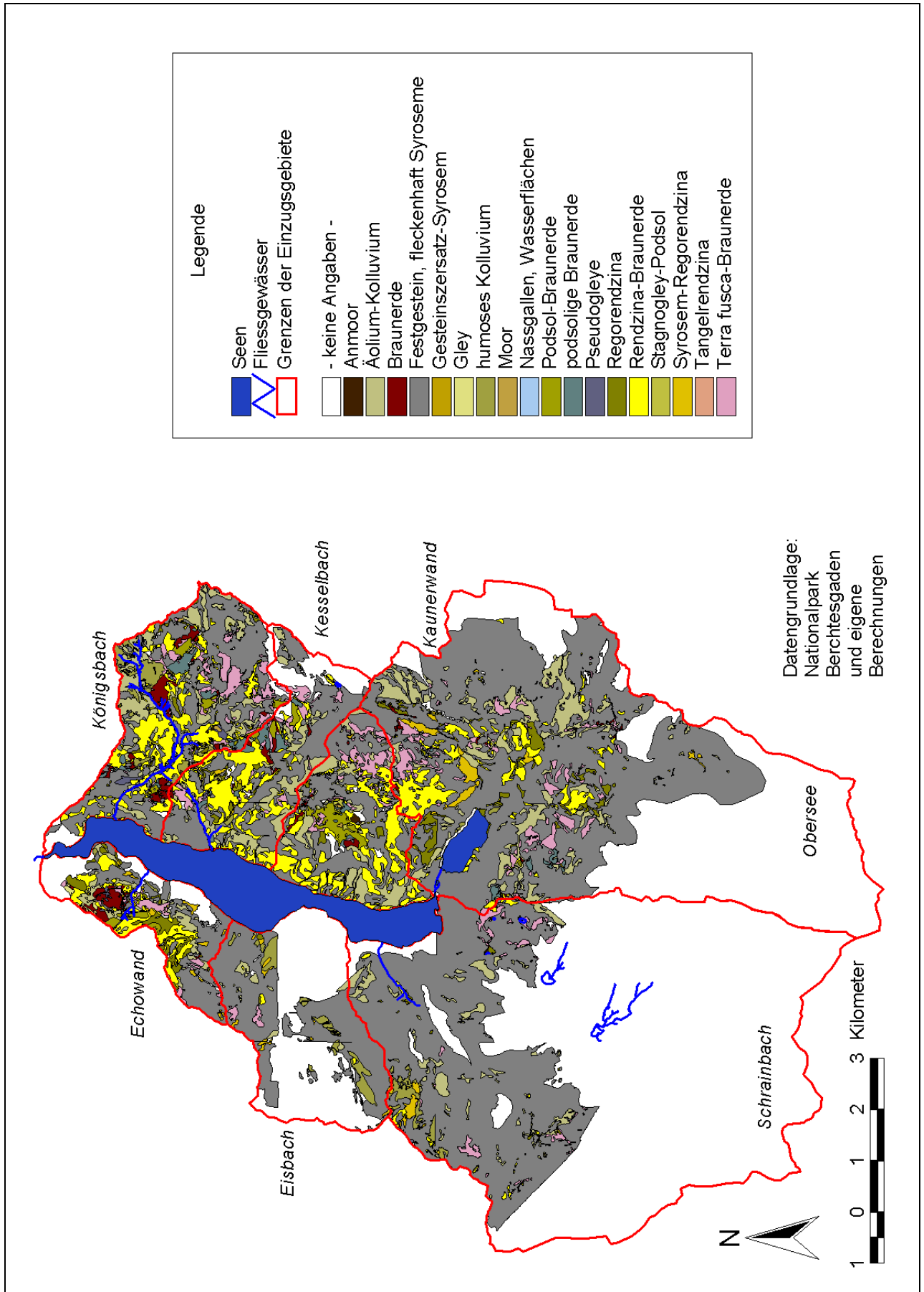


Abbildung 50: Bodenverhältnisse im Einzugsgebiet des Königssees



Boden (Angaben in %)	Ober- see	Schrain- bach	Echo- wand	Kessel- bach	Kauner- wand	Königs- bach	Eis- bach
nicht kartiertes Gebiet	38,28	67,88	23,82	14,52	2,94	5,13	50,99
Anmoor	0,00	0,02	0,04	0,02	0,39	0,19	
Äolium-Kolluvium	6,72	1,89	8,59	12,67	15,52	14,42	1,54
Braunerde	0,18	0,00	4,50	1,35	0,93	3,80	
Festgestein, fleckenhaft Syroseme	44,27	27,92	31,57	40,14	42,44	40,51	40,56
Gley	0,01		1,09	0,14		0,13	
humoses Kolluvium	0,12	0,65	0,54	0,76		4,64	4,61
Moor		0,00	0,05		0,17	0,26	
Podsol-Braunerde bzw. podsolige Braunerde	0,32	0,01	2,22	4,85	6,30	4,62	
Pseudogleye	0,04	0,01	0,57	0,14	0,09	1,24	
Regorendzina	1,67	0,13	7,67	1,32	1,18	1,46	0,19
Rendzina-Braunerde	3,63	0,31	13,35	19,53	22,85	16,82	0,29
Syroseme-Regorendzina	0,92	0,31	2,75	0,28	0,09	0,06	1,03
Terra fusca-Braunerde	2,73	0,86	4,05	5,29	7,02	7,04	0,79
Andere	0,02			0,08	0,09	0,03	

**Tabelle 9: Bodenverhältnisse in den Teileinzugsgebieten des Königssees**

(Datenquelle: NATIONALPARKVERWALTUNG BERCHTESGADEN und eigene Erhebungen)

Somit ergibt sich für die Gebiete des Schrainbachs und des Obersee-einzugsgebietes, dass sich der Flächenanteil des Festgesteins oder der geringmächtigen Syroseme auf 90-95% beläuft. Im Bereich des Eisbachs liegen die Verhältnisse ähnlich. Anders verhält es sich in den Teileinzugsgebieten des Königsbachs und Kesselbachs. Zwar nimmt der Anteil des Festgesteins auch hier den größten Teil ein, aber zumindest sind auch Braunerden und braunerdenähnliche Böden anzutreffen. Ein erhöhter Anteil an Kolluvien deutet an, dass in diesen Teileinzugsgebieten Böden mit vergleichsweise höheren Humusgehalten anzutreffen sind.

#### 5.5.4 Vegetation in den Teileinzugsgebieten

Auch bezüglich der Vegetationsausstattung (Abbildung 51, Tabelle 10) stellen die Teileinzugsgebiete Schrainbach und Obersee eine Sondersituation dar. Schütterere Vegetation im Pionierstadium bildet hier den größten Anteil, wenn auf den Karstoberflächen des Steinernen Meeres überhaupt Vegetation gefunden werden kann. Lediglich Kalkmagerrasen haben noch einen nennenswerten Anteil an der EZG-Vegetation.

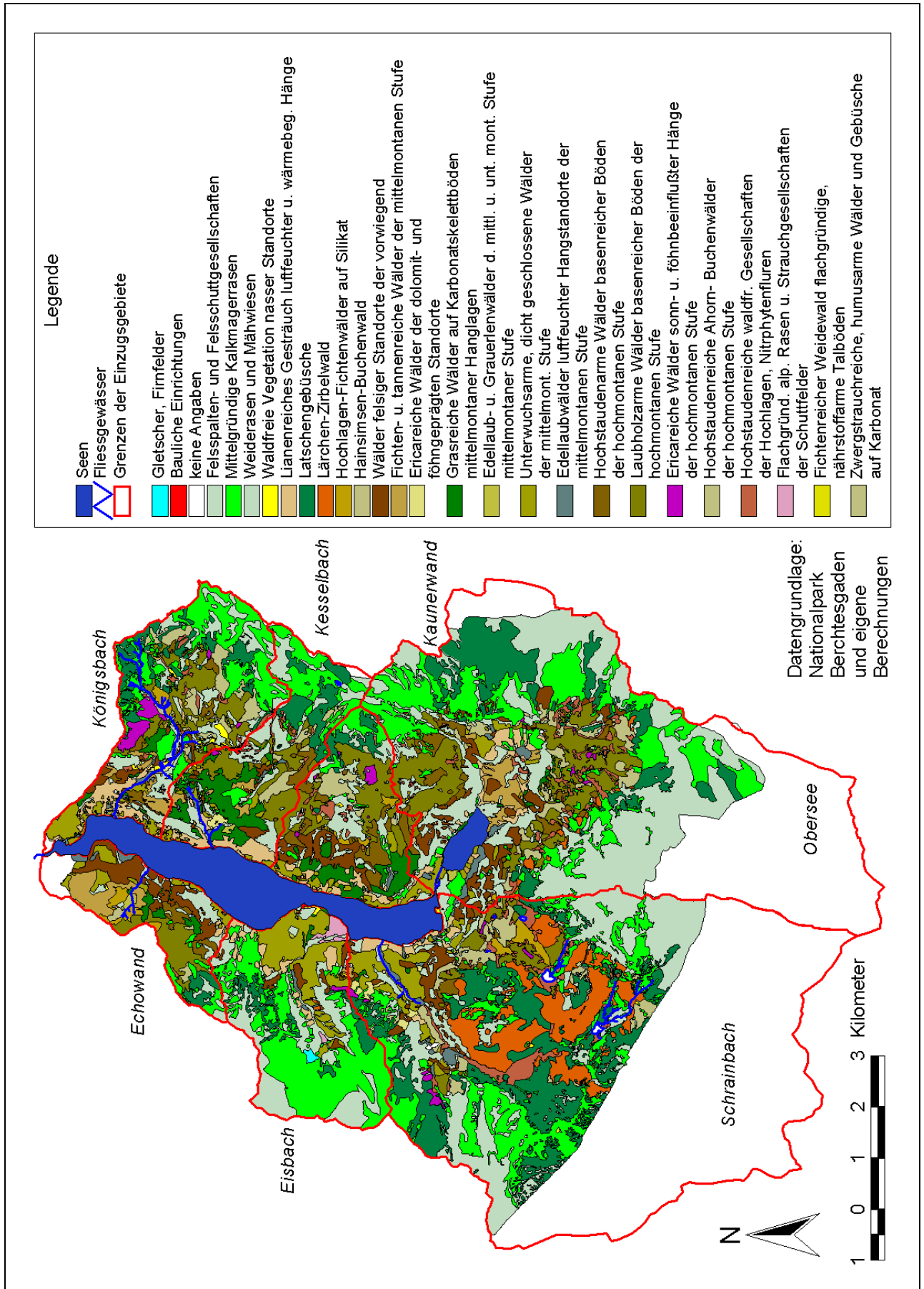


Abbildung 51: Vegetation im Einzugsgebiet des Königssees

## 5 Ergebnisse und Diskussion

Vegetationskomplex (Angaben in %)	Ober- see	Schrain- bach	Echo- wand	Kessel- bach	Kauner- wand	Eis- bach	Königs- bach
nicht kartiertes Gebiet	27,92	44,10	8,60	1,31			0,87
Felsspalten- und Fels- schuttgesellschaften	24,25	13,13	10,77	12,07	5,94	26,30	8,23
mittelgründige Kalkmagerrasen	13,57	9,49	5,05	14,86	6,21	38,74	22,50
lianenreiches Gesträuch luftfeuch- ter und wärmebegünstiger Hänge	1,37	0,68	0,83	6,28	4,67	4,29	5,14
zwergrauschreiche, humusarme Wälder u. Gebüsche auf Karbonat	1,39	1,71	1,06	1,60	4,96	0,13	6,28
Hochlagen-Fichtenwälder auf Silikat	0,06	0,58	4,25	0,21	1,79	0,09	1,41
Ericareiche Wälder der dolomit- u. föhngeprägten Standorte		0,38		1,00	0,15		0,32
Grasreiche Wälder auf Karbonat- skelettböden mittelmontaner Hanglagen	0,38	0,05	3,31	14,32	11,38	0,54	1,68
Fichten- u. tannenreiche Wälder der mittelmontanen Stufe	1,55	0,04	11,17	2,44	0,03	0,09	3,08
Wälder felsiger Standorte der vor- wiegend mittelmontanen Stufe	3,19	1,49	18,16	2,37	9,39	2,54	2,72
Unterwuchsarme, dicht geschlossene Wälder der mittelmontanen Stufe	1,03	2,29	7,60	2,66	6,13	15,76	4,92
Edellaubwälder luftfeuchter Hang- standorte der mittelmontanen Stufe	0,62	0,56	1,77	1,63	0,46	0,43	1,24
Hochstaudenarme Wälder basenreicher Böden der hochmontanen Stufe	1,74	0,41	4,72	3,10	9,84	0,16	3,13
Laubholzarmer Wälder basenreicher Böden der hochmontanen Stufe	7,68	1,67	14,69	12,81	18,93	0,00	11,26
Ericareiche Wälder sonn- und föhnbeeinflusster Hänge der hochmontanen Stufe	0,12	0,29		0,15	1,23	0,27	3,20
Hochstaudenreiche Ahorn- und Buchenwälder der hochmontanen Stufe	1,11	0,65	1,29	3,18	0,41		1,36
Edellaub- und Grauerlenwälder der mittleren und unteren montanen Stufe	0,08	0,07	1,07	0,36	0,27	0,15	0,17
Hochstaudenreiche waldfreier Ge- sellschaften der Hochlagen, Nitrophytenfluren	1,87	2,17	0,19	1,45	2,47		2,20
Waldfreie Vegetation nasser Standorte	0,03	0,14	0,08	0,20	0,09	0,30	1,30
Weiderasen und Mähwiesen	2,02	0,62	0,76	7,30	10,33	0,83	8,54
Flachgründige alpine Rasen und Strauchgesellschaften der Schuttfelder		0,01		0,02		1,88	
Latschengebüsche	8,20	12,32	4,60	10,50	5,24	6,79	10,39
Lärchen-Zirbelwald	0,45	6,99		0,03		0,13	
Gewässer	1,38	0,14	0,02	0,07	0,03	0,03	0,00
Gletscher, Firnfelder						0,45	

**Tabelle 10: Vegetationsverhältnisse in den Teileinzugsgebieten des Königssees**

(Datenquelle: NATIONALPARKVERWALTUNG BERCHTESGADEN und eigene Erhebungen)

Am Eisbach sieht die Situation etwas anders aus, weil sich das EZG auch noch über Bereiche der tieferen Vegetationsstufen erstreckt. Hier können sich Vegetationskom-

plexe mit dichtgeschlossenen Wäldern der mittelmontanen Stufe und Latschengebüsche ausbilden. Sonst dominiert aber der Anteil karger Vegetationsformen.

Auch hinsichtlich der Vegetation beherbergen die Teileinzugsgebiete Kessel- und Königsbach besondere Verhältnisse: Hier nehmen die unterschiedlichen Formen des Waldes deutlich den höchsten Anteil ein und werden noch mit Gras- und Gebüschpflanzen ergänzt. Die Vegetationsverhältnisse können im Vergleich zu den anderen Gebieten als reichhaltiger angesehen werden.

### 5.5.5 Almwirtschaftliche Nutzung in den Teileinzugsgebieten

Tabelle 11 und Abbildung 52 zeigen, dass sich in den Teileinzugsgebieten Obersee und Schrainbach kaum almwirtschaftliche Nutzung abspielt. Laut Karten des Nationalparkplans ist von Süden her gelegentlich wenig intensive Schafweidewirtschaft zu erwarten. Im Gebiet des Königsbaches sind ein Fünftel der Fläche mit lichtweidewirtschaftlicher Nutzung belegt, im Gebiet des Kesselbachs rund ein Sechstel.

Angaben in %	Obersee	Schrainbach	Echowand	Kesselbach	Kaunerwand	Königsbach
Keine Weidewirtschaft	94,46	99,59	91,49	76,88	66,25	61,13
Lichtweideflächen der Almen	1,76	0,38	0,68	13,13	11,17	20,52
Wald (auch z. T. Waldweide)	3,26	0,03	7,83	19,06	19,54	10,31
Andere	0,52			0,44	3,05	8,05

**Tabelle 11: Weidewirtschaftliche Nutzung in den Teileinzugsgebieten des Königssees**

(Datenquelle: NATIONALPARKVERWALTUNG BERCHTESGADEN und eigene Erhebungen)

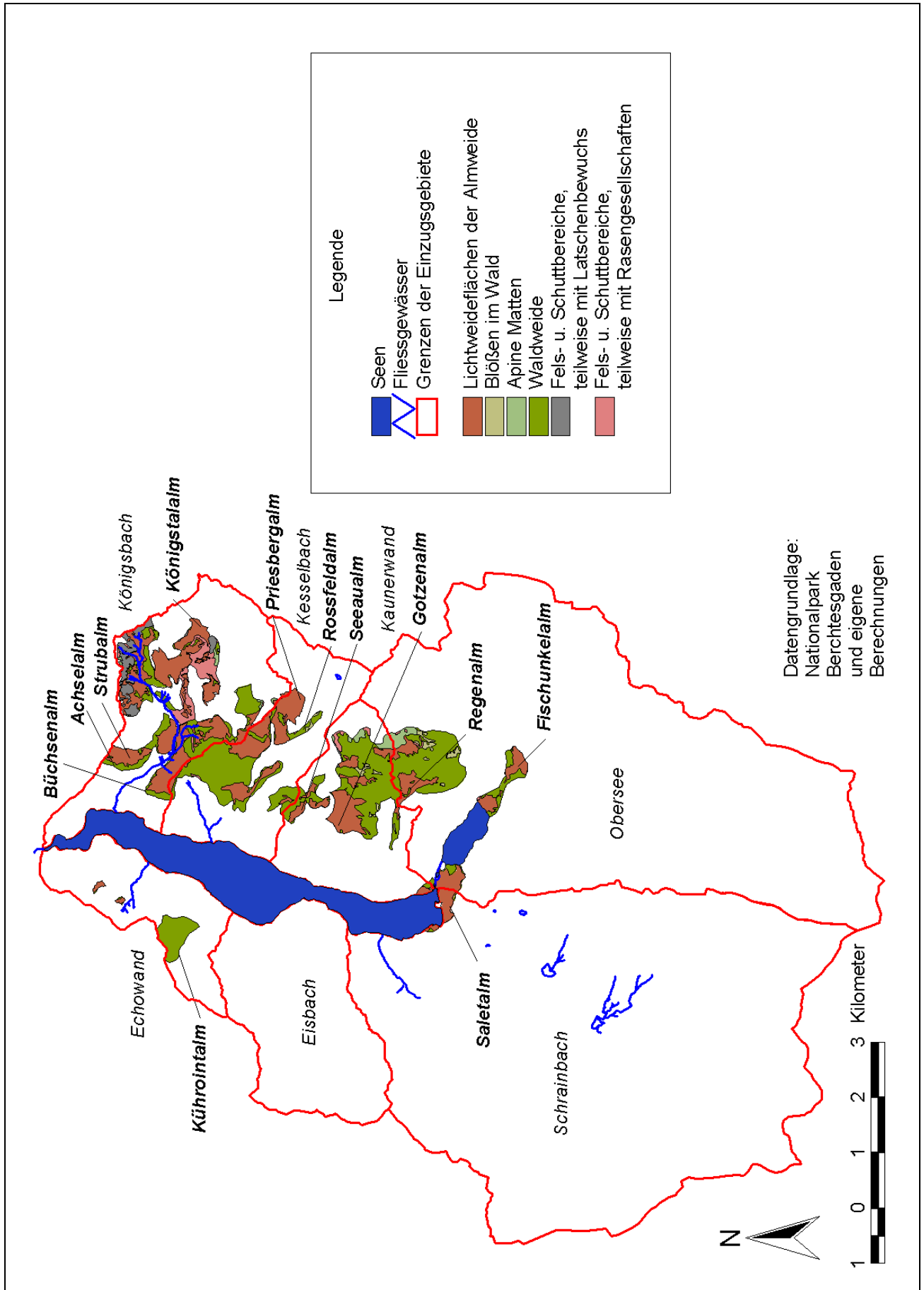


Abbildung 52: Almweideflächen mit Rinderbesatz im Einzugsgebiet des Königssees

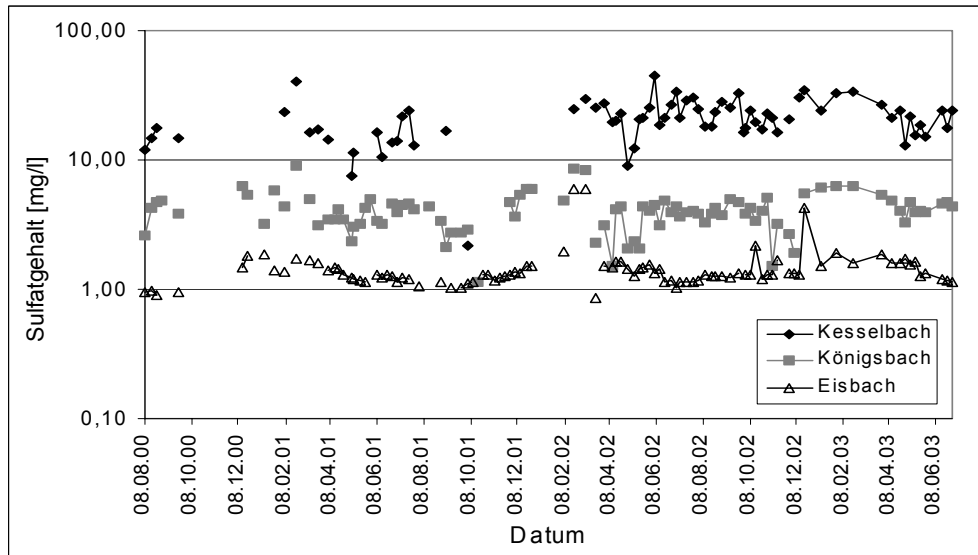
## **5.6 Zur Sulfat-, Chlorid- und Nitratdynamik**

Die Betrachtung reduziert sich auf die Stoffe, die im Projekt gemessen werden konnten, nämlich Sulfat, Chlorid und Nitrat. Ionenchromatographische Untersuchungen von Phosphat im Gewässer ergaben, dass die Werte fast ausschließlich unter der Nachweisgrenze liegen, genauso wie dies schon vor mehr als 20 Jahren der Fall war (SIEBECK 1982). Im Rahmen der Routineuntersuchungen konnte nur eine Nachweisgrenze von 0,28mg/l PO<sub>4</sub> berücksichtigt werden. Das heißt, dass über diesen Grenzwert keinerlei Veränderungen über die letzten 25 Jahre festgestellt werden konnten.

### **5.6.1 Sulfat- und Chloriddynamik in den Teileinzugsgebieten**

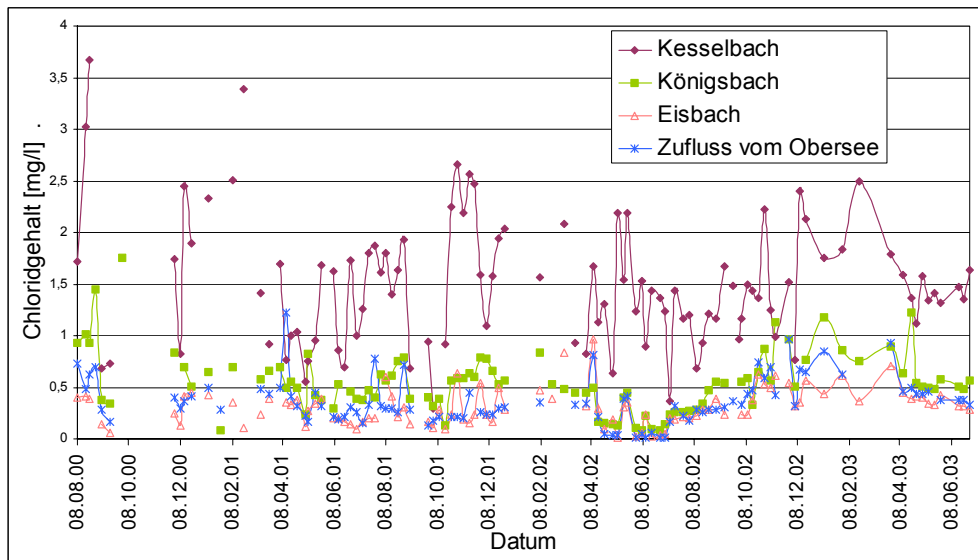
Aus den dargestellten Verhältnissen der Ausstattung der Teileinzugsgebiete (Kap. 5.5) ist zu schließen, dass sich deren Charakteristik auch im Fließgewässerchemismus widerspiegeln müsste. Anhand der geologischen Bedingungen wird dies deutlich: Abbildung 53 und Abbildung 54 zeigen, dass sich am Kesselbach und am Königsbach ganz andere Sulfat- und Chloridverhältnisse in Bezug auf Dynamik und Konzentration ergeben als beispielsweise am Eisbach. Unter Berücksichtigung der logarithmischen Skalierung in Abbildung 53 sieht man, dass mitunter die Sulfatgehalte des Kesselbachs 30-fach höhere Werte aufzeigen, als jene des Eisbachs. Im Königsbacheinzugsgebiet ist der Anteil des Haselgebirges mit sulfathaltigem Gestein etwas geringer, und die Ganglinie nimmt eine Mittelstellung zwischen den anderen Graphen ein. Ganz ähnlich verhält es sich mit den chloridführenden Gesteinen in den Teileinzugsgebieten Königsbach und Kesselbach, welche sich gleichermaßen in den Fließgewässerdaten bemerkbar machen. Hingegen zeigen die Werte der Einzugsgebiete des Eisbachs, Schrainbachs und des Obersees relativ gleichbleibende Graphen, lediglich die jahreszeitlichen Schwankungen sind erkennbar, welche aber auch in Beziehung zur Wasserführung gesetzt werden müssen (vgl. Abbildung 53 und Kap. 5.7).

## 5 Ergebnisse und Diskussion



**Abbildung 53: Sulfatgehalte ausgewählter Zuflüsse des Königssees**

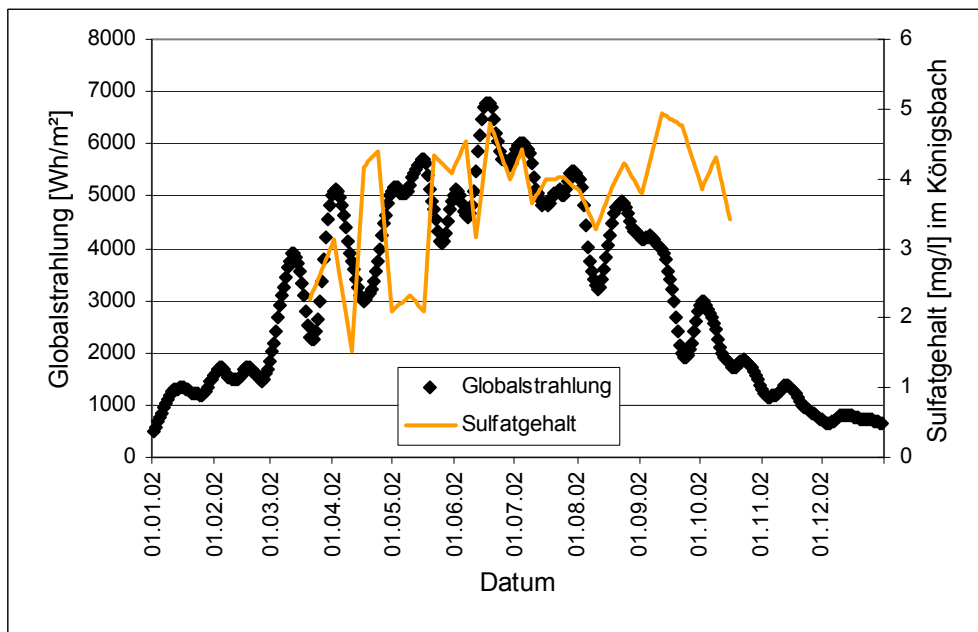
(zu beachten: logarithmische Skalierung)



**Abbildung 54: Chloridgehalte ausgewählter Zuflüsse des Königssees**

Abbildung 55 zeigt aber auch, dass das Vorhandensein von Sulfat im Fließgewässer neben den geologischen Verhältnissen auch noch im Zusammenhang mit den Einstrahlungsverhältnissen steht. Offenbar führt eine Erhöhung der Globalstrahlung auch zu einem Anstieg in der Verfügbarkeit von Sulfationen. Dieses Phänomen wird durch einen jahreszeitlichen Verlauf überlagert. In Abhängigkeit von Lufttemperatur und Abflussgeschehen weist der Sulfatgehalt von März bis November einen allmählichen Anstieg auf. Besonders deutlich ist dies in den Einzugsgebieten des Königsbachs und des Kesselbachs zu beobachten. Beim Einzugsgebiet des Schrainbachs und Eisbaches ist dieses Verhalten nur angedeutet. Offensichtlich führen die etwas

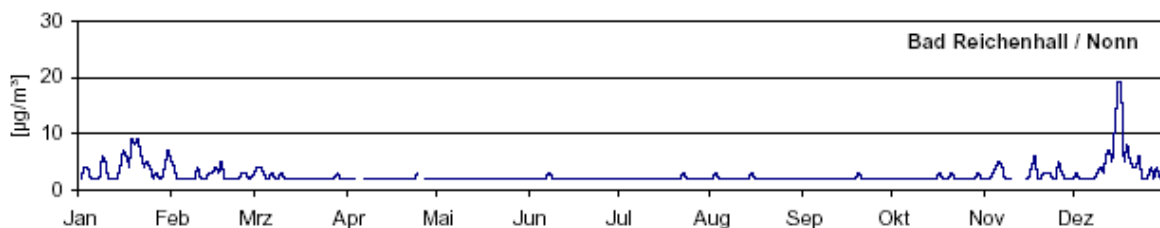
vielseitigeren Vegetations- bzw. Bodenverhältnisse des Königsbach- und Kesselbacheinzugsgebietes zu diesem Phänomen.



**Abbildung 55: Zusammenhang zwischen Globalstrahlungstageswerten und Sulfatgehalt im Fließgewässer**

(Datenquelle: DWD und eigene Messungen)

Beim Sulfat kommt noch ein weiterer Zusammenhang hinzu. Betrachtet man die Tagesmittelwerte an Schwefeldioxid für Bad Reichenhall im Jahr 2001 (Abbildung 56) im Vergleich mit den Sulfatwerten aus diesem Zeitraum in den Zuflüssen (Abbildung 53) fällt auf, dass die Peaks einem bestimmten Jahresverlauf folgen. In den Wintermonaten fallen diese im Falle des Eisbach beispielsweise mit erhöhten Sulfatkonzentrationen zusammen.



**Abbildung 56: Tagesmittelwertverläufe SO<sub>2</sub> für Bad Reichenhall im Jahr 2001**

(Datenquelle: BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ 2003)

Bei diesen Betrachtungen ist die Wasserführung der entsprechenden Fließgewässer zu beachten, welche später noch erörtert wird (vgl. Kap. 5.7). Winterlich geringe Zu-



flussmengen könnten zu einer Konzentration der Sulfatgehalte führen, wie dies z. B. in schwacher Ausprägung am Eisbach zu vermuten ist.

### 5.6.2 Sulfat- und Chloriddynamik im Königssee

Bei den Proben aus dem Königssee bezüglich des Sulfatgehaltes (Abbildung 57) ist zu erkennen, dass dessen räumliche Verteilung im Oberflächenwasser kaum differiert. Sowohl am Abfluss des Sees als auch an der Messstelle Echowand sind die Sulfatgehalte sehr ähnlich.

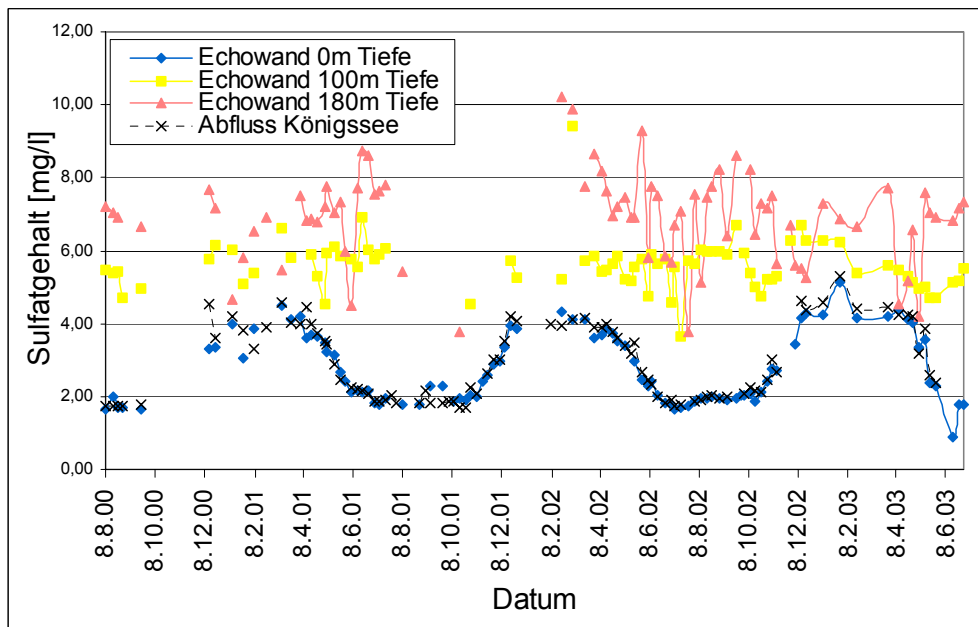
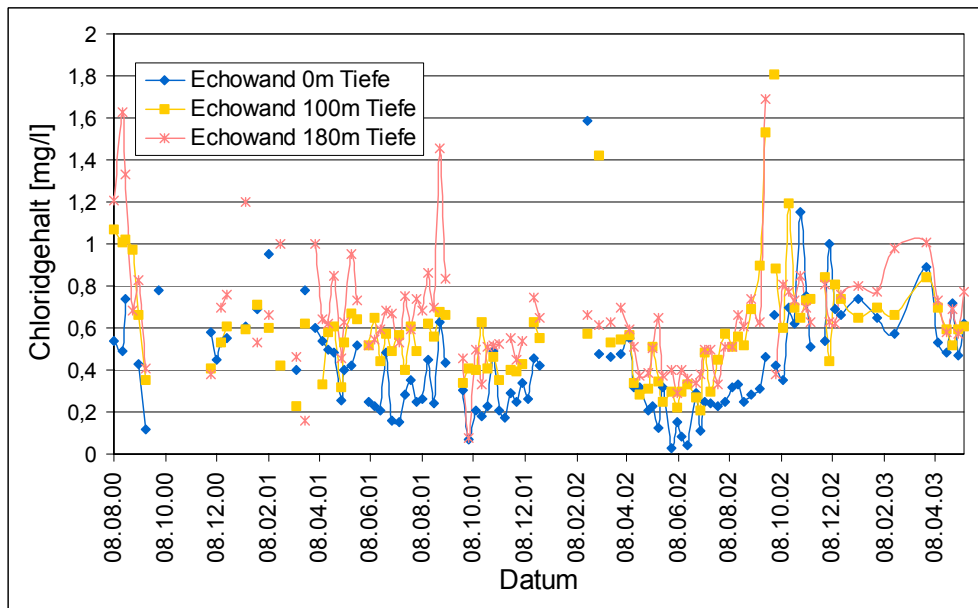


Abbildung 57: Sulfatgehalte des Königssees

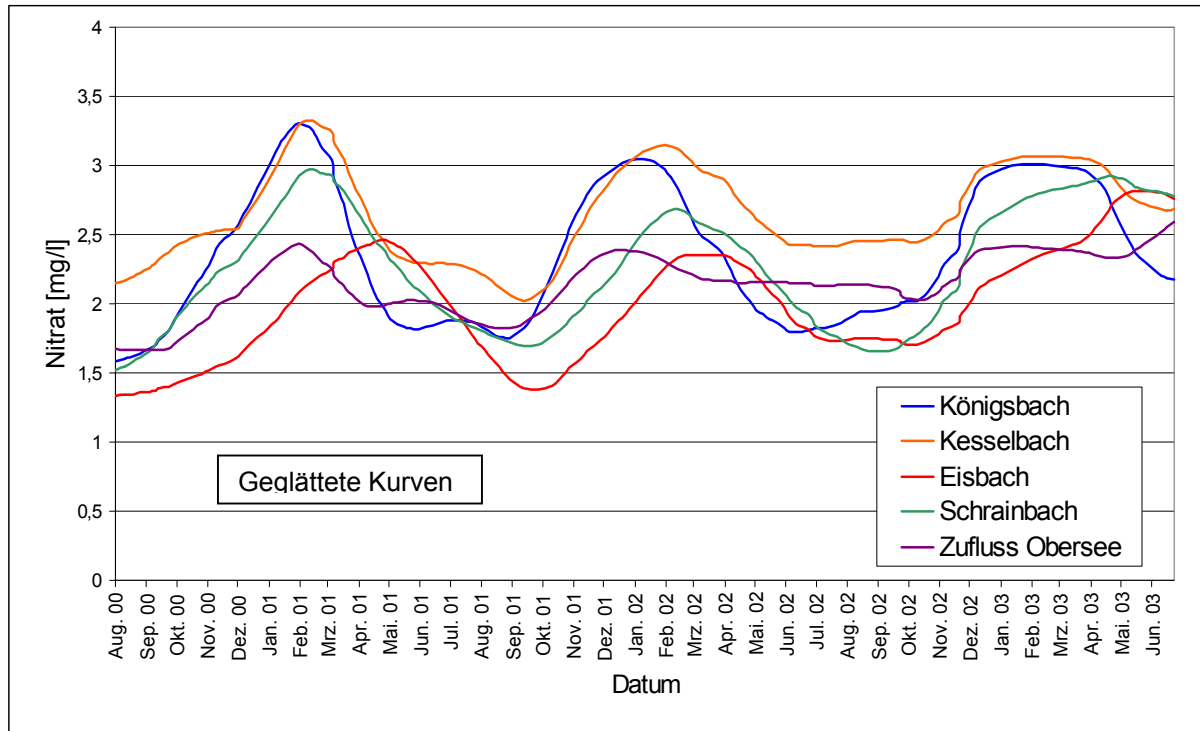
Auch beim Chlorid (Abbildung 58) verhält sich dies nicht anders. An den Oberflächenwerten des Sulfates macht sich die jahreszeitliche Rhythmik bemerkbar. In den verschiedenen Tiefen ist es schwierig, eindeutige Trends zu erkennen. Es wird aber deutlich, dass der Ionengehalt mit zunehmender Tiefe steigt.



**Abbildung 58: Chloridgehalte des Königssees**

### 5.6.3 Nitratdynamik in den Teileinzugsgebieten

Um eine Aussage über mögliche nutzungsabhängige Einflüsse zu treffen, bietet sich in erster Linie die Untersuchung der Nitratverhältnisse an. Generell ist die Betrachtung der Nitratdynamik im Gewässer jedoch aus drei Gründen schwierig: Zum einen müssen Analysen zum Eintrag von Luftstickstoff mit herangezogen werden, zum anderen ist der allgemeine Jahresstickstoffkreislauf in Abhängigkeit von Temperatur und Angebot an organischer Substanz zu betrachten, und zum dritten muss die mögliche Umwandlung in die verschiedenen Formen des Stickstoffs berücksichtigt werden. Bei letzterem ist zu bedenken, dass Untersuchungen auf Nitrit und Ammonium in den Gewässern des Einzugsgebietes des Königssees so gut wie keine nennenswerten Gehalte hervorgebracht haben. Daher ist davon auszugehen, dass sich diese Formen des Stickstoffs nur kurzzeitig im Naturhaushalt befinden und besonders rasch in Nitrat umgewandelt werden. Dies wiederum spricht dafür, dass an Hand der Nitratwerte die jahreszeitliche Dynamik für den Stickstoff ablesbar ist. Auf die Problematik, den Beitrag durch Eintrag von Luftstickstoff für den Stickstoffkreislauf zu ermitteln, wird weiter unten eingegangen. Abbildung 59 zeigt die Nitratgehalte der Hauptzuflüsse in den Königssee während des Untersuchungszeitraumes.



**Abbildung 59: Nitratgehalte der Hauptzuflüsse zum Königssee**

Deutlich erkennbar ist, dass die Nitratmengen am Kesselbach fast ganzjährig über den Werten der anderen Zuflüsse liegen. Dies könnte darauf hindeuten, dass im Einzugsgebiet des Kesselbachs eine gewisse Nutzung stattfindet. Im Gegensatz zum Schrainbacheinzugsgebiet ist die Anzahl der Almen am Kesselbach deutlich höher (vgl. Abbildung 52). Aber auch die Vegetations- und Bodenverhältnisse sind andersartig. Hier könnten Pufferungserscheinungen eine Rolle spielen. Generell ist anzumerken, dass die Nitratwerte mit Beträgen, die i. d. R. zwischen 1,5 und 3,0 mg/l liegen im gesamten UG ziemlich gering sind und den Trinkwassergrenzwert nicht einmal annähernd zu überschreiten drohen.

Die Charakteristik der Kurve des Nitratgehaltes vom Zufluss aus dem Obersee in den Königssee unterscheidet sich von denen der anderen Ganglinien. Die Schwingungen sind gedämpfter. Die Amplituden lassen sich am ehesten noch mit denen des Eisbachs vergleichen. Die gedämpfte Schwingung ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass Pufferungsprozesse im Stickstoffkreislauf des Obersees die Nitratdynamik beeinflussen. Beim Eisbach hingegen sprechen eine sehr geringe Nutzung sowie geringe Pufferfunktionen durch spärliche Vegetationsverhältnisse bei gleichzeitig geringen Bodenmächtigkeiten dafür, dass sich die Nitratgehalte insgesamt auf einem niedrigerem Level als Graph darstellen.

Letztlich lässt sich aus diesen Untersuchungen nicht zweifelsfrei ableiten, wie hoch der Einfluss auf den Nährstoffeintrag durch die Almwirtschaft ist. Die Herkunft des Nitratstickstoffs ist nicht eindeutig zuzuordnen. Eines kann aber festgestellt werden: Der Unterschied zwischen den genutzten und den ungenutzten Gebieten ist in dieser Hinsicht verhältnismäßig klein. Beispielsweise liegen im Durchschnitt die Nitratwerte von Kesselbach und Königsbach nur 0,2 bis 0,5mg/l über den Werten des Eisbachs. Darüber hinaus sind die Gesamtwerte im Vergleich zu landwirtschaftlich intensiver genutzten Gebieten ziemlich gering.

#### 5.6.4 Nitratdynamik im Königssee

Direkt im Seewasser gestalten sich die Verhältnisse etwas anders. Abbildung 60 wurde nicht mit Trendgeraden oder Spline-Linie versehen, da sich bereits aus der punktuellen Abbildung der Messwerte deutliche Aussagen treffen lassen: Die Nitratverhältnisse an der Oberfläche des Königsseegewässers unterliegen den typischen jahreszeitlichen Schwankungen, die sich aus den Prozessen des Stickstoffkreislaufes und aus den Temperaturbedingungen ableiten lassen. An allen drei Messstellen ist ein leichter, aber signifikanter Anstiegstrend zu erkennen. Mögliche Ursachen oder Zusammenhänge dafür, werden im nächsten Teilkapitel erläutert.

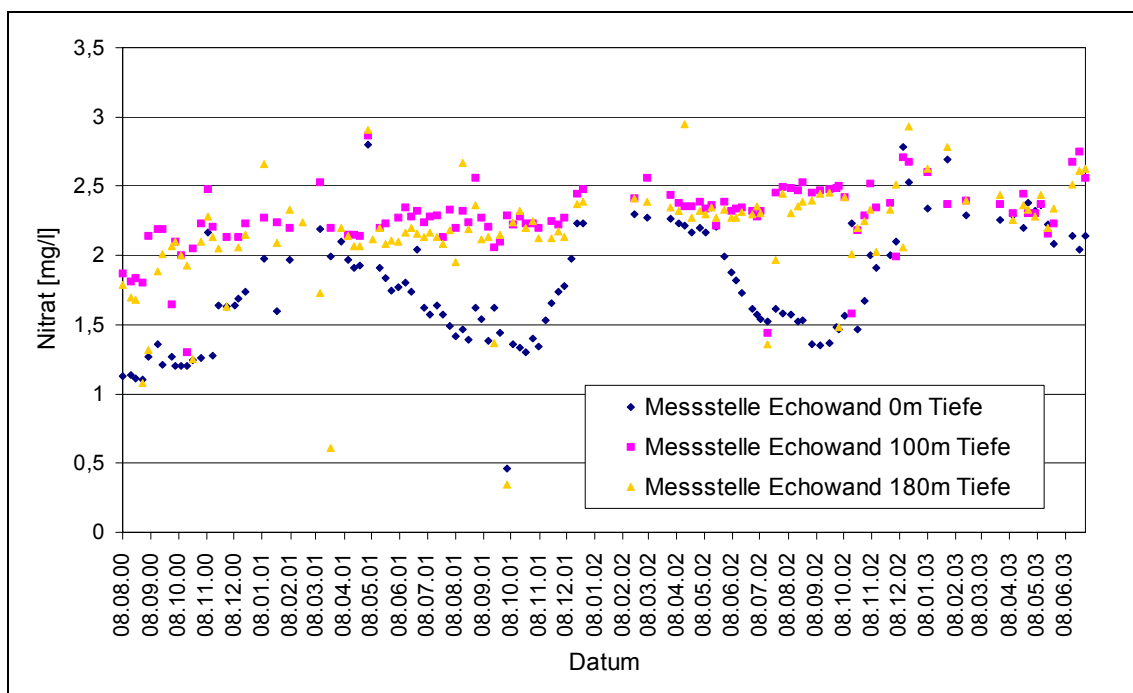


Abbildung 60: Nitratkonzentrationen im Königssee an der Messstelle Echowand

### 5.6.5 Ursachen und Zusammenhänge der Stickstoffdynamik

Zur Betrachtung des möglichen Eintrages von Stickstoff in den Stoffhaushalt im Untersuchungsgebiet bietet es sich an, die Werte der Messstation zur Überwachung der Luftqualität zu Rate zu ziehen. Direkt in Berchtesgaden gab es hierzu nur zeitlich begrenzt Untersuchungen Mitte der 90er Jahre. Ziel dabei war allerdings eher die Erforschung der lokalen und überregionalen Windsysteme in diesem Raum als das Verfolgen von lufthygienischen Interessen (u. a. HOFMANN 2002). Als nächstliegende Stationen sind Bad Reichenhall und St. Koloman zu nennen. Während sich die Station Bad Reichenhall im Stadtgebiet befindet (ca. auf 470m ü. NN), fungiert St. Koloman als Hintergrundmessstelle (diese liegt ca. 20km östlich vom Königssee auf einer Höhe von 1020m ü. NN). Beide Stationen stehen unter dem Einfluss des Autobahnverkehrs. Gerade bei der Station St. Koloman ist davon auszugehen, dass der Stickstoffdioxidtransport aus den nahegelegenen Haupttälern bzw. aus dem Alpenvorland eine große Rolle für die Höhe der gemessenen Belastung darstellt. Dies ist im Falle von St. Koloman auch mit einer Schadstoffwindrose belegt (UMWELTBUNDESAMT GMBH 2003). Anzunehmen ist, dass diese Hangaufwindverhältnisse auch auf der anderen Talseite, der Seite der Berchtesgadener Berge, anzutreffen sind, allerdings ist dies zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht durch Windmessungen belegt.

Unter der Annahme, dass der die Nitrifikation bestimmende Anteil an Ammonium auf Grund von gleichgebliebener Nutzung unverändert ist (vgl. Kapitel 2.8.1 und 2.8.2), liegt die Vermutung Nahe, dass der Anstieg an Nitrat im Gewässer mit erhöhtem Aufkommen an Stickoxiden in der Atmosphäre zusammenhängt. Auch laut Bericht der „Bundesländer Luftschadstoff-Inventur 1990-2001“ haben sich im Land Salzburg die Stickoxidemissionen kaum verringert (vgl. Tabelle 12). Die Erfolge bei der Reduzierung von Emissionen aus dem Kraftwerks- und Industriebereich wurden durch ein erhöhtes Verkehrsaufkommen wieder zunichte gemacht.

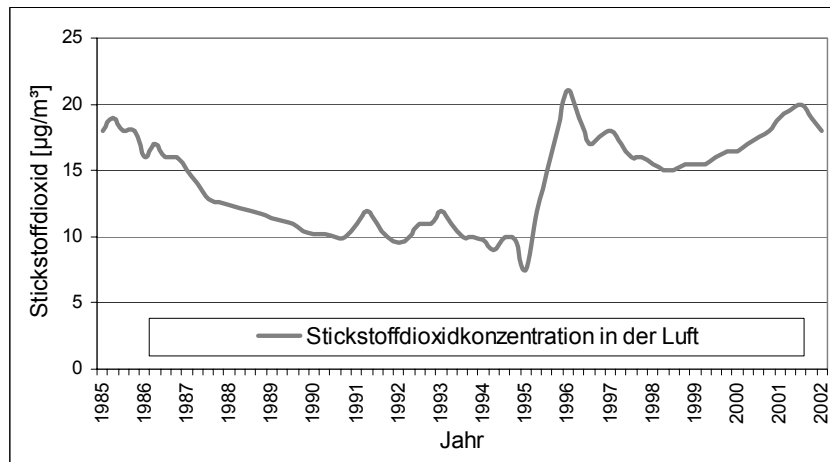
Jahr	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
<b>NO<sub>x</sub> (1000 t /Jahr)</b>	13,16	13,48	13,03	13,04	12,46	12,18	13,27	12,36	13,17	12,29	12,66	12,77

**Tabelle 12: Luftstickoxidgehalte im Bundesland Salzburg**

(Datenquelle: UMWELTBUNDESAMT GMBH 2003)

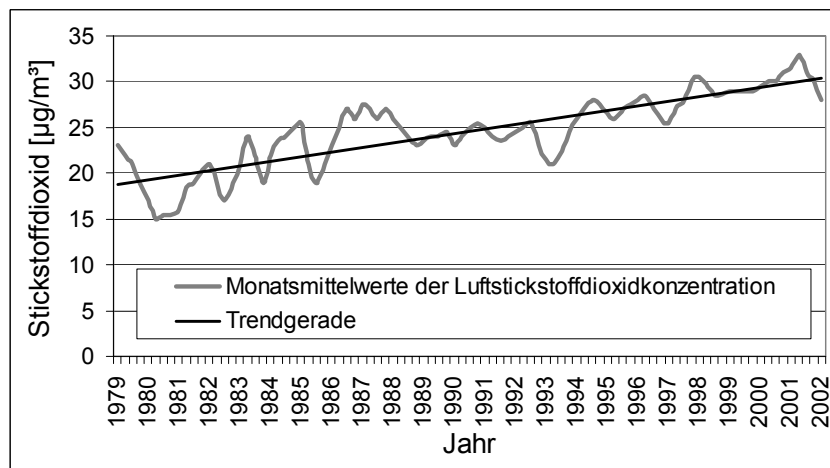
Auch die Langzeitverläufe der Stickoxide für Bad Reichenhall und Burghausen zeigen einen permanenten Anstieg. Es ist nachgewiesen, dass Luftmassen aus dem

Industriestandort Burghausen bis in den Berchtesgadener Raum vordringen (HOFMANN 2002).



**Abbildung 61: Langzeitverlauf der Luftstickstoffdioxide in Bad Reichenhall**

(Datenquelle: BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ 2003)



**Abbildung 62: Langzeitverlauf der Luftstickstoffdioxide in Burghausen**

(Datenquelle: BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ 2003)

Bei der Station St. Koloman wurden neben den Stickstoffdioxidkonzentrationen (Tabelle 14) auch noch die nassen Depositionen von Stickstoffnitrat und –ammonium aus den Niederschlagsproben ermittelt (Tabelle 13).

Insbesondere Tabelle 14 zeigt eine erhebliche Steigerung der Stickstoffemissionen in der jüngsten Zeit (2003).

Jahr	Nitratstickstoff [Jahresdurchschnitt]		Ammoniumstickstoff [Jahresdurchschnitt]	
	[mg/l]	[kg/ha]	[mg/l]	[kg/ha]
1993	*	5,85	*	*
1994	*	4,65	*	*
1995	*	6,15	*	*
1996	*	5,00	*	*
1997	*	5,60	*	*
1998	*	5,00	*	*
1999	0,45	4,36	0,46	4,48
2000	0,34	4,22	0,64	7,99
2001	0,44	5,33	0,44	5,29

**Tabelle 13: Nasse Deposition Nitrat- und Ammoniumstickstoff bei der Messstation St. Koloman**

(\* = Es liegen keine Untersuchungen vor. Datenquelle: UMWELTBUNDESAMT GMBH 2003)

Monat	Stickstoffdioxid [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]				
	1999	2000	2001	2002	2003
1	*	7	8	5	9
2	*	5	8	4	14
3	*	6	6	9	10
4	*	4	5	7	
5	4	4	4	5	
6	4	5	4	4	
7	*	4	4	4	
8	*	5	4	4	
9	5	6	4	6	
10	7	6	7	6	
11	*	7	9	7	
12	4	5	5	9	

**Tabelle 14: Stickstoffdioxidwerte der Luft an der Messstation St. Koloman**

Allerdings muss noch ein anderer Einflussfaktor in Betracht gezogen werden, der sich aus dem Vergleich der Einstrahlungsverhältnisse aller drei Jahre ergab. Die Jahressummen der Globalstrahlung hatten sich jedes Jahr gesteigert (Tabelle 15).

Jahr	2000	2001	2002
Jahressumme der Globalstrahlung [ $\text{kWh}/\text{m}^2$ ]	1057	1078	1145

**Tabelle 15: Jahressummen der Globalstrahlung Schönau am Königssee**

(Datenquelle: DWD und METEOMEDIA AG)

Als Fazit ist demnach festzuhalten, dass die Ursachen des derzeitigen Trends der Steigerung der Nitratwerte im Königsseeinzugsgebiet nicht eindeutig zuzuordnen sind. Bei Annahme gleichbleibender Stickstoffzufuhr aus dem Untersuchungsgebiet durch almwirtschaftliche und touristische Nutzung, aber steigender Nitratkonzentrationen in den untersuchten Gewässern, liegt die Vermutung nahe, dass es eine Zunahme der Stickstoffverfügbarkeit durch erhöhte Einstrahlungsenergie oder durch eine Zufuhr aus der Atmosphäre über den Zeitraum gegeben haben muss.

## 5.7 Zum Abflussgeschehen im Einzugsgebiet

Durch viele methodische Schwierigkeiten im Gelände und bei der Auswertung (vgl. Kap. 4.5) bzw. auf Grund der Komplexität des Wasserhaushaltes im EZG des Kö-

nigssees kann hier keine vollständige Abflussbilanz erstellt werden. Da an den Hauptzuflüssen automatische Pegelmessungen vorgenommen werden und diese Daten für einen Zeitraum von mehr als zwei Jahren, wenn auch mit Lücken vorliegen, sollte dieses Thema in einer anderen Arbeit noch einmal aufgegriffen werden. Sinnvoll erscheint es, dies dann mit einem Modellierungsansatz zu verknüpfen, um bessere quantitative Aussagen treffen zu können. Dies kann selbstverständlich nur unter Berücksichtigung der speziellen Karstverhältnisse im UG geschehen. Ein Ansatz zur Abschätzung des Abflussverhaltens im EZG ist bei TASCH (2002) aufgeführt.

Dennoch sollen im Rahmen dieser Arbeit die durchgeführten Untersuchungen kurz genannt werden, ohne eine Interpretation vorzunehmen. Dazu müssten noch weitere Untersuchungen folgen. Die ungefähren Abflussmengen der Teilzuflüsse werden tabellarisch dargestellt (vgl. Tabelle 16), um einen Anhaltspunkt für Betrachtungen zur Dynamik der Stoffeinträge (Kap. 5.6) zu liefern.

Zur Verdeutlichung veränderter Stoffdynamik im UG wird ein besonderes Hochwasserereignis durch hohe Niederschlagssummen im August 2002 beschrieben. Gerade bei einer möglichen Zunahme dieser Ereignisse (BAYFORKLIM 1999) ist zu berücksichtigen, dass dadurch auch eine Mobilisierung von Stoffen aus den Einzugsgebieten wahrscheinlich werden kann.

Zufluss	Abfluss	Monat												Jahresdurchschnitt
		11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>Eisbach</b>	<b>Durchschnitt</b>	<b>77,5</b>	*	*	<b>32,3</b>	*	<b>121</b>	<b>582</b>	*	<b>245</b>	<b>110</b>	<b>652</b>	<b>102</b>	<b>240,22</b>
	Minimaler Wert	28	*	*	20	*	104	436	*	244	82	286	18	
	Maximaler Wert	188	*	*	57	*	150	831	*	246	133	1943	161	
<b>Kesselbach</b>	<b>Durchschnitt</b>	<b>16,8</b>	*	*	<b>31,5</b>	<b>45,5</b>	<b>36,3</b>	<b>79,6</b>	*	<b>36</b>	<b>49,8</b>	<b>76,7</b>	<b>16,8</b>	<b>43,22</b>
	Minimaler Wert	9	*	*	25	22	31	20	*	18	17,8	38	11	
	Maximaler Wert	25	*	*	38	104	43	125	*	54	139	110	33	
<b>Königsbach</b>	<b>Durchschnitt</b>	<b>15,5</b>	*	*	*	<b>71,5</b>	<b>50</b>	<b>92,6</b>	*	<b>28,5</b>	<b>20,3</b>	<b>76</b>	<b>24,8</b>	<b>47,40</b>
	Minimaler Wert	14	*	*	*	40	48	27	*	27	14	36	18	
	Maximaler Wert	17	*	*	*	103	52	146	*	30	23	148	33	
<b>Obersee</b>	<b>Durchschnitt</b>	<b>82,5</b>	*	*	<b>141</b>	*	<b>394</b>	<b>1672</b>	*	<b>897</b>	<b>369</b>	<b>976</b>	<b>423</b>	<b>619,33</b>
	Minimaler Wert	82	*	*	*	*	286	858	*	813	253	812	76	
	Maximaler Wert	83	*	*	*	*	502	2479	*	980	463	1223	992	
<b>Schrainbach</b>	<b>Durchschnitt</b>	<b>85</b>	*	*	*	<b>156</b>	<b>223</b>	<b>572</b>	*	<b>289</b>	<b>295</b>	<b>578</b>	<b>131</b>	<b>291,13</b>
	Minimaler Wert	83	*	*	*	156	163	367	*	232	142	259	81	
	Maximaler Wert	87	*	*	*	156	261	786	*	346	698	1326	167	

**Tabelle 16: Ungefähre Abflusspenden der Hauptzuflüsse in den Königssee**

(Datenbasis: Messungen aus 2001/2002, nicht durchgehend. \* = Es liegen keine Untersuchungen vor)



Der Zufluss aus dem Obersee ist gesondert zu betrachten, da dessen Abfluss reguliert wird.

**„Hochwasserereignis“ vom 12.08.2002**

Als die Bilder von der „Jahrtausendflut“ in Dresden um die Welt gingen, hat es auch im Raum Berchtesgaden erhöhte Niederschläge gegeben. Am 12.08.2002 wurden 76mm Niederschlag innerhalb von 24 Stunden registriert. Bereits an den vorausgegangenen Tagen führten Niederschläge mit relativ hohen Tagessummen (z. B. 50mm am 6.8.2002) dazu, dass das EZG reichlich mit Wasser versorgt war. Folglich kam es zu gemessenen Spitzenabflüssen am Schrainbach von mindestens 4m<sup>3</sup>/s, was dem 13-fachen des durchschnittlichen Augustwertes entspricht. Am Eisbach konnten Abflussmengen zwischen 4,5 und 5m<sup>3</sup>/s, d. h. sogar ein 40-50-faches des Monatsmittelwertes gemessen werden.

Tabelle 17 zeigt, wie die Nährstofffrachten zu diesem Ereignis waren. Aus der Abbildung 59 können zum Vergleich die „normalen“ Werte herangezogen werden.

Gewässer	Eisbach				Schrainbach				Kesselbach			
Probennummer	E1	E2	E3	E4	S1	S2	S3	S4	K1	K2	K3	K4
Sulfat [mg/l]	1,17	0,79	0,79	0,76	0,93	0,89	0,82	0,83	13,8	13,9	18,6	18,6
Nitrat [mg/l]	0,97	0,85	0,85	0,86	1,39	1,36	1,42	1,40	2,10	2,09	2,15	2,11
Chlorid [mg/l]	1,86	0,49	0,18	0,36	22,39	6,27	1,19	0,32	2,57	0,42	1,26	0,57

**Tabelle 17: Ausgewählte Ionengehalte verschiedener Zuflüsse zu einem „Hochwasserereignis“**

Entsprechend der Verhältnisse aus Abbildung 59 zeigen die Ganglinien für Nitrat des Eisbaches und des Schrainbaches einen mehr oder weniger kongruenten Verlauf. Während des Hochwassers hingegen ließ sich beim Eisbach eine deutliche Abnahme der Nitratverhältnisse verzeichnen, die Werte erreichten etwa nur die Hälfte des für diese Jahreszeit üblichen Wertes. Verdünnung und „Auswaschung“ von Nitrat aus dem EZG durch die lang anhaltenden Niederschläge vor der Messung könnten Gründe dafür gewesen sein. Die Proben wurden am Abend des 12. August genommen, zu diesem Zeitpunkt hatte es zuvor über 40 Stunden mit zunehmender Heftigkeit geregnet. Die Schrainbachwerte hingegen blieben auf einem für den August typischen Niveau. Obwohl das Schrainbacheinzugsgebiet deutlich größer ist als das Eisbacheinzugsgebiet, ist es erstaunlich, dass es nicht ebenso zu Verdünnungseffekten kam. Der Zuwachs an Abfluss zum Hochwasserereignis ist nicht so deutlich wie

am Eisbach, aber dennoch erheblich. Das Mitführen dieser vergleichsweise hohen Nitratmengen im Schrainbach könnte damit zusammenhängen, dass aus dem gesamten Einzugsgebiet Nitratstickstoff aus natürlichen, aber möglicherweise auch aus anthropogenen Quellen mobilisiert und so zum Abfluss gebracht worden ist. Obgleich in den Untersuchungen von APEL et al. (2001) der Wasserweg von den höher gelegenen Funtensee, Grünsee und Schwarzensee zum Schrainbach nicht nachgewiesen wurde, könnte es durch die besonders hohe Wasserversorgung des Gebietes zur Zeit des Hochwassers durchaus zu einer Verbindung gekommen sein. Beim Kesselbach scheinen die Verhältnisse ähnlich zu liegen. Hier konnten am 12.8.2002 keine Abflussmessungen durchgeführt werden, aber die ermittelten Nitratwerte um 2,1 mg/l lagen nur geringfügig unter dem sonst für den August typischen Wert von 2,3-2,4 mg/l. Offensichtlich führen Extremereignisse zu einem deutlich erhöhten Stofftransport.

Auch bezüglich der Sulfatgehalte ist festzustellen, dass die Kesselbach- und Schrainbachwerte nur geringfügig abnehmen, am Eisbach hingegen ein stärkerer Verdünnungseffekt zu erkennen ist.

Die Chloridproben zeigen erstaunliche Schwankungen, obgleich diese zeitlich eng hintereinander genommen wurden. Möglicherweise deutet dies auf starke Auswaschungserscheinungen in den Teileinzugsgebieten hin.



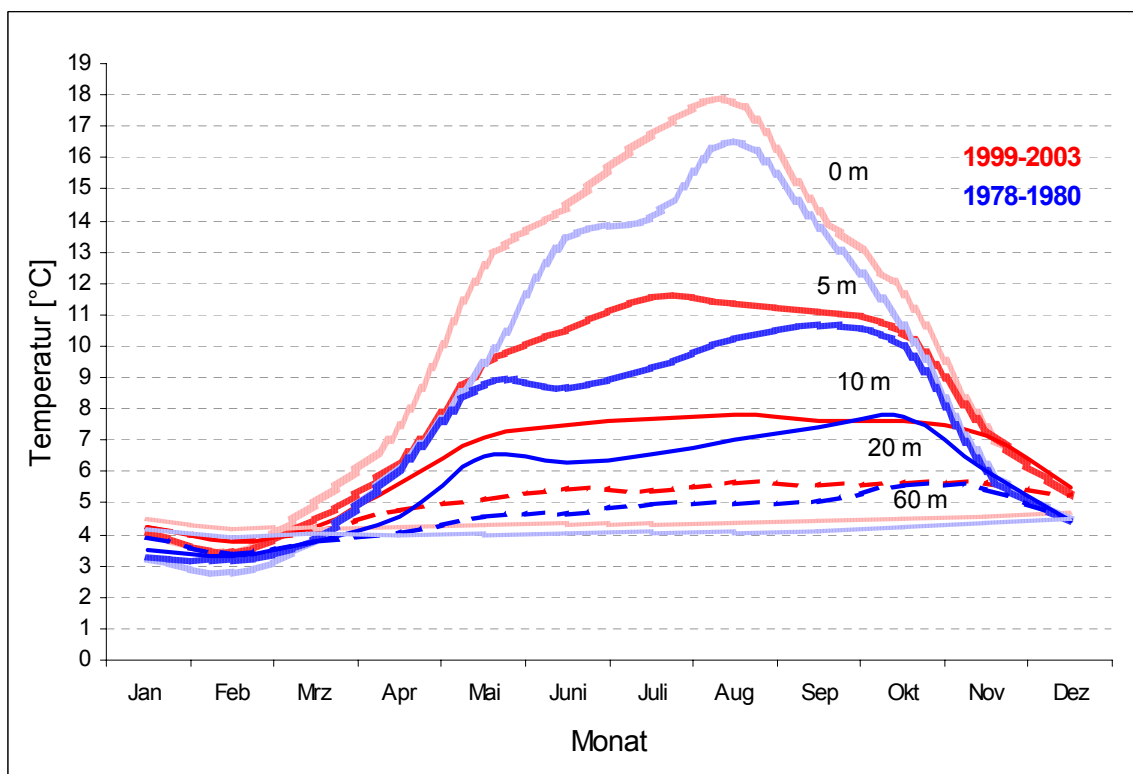
**Abbildung 63: Eintrag von Sedimenten am Kesselbach während eines Hochwasserereignisses**

(Photo: VETTER)

## 5.8 Umweltveränderungen zwischen den Zeiträumen 1978-1980 und 1999-2003

### 5.8.1 Energie- und Stoffhaushaltsveränderungen im Königssee

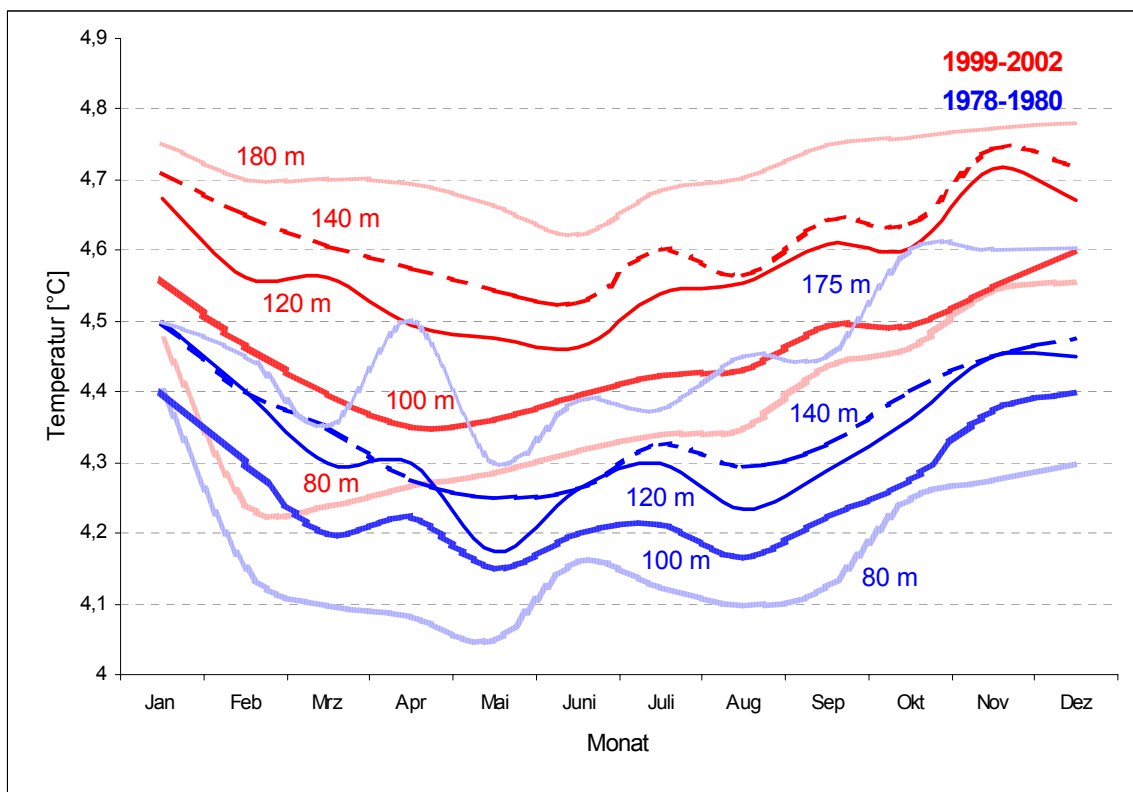
Um über einen bestimmten Zeitraum Umweltveränderungen aufzudecken, wurde ein Vergleich zu den Verhältnissen Ende der 70er Jahre aufgestellt. Deutlich fällt auf, dass sich im Energiehaushalt Veränderungen ergeben haben: Die Temperaturen zur heutigen Zeit (1999-2003) in den tieferen Schichten und an der Oberfläche des Königssees liegen merklich höher, worauf unten detaillierter eingegangen wird. Im Zirkulationsgeschehen lässt sich aber kein großer Unterschied konstatieren. Auch SIEBECK (1982) hatte isothermische Verhältnisse bis in 120m Tiefe festgestellt. Hingegen sind die Amplituden der Temperaturwerte zum gegenwärtigen Zeitpunkt höher. Während Ende der 70er Jahre diese Größe ab ungefähr 35m Tiefe nur noch um wenige Zehntel Grad Kelvin schwankte, sind heute doch Differenzen bis zu etwas mehr als einem halben Grad im gleichen Tiefenabschnitt zu messen.



**Abbildung 64: Veränderung der Temperatur des Königssees in verschiedenen Tiefen**

(Datenquelle: ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 1978, 1979, 1980 und eigene Erhebungen 1999-2003)

Abbildung 64 verdeutlicht, wie die Temperaturunterschiede im Vergleich zur Studie von SIEBECK (1982) liegen. Im Wasserkörper des Königssees konnten in den letzten Jahren Temperaturen festgestellt werden, die deutlich über den Werten liegen, die in der erwähnten Studie vor über 20 Jahren ermittelt wurden. Die im LAKE-Projekt gemessenen Werte liegen an der Oberfläche im Jahresmittel um ca. 1,3K höher. Repräsentativer sind aber die Werte der tieferen Schichten, da an der Oberfläche auftretende tageszeitliche Schwankungen nicht immer gesondert bei den Messungen berücksichtigt wurden. In 5m, einer Tiefe, die sich in den meisten Fällen schon unter dem Metalimnion befindet, lagen die Werte damals um ca. 1K niedriger. Auch in den tieferen Schichten waren noch Temperaturunterschiede im Jahresmittel feststellbar (in 20m liegen die Werte heute im Durchschnitt um 0,5K und in 60m Tiefe um 0,25K höher). Auch in noch größerer Tiefe haben sich die Hypolimniontemperaturen signifikant erhöht. Abbildung 65 gibt Aufschluss darüber.



**Abbildung 65: Veränderungen der Hypolimniontemperaturen im Königssee**

(Datenquelle: ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 1978, 1979, 1980 und eigene Erhebungen 1999-2002)

Um sich einen besseren Überblick über die genauen Werte der Temperaturveränderung zu verschaffen, sind in Tabelle 18 die statistischen Parameter arithmetisches

## 5 Ergebnisse und Diskussion

Mittel und Standardabweichung mit der Anzahl der in den Vergleich eingehenden Messungen der unterschiedlichen Zeiträume aufgeführt.

Tabelle 19 zeigt, dass die Unterschiede dieser Temperaturmessungen spätestens ab einer Tiefe von 20m hochsignifikant ( $p < 0,001$ ) sind. Dasselbe statistische Prüfverfahren wurde ebenso unter Annahme der größtmöglichen Fehlerwahrscheinlichkeit bei den Temperaturmessungen (vgl. Kap. 4.4) durchgeführt und bestätigte hochsignifikante ( $p < 0,001$ ) Unterschiede.

Tiefe [m]	Mittelwert [°C]		N			Standardabweichung	
	SIEBECK	LAKE	SIEBECK	LAKE	Insgesamt	SIEBECK	LAKE
0	10,2176	10,9331	29	133	162	5,14493	4,80848
0,5	10,6292	11,0406	24	127	151	4,82189	4,53188
1	10,8338	10,7240	34	131	165	4,65030	4,50049
2	10,1924	10,6101	33	128	161	4,45718	4,27990
3	9,9391	9,9340	32	131	163	3,93349	3,96927
4	8,9657	9,4258	47	128	175	3,26213	3,26509
5	8,6942	8,7946	26	129	155	2,96646	2,82102
6	7,7897	8,2677	34	130	164	2,51564	2,40958
7	7,6543	7,8492	23	128	151	1,96497	2,02679
8	6,7329	7,4154	49	130	179	1,79242	1,76321
9	6,7045	7,0860	22	129	151	1,45487	1,54134
10	6,1204	6,7988	37	129	166	1,47850	1,35385
11	6,5235	6,4007	17	70	87	0,81377	1,20249
12	5,8936	6,2364	45	70	115	1,05714	1,12733
13	6,0176	6,0647	17	68	85	0,65597	0,99982
14	5,5800	5,9264	25	70	95	0,91139	0,92645
15	5,3091	5,8485	22	132	154	0,88917	0,88641
20	4,7837	5,2508	43	133	176	0,58943	0,64102
40	4,1736	4,5670	47	132	179	0,21295	0,35034
60	4,1132	4,4076	34	132	166	0,14889	0,20991
80	4,1606	4,3727	33	132	165	0,10515	0,16209
100	4,2502	4,4341	46	132	178	0,08371	0,14241
120	4,3161	4,5275	31	131	162	0,10115	0,13012
140	4,3414	4,5821	29	131	160	0,09456	0,12921
160	4,3810	4,6391	29	128	157	0,09948	0,11721
170	4,4035	4,6435	26	107	133	0,09650	0,09617
175	4,4548	4,6548	27	105	132	0,09150	0,09393
180	4,4083	4,6756	6	127	133	0,07360	0,10595

**Tabelle 18: Mittelwerte und Standardabweichung der Temperaturmesswerte im Königssee**

(Datenquelle: ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 1978, 1979, 1980 und eigene Erhebungen 1999-2003)

Daraus lässt sich folgern, dass sich der gesamte Wärmeinhalt des Sees verändert hat. Abbildung 66 zeigt die Dynamik des Wärmeinhaltes von 1978-1980 (blaue Linie)

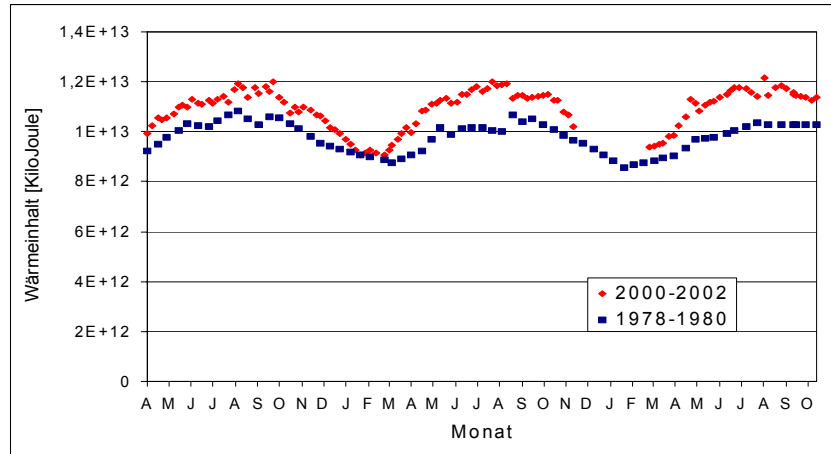
und von 2000-2002 (rote Linie). Zu erkennen ist, dass sowohl die winterlichen, als auch die Sommerwerte aus früheren Zeiten (1978-1980) unter den Werten von heute (2000-2002) liegen. Entsprechend der Modellvorstellungen zur unterschiedlich starken Veränderung der Lufttemperatur zwischen Winter und Sommer infolge des Klimawandels (BAYFORKLIM 1999, vgl. Kap. 5.1) sind die Auswirkungen im Seegewässer scheinbar ähnlich. Der Anstieg des durchschnittlichen Jahreswärmeinhalts vom Mittelwert der drei Jahre 1978 bis 1980 zum Mittelwert der Jahre 2000 bis 2002 beträgt ca. 10,5%. Nur als Größenordnung sei hier der Wert des Jahreswärmeinhalts im Zürichsee über einen ähnlich langen Zeitraum von 1970 bis 1993 genannt, dieser liegt bei ca. 10% (LIVINGSTONE 2003).

Tiefe [m] (Echo-wand)	Mann-Whitney-U	Wilcoxon-W	Z	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)
0	1743,000	2178,000	-0,810	0,418
0,5	1449,500	1749,500	-0,379	0,705
1	2159,000	10805,000	-0,274	0,784
2	2003,500	2564,500	-0,454	0,650
3	2093,500	10739,500	-0,010	0,992
4	2683,000	3811,000	-1,094	0,274
5	1580,000	1931,000	-0,465	0,642
6	1927,000	2522,000	-1,148	0,251
7	1367,000	1643,000	-0,544	0,586
8	2380,000	3605,000	-2,605	0,009
9	1113,500	1366,500	-1,612	0,107
10	1617,500	2320,500	-2,986	0,003
11	580,000	733,000	-0,161	0,872
12	1186,000	2221,000	-2,231	0,026
13	484,500	637,500	-1,029	0,303
14	606,000	931,000	-2,277	0,023
15	875,500	1128,500	-2,981	0,003
20	1561,500	2507,500	-4,474	0,000
40	850,000	1978,000	-7,419	0,000
60	517,500	1112,500	-6,978	0,000
80	584,500	1145,500	-6,603	0,000
100	830,500	1911,500	-7,483	0,000
120	431,500	927,500	-6,946	0,000
140	260,500	695,500	-7,410	0,000
160	168,000	603,000	-7,787	0,000
170	104,500	455,500	-7,517	0,000
175	174,000	552,000	-7,240	0,000
180	8,000	29,000	-4,215	0,000

**Tabelle 19: Überprüfung der Unterscheidung der verschiedenen Datensätze mit dem Mann-Whitney-U-Test unter Angabe der Signifikanzwerte**

(Datenquelle: ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 1978, 1979, 1980 und eigene Erhebungen 1999-2003)

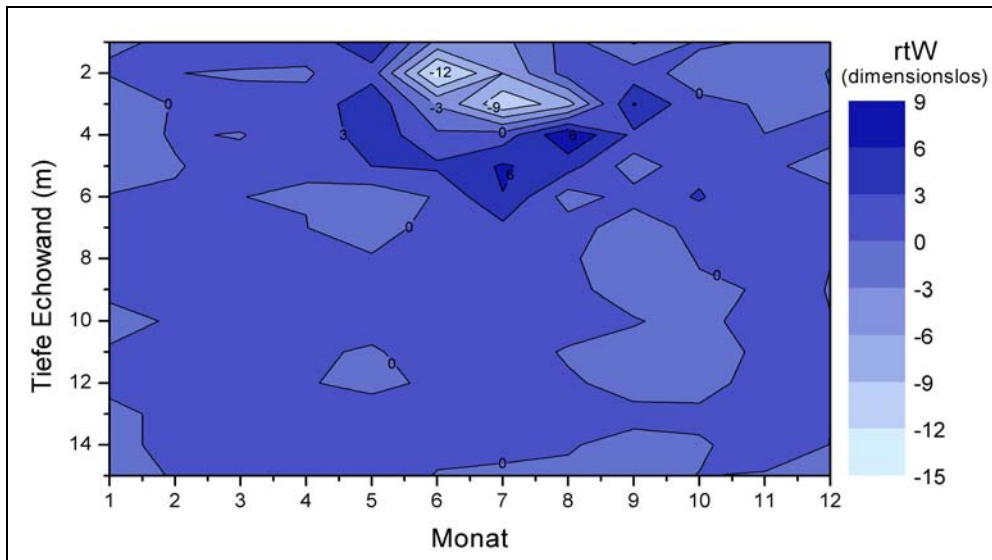
Auf Grund der geringeren Dichte wärmeren Wassers haben die oben beschriebenen Veränderungen im Wärmehaushalt zur Folge, dass sich die Schichtung und die Schichtungsstabilität verändert, wie auch aus der Abbildung 67 und Abbildung 70 hervorgeht.



**Abbildung 66: Wärmeinhaltsvergleich im Königssee**

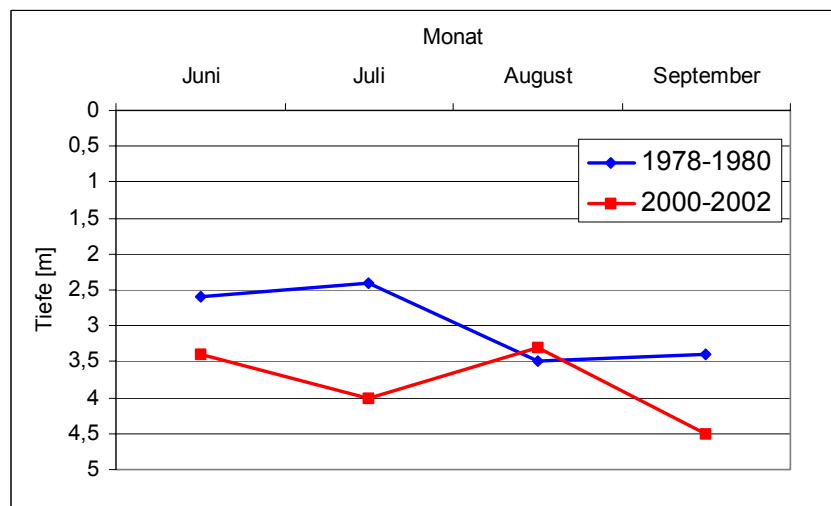
(Datenquelle: ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 1978, 1979, 1980 und eigene Erhebungen 2000-2002)

Beim Vergleich der Mittelwerte des relativen thermischen Widerstandes ( $rtW$ ) in unterschiedlichen Monaten der beiden verschiedenen Messzeiträume zeigt sich, dass in den Sommermonaten die Werte des  $rtW$  in den Tiefen bis 3 Metern rückläufig sind, während die Werte in den tieferen Bereichen (im Juli zwischen 5m und 6m Tiefe, im August zwischen 4m und 5m) gleichzeitig gestiegen sind. Hinzugekommen ist eine Zunahme des  $rtW$ -Wertes im September, den es in dieser Ausprägung früher nicht gegeben hat. Dieses Phänomen ist im Rahmen einer Sprungschichtverlagerung zu sehen, vgl. dazu Abbildung 68.



**Abbildung 67: Zu- und Abnahme des relativen thermischen Widerstandes beim Monatsmittelwertvergleich der Zeiträume 1978-1980 und 2000-2002**

(helles Blau: Abnahme des relativen thermischen Widerstandes, dunkle Färbung: Zunahme des Widerstandswertes. Datenquelle: ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 1978, 1979, 1980 und eigene Erhebungen 2000-2002)



**Abbildung 68: Vergleich der Lage der Sprungschicht im Königssee**

(Datenquelle: ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 1978, 1979, 1980 und eigene Erhebungen 2000-2002)

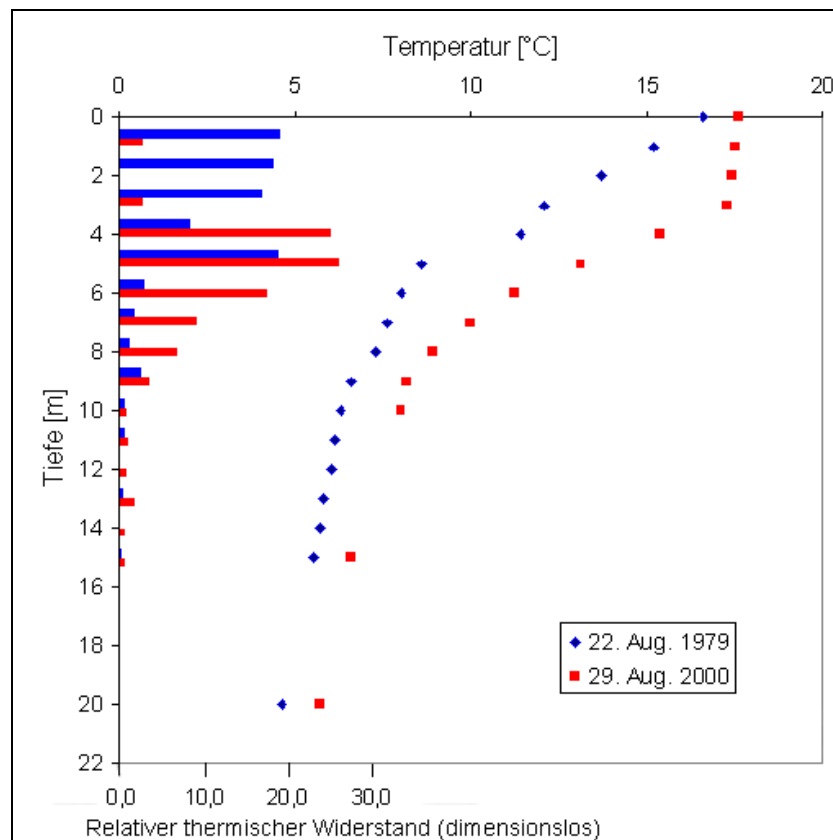
Nach der Definition von BIRGE (1897), der bei einer Temperaturdifferenz von mehr als 1K pro Tiefenmeter von einer Thermokline bzw. Sprungschicht spricht, liegt diese für die Jahre 1978 bis 1980 im Mittel zwischen 2,5m und 3,5m unter der Wasseroberfläche, in den Jahren 1999 bis 2002 hingegen überwiegend in den Tiefen zwischen 3,5m und 4,5m. Das entspricht einer Verlagerung der Sprungschicht um 1 Meter in die Tiefe. Für die Erweiterung des Lebensraumes Epilimnion bedeutet dies einen Zuwachs von ca. 5 Mio. m<sup>3</sup>. Ähnlich den Beobachtungen von SCHINDLER et al.



(1990) lässt sich also am Königssee ebenfalls eine Thermoklinenverlagerung nachweisen, wie sie im Rahmen von Klimaveränderungen zu vermuten war.

SIEBECK (1982) führte aus, dass das Metalimnion direkt unter der Seeoberfläche beginnt. Nach MÜLLER (1981) weist der Königssee kein homothermes Epilimnion auf. Vergleicht man typische Temperaturprofile der heutigen Messungen mit den damaligen (Abbildung 69), fällt auf, dass diese Aussage heute nicht mehr zutreffend ist. Auch die Werte zum relativen thermischen Widerstand in dieser Graphik verdeutlichen die veränderten Schichtungsbedingungen.

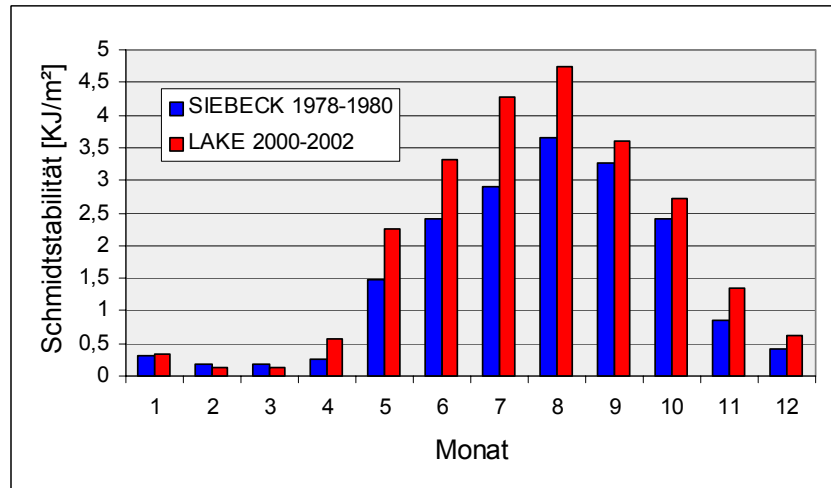
Wie sich diese Verhältnisse auf die Stabilität der Schichtung in einem See auswirken, zeigt Abbildung 70. Der Mittelwert der nach SCHMIDT (1928) definierten Stabilität der Monate April-Dezember ist um 40% gestiegen.



**Abbildung 69: Vergleich zweier Temperaturtiefenprofile im Königssee**

(Datenquelle: ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 1978, 1979, 1980 und eigene Erhebungen 1999-2003)

## 5 Ergebnisse und Diskussion



**Abbildung 70: Monatsmittelwertvergleich der Schmidtstabilität im Königssee**

(Datenquelle: ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 1978, 1979, 1980 und eigene Erhebungen 2000-2002)

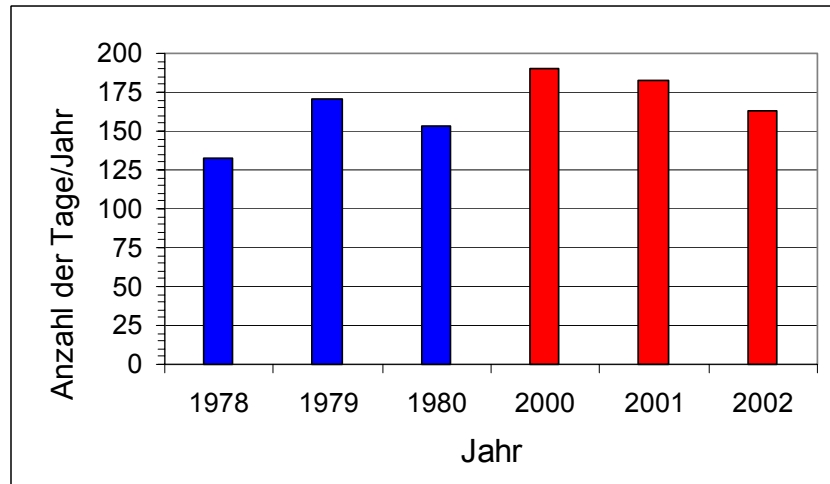
Aus BARTHELMESS (1997) ist für August 1992 ein Stabilitätswert von 4,91KJ/m<sup>2</sup> zu entnehmen. Obgleich die Witterungsverhältnisse von 1992 als außergewöhnlich warm bezeichnet werden, wurde zehn Jahre später dieser Stabilitätswert noch überschritten, aus Abbildung 46 geht hervor, dass 2001 Werte über 6 KJ/m<sup>2</sup> erreicht wurden.

Auf Grund der Ausbildung dieser Stabilität ist mehr Energie aufzuwenden, um die Zirkulationsphasen einzuleiten. So muss sich dieser Umstand zwangsläufig auf eine Verlängerung der Stagnationsphasen auswirken, was auch im Königssee zu beobachten war (Abbildung 71).

Jahr	Monat											
	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
1978					12.5.1978					22.9.1978		
1979					9.5.1979					? 12.10.-30.11.1979		
1980					7.5.1980					7.10.1980		
1999							Messbeginn					23.10.1999
2000					30.04.2000							5.11.2000
2001					29.04.2001							29.10.2001
2002					27.04.2002						6.10.2002	
2003					26.04.2003			Messende				

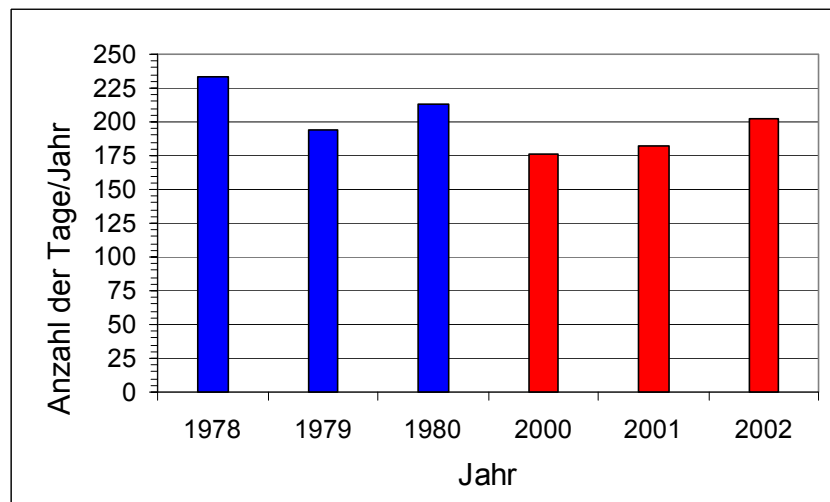
**Abbildung 71: Beginn und Ende der Stratifikation im Königssee in ausgewählten Jahren**

(Datenquelle: ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 1978, 1979, 1980 und eigene Erhebungen 1999-2003)



**Abbildung 72: Tage mit erkennbarer Schichtung / Jahr im Königssee**

(Datenquelle: ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 1978 1979 1980 und eigene Erhebungen 2000-2002)



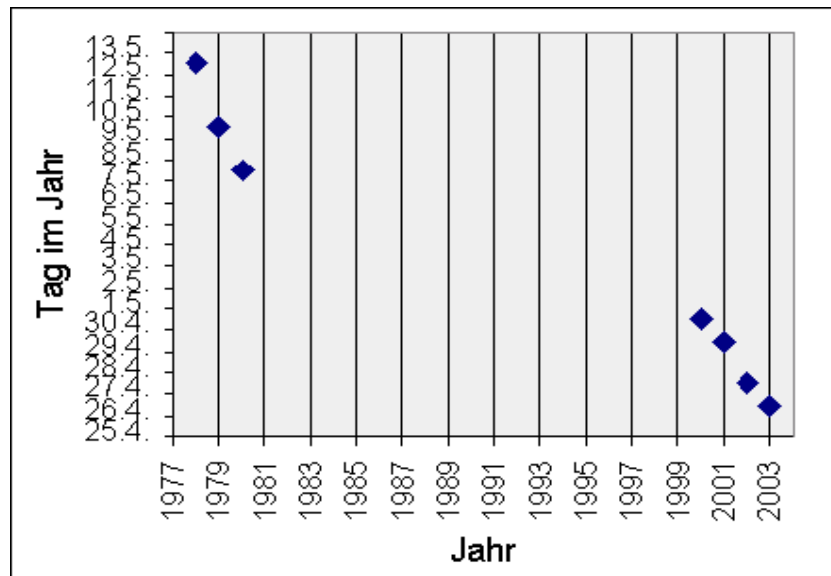
**Abbildung 73: Tage ohne erkennbare Schichtung / Jahr im Königssee**

(Datenquelle: ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 1978, 1979, 1980 und eigene Erhebungen 2000-2002)

Die Anzahl der Tage mit erkennbarer Schichtung ist demnach heute größer als früher, und umgekehrt verringert sich die nahezu schichtungslose Zeit im Durchschnitt um immerhin 26 Tage (vgl. Abbildung 72 und Abbildung 73).

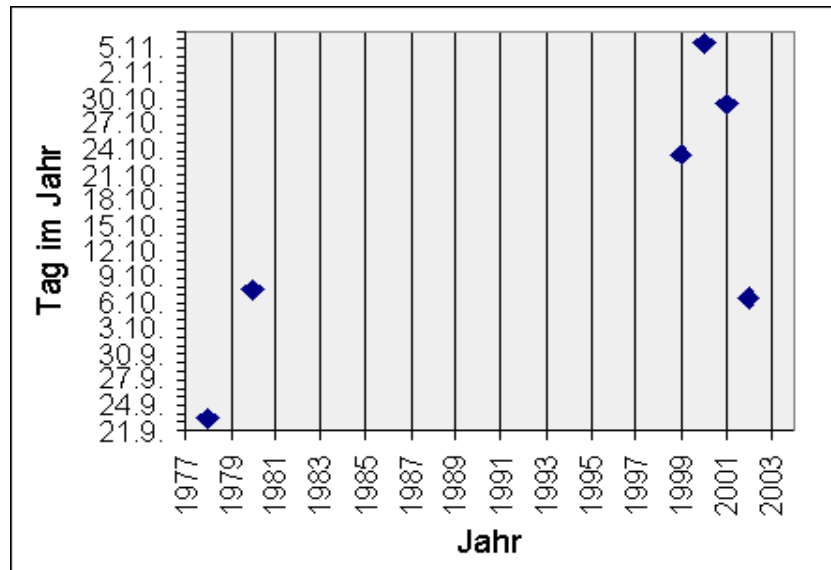
Folglich muss sich im Jahresverlauf die Schichtungsbildung früher einstellen und später wieder auflösen. Abbildung 74 und Abbildung 75 zeigen, dass sich der Schichtungsbeginn um ca. 11-12 Tage vorverlegt hat, hingegen findet die Auflösung der Schichtung ungefähr 20 Tage später im Jahr statt. Der Zeitpunkt der Bildung bzw. Auflösung der Schichtung wurde aus den Temperaturprofilen statistisch bestimmt. Unterhalb einer Standardabweichung von zwei, berechnet aus den Tempera-

turwerten benachbarter Schichten (im Abstand von einem Meter) der obersten 15m des Sees, können nahezu homotherme Verhältnisse angenommen werden. Die Auflösung der Schichtung konnte an Hand der früheren Daten nicht genau bestimmt werden, daher ist dieser Wert mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten. Auch muss in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen werden, dass hier nur wenige Daten berücksichtigt werden konnten. Setzt man dieses Ergebnis beispielsweise in Beziehung zu den Verhältnissen im Zürichsee, erscheinen die Veränderungen am Königssee noch drastischer zu sein. LIVINGSTONE (2003) hat dort über einen Zeitraum von 40 Jahren eine Verlängerung der Stagnationsphase um zwei bis drei Wochen festgestellt. Aber die Vergleichbarkeit der beiden Seen ist nur bedingt möglich, da die unterschiedlichen Einflussfaktoren berücksichtigt werden müssen.



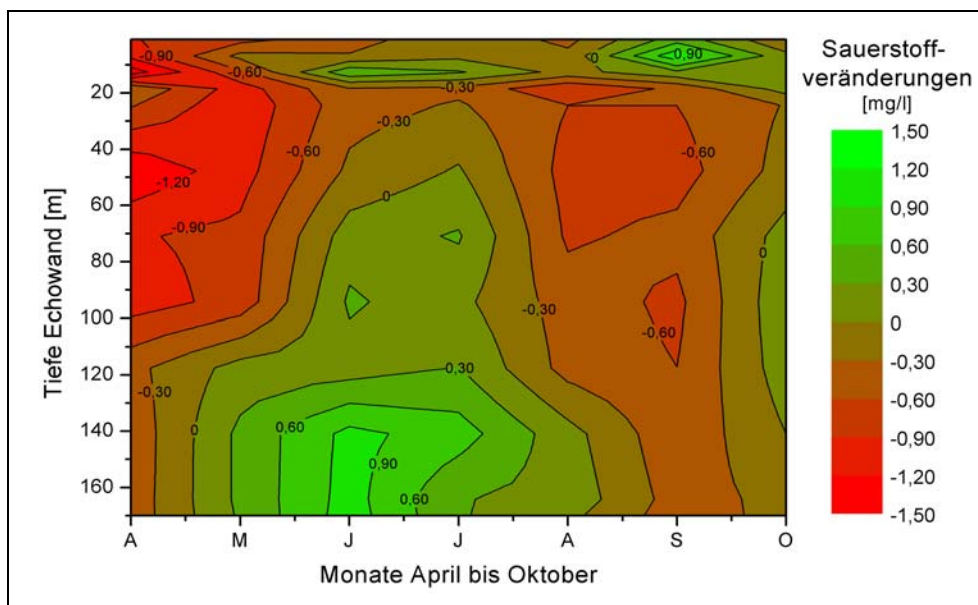
**Abbildung 74: Beginn der Schichtung im Königssee**

(Datenquelle: ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 1978, 1979, 1980 und eigene Erhebungen 1999-2003)



**Abbildung 75: Auflösung der Schichtung im Königssee**

(Datenquelle: ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 1978, 1979, 1980 und eigene Erhebungen 1999-2003)



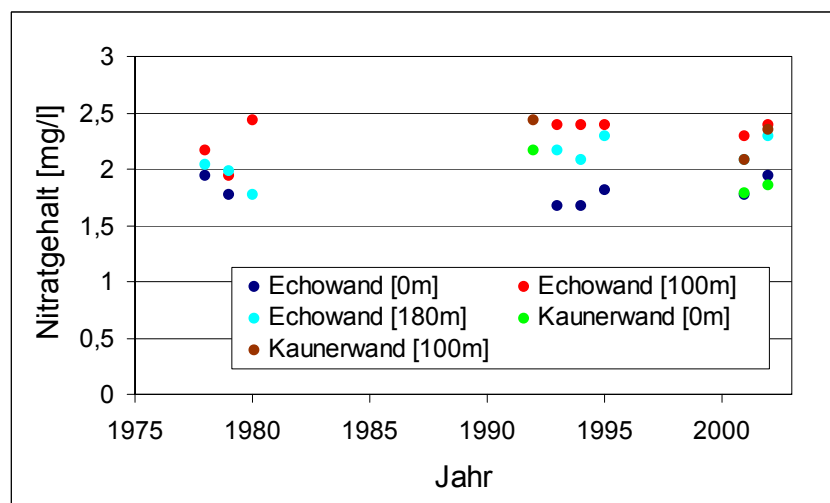
**Abbildung 76: Veränderungen der Monatsmittelwerte des Sauerstoffgehaltes im Königssee der Zeiträume 1978-1980 und 2000-2002**

(Aus heutiger Sicht bedeutet grüne Farbgebung eine Zunahme, rote hingegen eine Abnahme. Datenquelle: ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 1978, 1979, 1980 und eigene Erhebungen 2000-2002)

Zur Betrachtung der Veränderungen im Stoffhaushalt wurden die Monatsmittelwerte aller verfügbaren Sauerstoffmessungen der Untersuchungen vor 25 Jahren mit denen von heute verglichen (Abbildung 76, die Anzahl der winterlichen und Spätherbstmessungen von SIEBECK (1982), waren zu wenige, als dass diese in einen Vergleich eingehen könnten). Es fällt auf, dass es im großen und ganzen geringe Veränderungen im durchschnittlichen Sauerstoffangebot gibt, mit einer Ausnahme:

Die Sauerstoffmenge in den Monaten Mai bis Juli hat in der Tiefe zugenommen, hingegen ist bei den April- und Septemberwerten eher ein Rückgang in den obersten 100 Metern festzustellen. Möglicherweise ist dieser Effekt auch auf den Bau der Abwasserleitung zurückzuführen. SIEBECK (1982) hatte seinerzeit schon auf die Gefahr der Abnahme der Sauerstoffmenge im Hypolimnion durch die Abwässer der Gaststätten am Königssee hingewiesen. Die Art der Sauerstoffkurve nach ÅBERG und RHODE (1942, zit. aus HUTCHINSON 1957) hat sich nicht verändert. Abbildung 39 und Abbildung 40 zeigen, dass heute immer noch ein  $\beta$ -orthograde Verlauf der Sauerstoffkurve zu erkennen ist.

In Abbildung 77 sind alle verfügbaren Nitratmessungen über die letzten 25 Jahre zusammengestellt. Es handelt sich um Jahresmittelwerte, dennoch sind die Werte aus den früheren Jahren nur bedingt mit den heutigen zu vergleichen, da sich die früheren Werte aus nur wenigen Einzelmessungen zusammensetzen. So lässt sich auch erklären, warum die Streuung früher viel größer erscheint als heute.



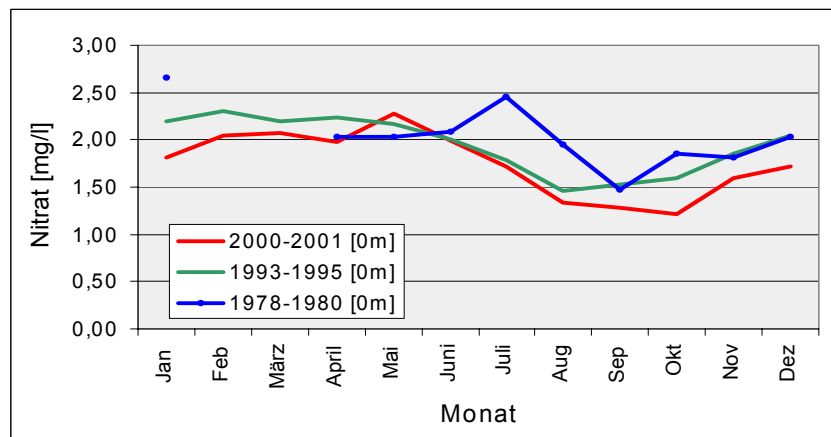
**Abbildung 77: Nitratgehalte im Königssee aller verfügbaren Messungen der letzten 25 Jahre**

Datenquelle: ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 1978, 1979, 1980, BARTHELMESS 1987, WASSERWIRTSCHAFTSAMT TRAUNSTEIN 1996 und eigene Erhebungen 1999-2003)

Da die Messmethodik und der Genauigkeitsanspruch früherer Messungen nicht mehr nachvollziehbar ist, ist die Interpretation nur eingeschränkt möglich. Davon abgesehen zeigt sich, dass die Jahreswerte insgesamt auf einem ungefähr gleichbleibenden Niveau liegen.

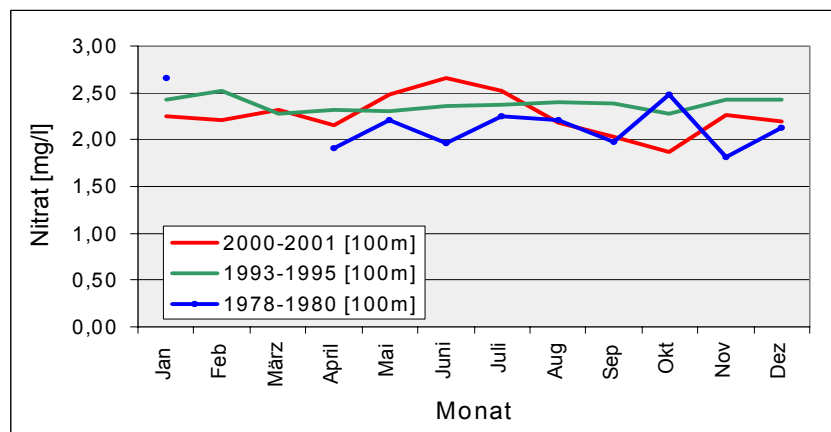
Betrachtet man die Werte in Bezug auf einzelne Jahreszeiten, lassen sich differenziertere Aussagen treffen. Auf Grund der relativ geringen Anzahl der Messungen aus

früherer Zeit (1978-1980), kommt man unter Vorbehalt zu dem Ergebnis, dass sich die Werte des Seewassers an der Echowand auf einem insgesamt geringeren Niveau bewegen als früher (Abbildung 78 bis Abbildung 80). Betrachten wir die Monatsmittelwerte, so lässt sich an der Oberfläche des Sees ein Rückgang der Nitratkonzentrationen feststellen, in den tieferen Schichten hingegen war eher ein Anstieg der Werte messbar. Auch fällt auf, dass vor allem in den Monaten Juni und Juli vor 25 Jahren an der Oberfläche deutlich höhere Werte als in den letzten Jahren gemessen wurden. Der Hauptgrund des Rückgangs liegt vermutlich im Anschluss der am Königssee gelegenen Gaststätten St. Bartholomä und Salet-Alm an das örtliche Entsorgungsnetz im Jahr 1991. Die meisten Abwässer fielen hier in den Sommermonaten an. Auch bei der Gegenüberstellung der Analysen des Seegewässers von 1992 (BARTHELMESS 1997) und denjenigen aus den eigenen Untersuchungen lässt sich am Standort Kaunerwand ein geringfügiger Rückgang konstatieren (Abbildung 81 und Abbildung 82).



**Abbildung 78: Nitratstickstoffverhältnisse an der Echowand (Wasseroberfläche)**

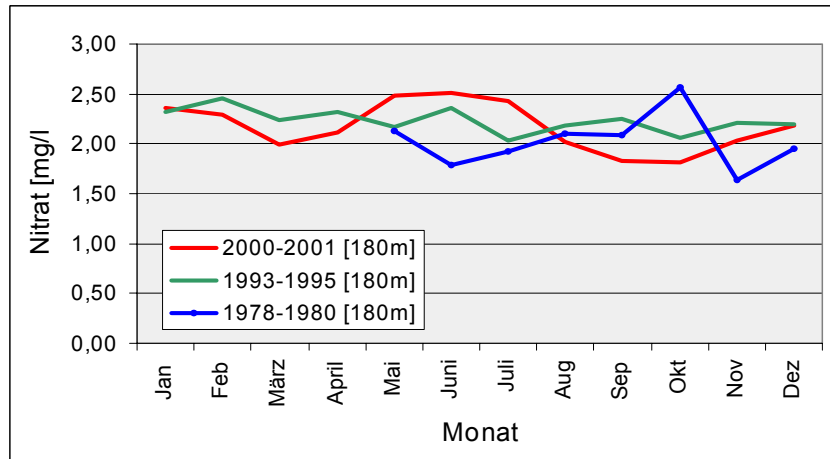
(Datenquelle: WASSERWIRTSCHAFTSAMT Traunstein 1996, SIEBECK 1982 und eigene Erhebungen 2000/2001)



**Abbildung 79: Nitratstickstoffverhältnisse an der Echowand in 100m Tiefe**

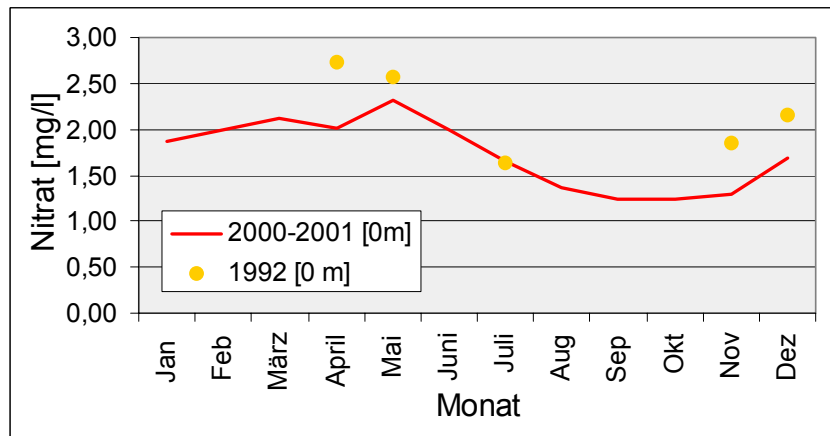
(Datenquelle: WASSERWIRTSCHAFTSAMT Traunstein 1996, SIEBECK 1982 und eigene Erhebungen 2000/2001)

## 5 Ergebnisse und Diskussion



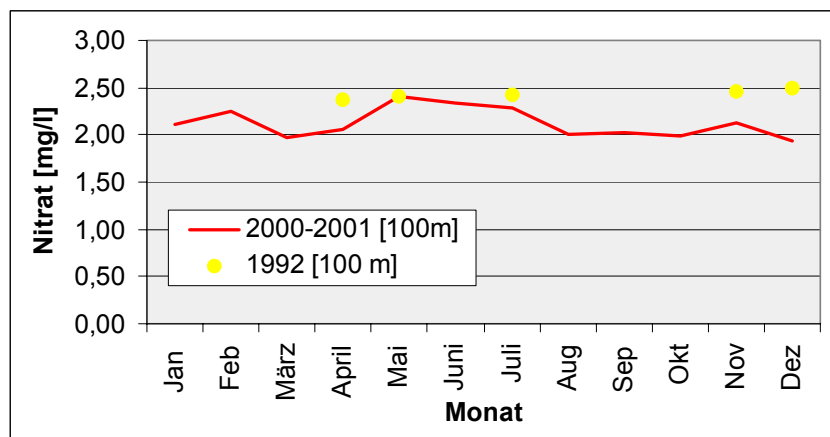
**Abbildung 80: Nitratstickstoffverhältnisse an der Echowand in 180m Tiefe**

(Datenquelle: WASSERWIRTSCHAFTSAMT Traunstein 1996, SIEBECK 1982 und eigene Erhebungen 2000/2001)



**Abbildung 81: Vergleich der Nitratstickstoffverhältnisse an der Seeoberfläche nahe der Kaunerwand**

(Datenquelle: BARTHELMESS 1997 und eigene Erhebungen 2000/2001)



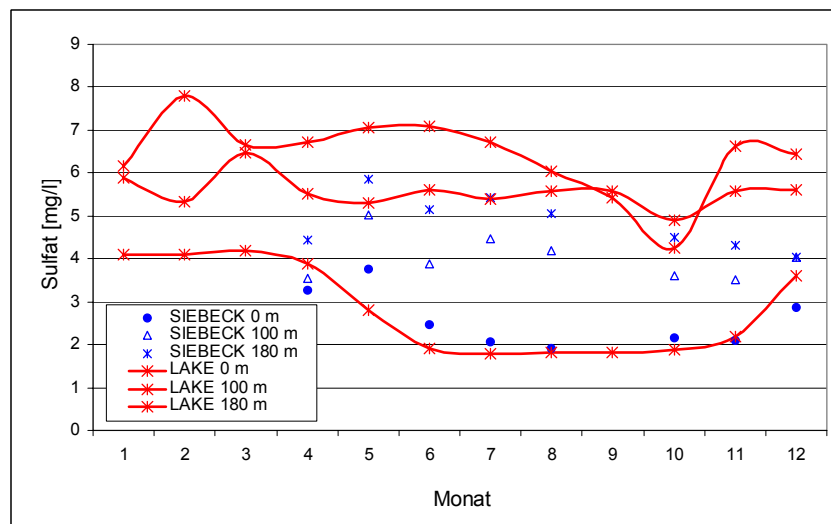
**Abbildung 82: Vergleich der Nitratstickstoffverhältnisse in 100m Tiefe bei einer Messtelle in Nähe der Kaunerwand**

(Datenquelle: BARTHELMESS 1997 und eigene Erhebungen 2000/2001)



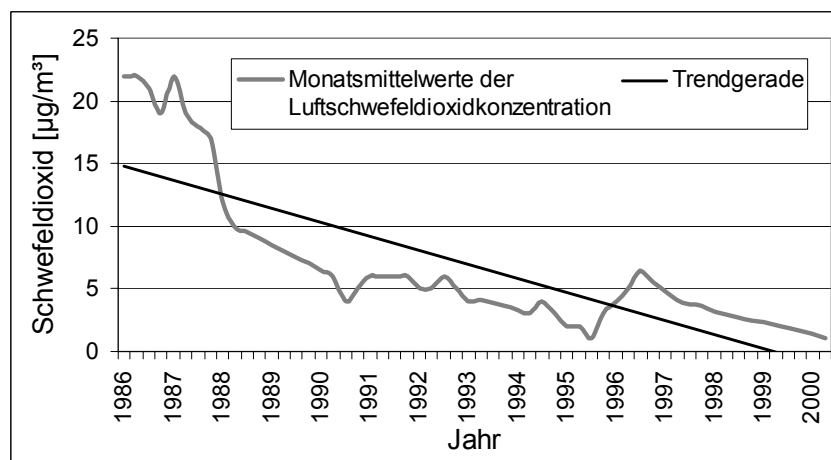
Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Nitratverhältnisse im Königssee ein stabiles Niveau oder einen leicht rückläufigen Trend zeigen. Das ist erstaunlich, da anzunehmen ist, dass die Einträge durch Luftstickstoff eher in den letzten 25 Jahren zunehmend waren (vgl. Abbildung 61 und Abbildung 62). Möglicherweise ist dies so zu erklären, dass der durch den Bau der Abwasserleitung der Gaststätten am Königssee bedingte positive Effekt für die Wasserqualität den Eintrag von Stickstoff durch die Luft überkompensiert.

Anders sieht dies beim Vergleich der Sulfatverhältnisse aus. An der Seeoberfläche haben sich diese zwar kaum verändert, dagegen sind in den tieferen Bereichen des Sees heutzutage höhere Werte feststellbar (Abbildung 83).



**Abbildung 83: Vergleich der Sulfatgehalte im Königssee 1978-1980 und 1999-2003**

(Datenquelle: ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 1978, 1979, 1980 und eigene Erhebungen 1999-2003)



**Abbildung 84: Langzeitverlauf für SO<sub>2</sub> für die Station Bad Reichenhall**

(Datenquelle: BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ 2003)

Es ist schwer, hierfür einen Zusammenhang zu finden. Ein erhöhter Eintrag von Sulfationen aus der Luft scheint wenig wahrscheinlich. Abbildung 84 verdeutlicht, dass der Eintrag zumindest seit 1986 eindeutig abnehmend ist. Die in anderen Forschungen nachgewiesenen erhöhten Sulfatkonzentrationen infolge der Erwärmung des Seewassers könnten als Grund dafür in Frage kommen.

### 5.8.2 Stoffhaushaltsveränderungen im Einzugsgebiet des Königssees

Zum Vergleich von eventuellen Veränderungen an den Fließgewässern im Einzugsgebiet des Königssees lässt sich nur eine Graphik heranziehen (Abbildung 85), da hier - wie schon erwähnt - der Datenfundus aus früheren Zeiten spärlich ist. Abbildung 85 zeigt, dass die Nitratwerte der Zuflüsse heute in den meisten Fällen geringer sind als zu früheren Zeiten. Eine Ursachensuche gestaltet sich schwer, denn auf Grund der erhöhten Einträge an Luftstickstoff wäre eher ein umgekehrter Trend zu erwarten. Auch ein Einfluss aus der Almwirtschaft scheint eher unwahrscheinlich, da sich deren Intensität in den letzten Jahrzehnten kaum verändert hat (vgl. Abbildung 13).

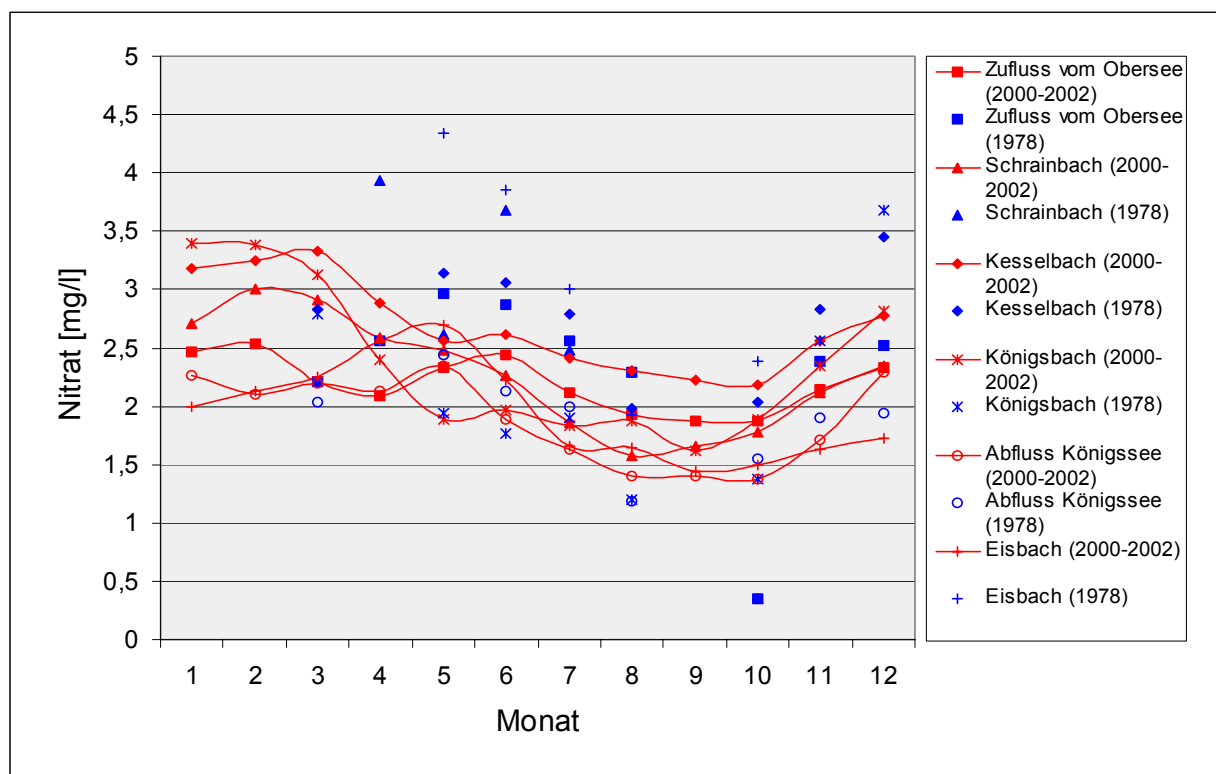


Abbildung 85: Nitratstickstoff an den Zuflüssen des Königssees im Vergleich 1978 und 2000-2002

(Datenquelle: SEITZ 1979 und eigene Erhebungen 1999-2003)

### **5.9 Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick**

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Beantwortung der Fragen aus der Zielstellung (Kap. 1), die bislang in den vorangegangenen Abschnitten (Kap. 5.1 bis 5.8) noch nicht behandelt wurden.

Die Klärung, ob die Ursachen der festgestellten Umweltveränderungen eher anthropogen bedingt sind oder ob sie im Rahmen natürlicher Schwankungen liegen, ist nicht pauschal zu beantworten. Dass am Königssee derzeit die bisher höchsten Temperaturen seit Beginn der Messungen festgestellt werden, heißt noch lange nicht, dass es unter Umständen früher nicht auch schon wärmere Verhältnisse gegeben haben kann. Einfacher ist zu beantworten, ob eher autochtone oder allochtone Quellen für diese Veränderungen in Betracht zu ziehen sind. Diese Angelegenheit lässt sich zusammen mit den Fragen nach der Tragfähigkeit des Raumes und nach der Vereinbarkeit von Naturschutz- und Nutzungsinteressen klären. So zeigen die Untersuchungen zum Stoffhaushalt ausgewählter Parameter weder bei den Nährstoffeinträgen durch die Zuflüsse des Königssees noch im See selbst eine direkte Belastung durch die Nutzung. Allerdings lässt sich beim Vergleich der erhobenen Daten mit denen von früheren Jahren (1978-1980) ein Trend bei den Stoffverhältnissen erkennen: Die Nitratgehalte sowohl an den Zuflüssen als auch im See sind rückläufig. Die Werte zum Sulfat und Chlorid im See zeigen geringfügig höhere Werte als bei früheren Untersuchungen. Während des Untersuchungszeitraumes der vorliegenden Studie (1999-Juni 2003) ist bei den Nitratwerten im See und den Zuflüssen der Teileinzugsgebiete ein leichter Anstiegstrend zu konstatieren, allerdings ist nicht zweifelsfrei zu klären, ob dies mit einem verstärkten Eintrag von Luftschadstoffen oder mit unterschiedlichen Einstrahlungsverhältnissen zusammenhängt. Im Allgemeinen sind die Nitratwerte verhältnismäßig gering.

Der Konflikt, der sich im NP Berchtesgaden, durch eine relativ hohe Nutzungsintensität bei den strengen Kriterien für Naturschutzbelange in dieser Kategorie von Schutzgebiet ergibt, scheint sich weniger als Problem darzustellen. Reaktionen des Umweltsystems durch festgestellte Umweltveränderungen im Energie- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet lassen vermuten, dass diese demnach weniger auf direkte, im Untersuchungsgebiet zu suchende Einflussfaktoren zurückzuführen sind als auf überregionale oder gar globale Ursachen. Zumindest unter Betrachtung der ausgewählten Parameter und über den untersuchten, relativ kurzen Zeitraum lässt sich

feststellen, dass sich das Umweltsystem trotz des anthropogenen Einflusses tragfähig verhält.

Die Frage nach dem Beitrag zur Umsetzung künftiger gesetzlicher Vorgaben sowie der Verwendung von den im Projekt ausgewählten Messpunkten lässt sich unter Zuhilfenahme der GIS-Technik beantworten. Durch die GIS-Neuberechnung der Teileinzugsgebiete des Königssees auf Grund der topographischen Verhältnisse des gesamten oberirdischen Einzugsgebietes konnte eine computergestützte räumliche Analyse der Naturraumausstattung und Nutzung erfolgen (Kap. 5.5). Als Ergebnis daraus kann festgehalten werden, dass die unterschiedlichen chemischen Kennwerte ausgewählter Wasserinhaltsstoffe (Nitrat, Chlorid, Sulfat) der Fließgewässer der Hauptgerinne die Charakteristik der Teileinzugsgebiete (s. Kap. 5.6) gut nachbilden. Somit kann der erforderlichen Ausweisung von Messstellen zur Erfassung von Parametern in Fließ- und Stillgewässern zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie Rechnung getragen werden. Die Erosionsbasen der Teileinzugsgebiete zum Königssee können als quasinatürliche Hintergrundmessstellen verwendet werden, wenn entsprechende gebietspezifische Besonderheiten, wie sie oben aufgeführt wurden, berücksichtigt werden.

Eine Erweiterung des Erfassungskataloges für ein Umweltmonitoring, um bestimmte Kenngrößen wie Stabilität bzw. Schichtung und Lage der Sprungschicht in Seen um längerfristige Veränderungen besser einordnen zu können, erscheint dem Verfasser sinnvoll.

Auch wäre in diesem Zusammenhang ein zeitlich ähnlich eng gesetztes Raster wie im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wünschenswert, damit die Aussagekraft von Erkenntnissen zu Umweltveränderungen erhöht werden kann.

Laufende Messprogramme, wie sie beispielsweise im Rahmen der technischen Gewässeraufsicht der Wasserwirtschaftsämter Bayerns realisiert werden, sind sehr wertvoll, sollten aber hinsichtlich der Messfrequenz und des Parameterkataloges noch erweitert werden.

Vor dem Hintergrund, dass in Zukunft die regionalen Folgen von Global Change noch dramatischer ablaufen können, muss allerdings die oben getroffene Bewertung zur Tragfähigkeit der Region permanent erneuert und beispielsweise u. a. an Hand der Parameter dieser Studie lückenlos kontrolliert werden.

Die vorliegende Arbeit hat in erster Linie empirischen Charakter, da vor dem Ziel einer Modellierung zunächst der Anspruch darin bestand, tatsächliche Beweise für

Umweltveränderungen zu erbringen. Die Messdaten bieten eine solide Grundlage für die Zielstellung einer Modellierung und gleichermaßen für die Kalibrierung entsprechender Modelle. Die Modellierung der festgestellten Beobachtungen im aquatischen System Königssee unter Berücksichtigung gemessener klimatologischer Parameter und simulierter zukünftiger Verhältnisse ist sehr vielversprechend und könnte die Forschungen in diesem Feld vervollständigen.

Wünschenswert wäre in diesem Zusammenhang auch eine Landoberflächenmodellierung des Wasser-, Stoff- und Energiehaushaltes. Eine Koppelung dieser Modelle unter Berücksichtigung der Verhältnisse der Vegetationsdecke gerade unter den gegenwärtig ablaufenden und künftig zu erwartenden klimatischen Veränderungen ist ein hehres Ziel, welches sich aber anzugehen lohnt.

Die durch die Arbeitsgruppe Seenforschung der Sektion Geographie geschaffenen Voraussetzungen in Zusammenarbeit mit anderen Geowissenschaftlern unter Nutzung der gut ausgestatteten Einrichtung und der Erfahrung vieler Experten können hier bedeutende Beiträge zur Lösung der wissenschaftlichen Fragestellungen bezüglich regionaler Auswirkungen von Global Change leisten.

Durch die erfolgreiche Zusammenarbeit mit der Nationalparkverwaltung, lokalen Akteuren bzw. schon bestehenden oder noch zu findenden Partnerschaften mit den Landes- und Kreisbehörden wie den Wasserwirtschaftsämtern oder Ministeriumsvertretern, können solche Vorhaben auf eine solide Basis gestellt werden.

Die Umsetzungen der aus den Ergebnissen resultierenden Handlungsempfehlungen wird dadurch wahrscheinlich gemacht.

In diesem Sinne bleibt zu sagen, dass Umweltforschung mit der Aufgabe des Erkennens von Umweltveränderungen und des Verstehens dieser Zusammenhänge nur erfolgreich arbeiten kann, wenn sie interdisziplinär und institutionell übergreifend fungiert. Nur dann bietet sich für den Menschen die Chance, auf die Auswirkungen von Global Change adäquat zu reagieren.

### 6 Zusammenfassung

Unter der Annahme, dass Anzeichen von Umweltveränderungen durch den Klimawandel besonders in sensiblen, wenig genutzten Hochgebirgsökosystemen gut erkennbar sind, ist im Einzugsgebiet des Königssees im Nationalpark Berchtesgaden ein landschaftsökologisches Projekt unter dem Titel „Landschaftsökologische Analysen im Königssee-Einzugsgebiet“ (LAKE) durchgeführt worden. Hauptziel war die Erfassung, Darstellung und das Ergründen von Ursachen dieser Umweltveränderungen im Energie- und Stoffhaushalt an Hand ausgewählter Parameter. Ebenso galt es, den Naturschutzaspekt zu beleuchten, der sich aus dem Anspruch von Nationalparks ergibt. Die Fragestellung in diesem Zusammenhang war, ob sich Nutzungs- und Naturschutzinteressen vereinbaren lassen (vgl. Kap. 1).

Um diese o. g. Umweltveränderungen zu verstehen und einzuordnen, musste vorab die Analyse des entsprechenden Ökosystems erfolgen (Kap. 2). Ebenso wurden theoretischer Hintergrund und Forschungsstand im Untersuchungsgebiet im Hinblick auf die Fragestellung erläutert (Kap. 3).

Als Untersuchungsgebiet wurde der Nationalpark Berchtesgaden ausgewählt, der für diese Fragestellung ideale Voraussetzungen bietet. Es handelt sich um ein Gebiet welches unter gegenwärtigen Bedingungen eine geringe anthropogene Beeinflussung erfährt. Das Reaktionsverhalten der Landschaft bleibt erklärbar, da es durch wenige Faktoren bestimmt wird.

Zur Realisierung dieses Anliegens wurde ein landschaftsökologischer Methodikan-satz verwendet (Kap. 4). Hauptaugenmerk der Untersuchungen war das Einzugsgebiet des als oligothroph eingestuften Referenzsees Königssee. Vor allem die Untersuchung und der Vergleich der abiotischen Parameter zu einer Studie aus den Jahren 1978-1980 war Teil der Zielstellung. Deshalb wurden im wesentlichen in einem wöchentlichen (im Winter 14-tägigen) Rhythmus Tiefenprofile zu Temperatur bzw. Sauerstoff an zwei verschiedenen Messstellen im Königssee ermittelt und darüber hinaus Wasserproben von den Zuflüssen und vom See selbst genommen. Die Wasserproben wurden dann ionenchromatographisch auf Nitrat, Phosphat, Sulfat und Chlorid untersucht.

Festgestellte Umweltveränderungen wurden mit Nutzungerscheinungen in Beziehung gesetzt. Letztere konnten an Hand der Auswertung von vorhandenen Quellen

und Befragungen der lokalen Interessenvertreter für Tourismus und Almwirtschaft dargestellt werden.

Als methodisches Ergebnis wurden Programme zur Berechnung von bestimmten Parametern (Stabilität und Schichtung sowie Wärmeinhalt des Wasserkörpers) speziell für den Königssee erstellt. Als weiteres Resultat konnten Messungen zur Veränderung im Umweltsystem ausgewertet werden. Diese können als Grundlage für den Ansatz und die Kalibrierung von Umweltmodellen verwendet werden.

Im Ergebnisteil sind die Zusammenhänge der Reaktion des limnischen Systems Königssee bezüglich seiner abiotischen Faktoren in Zusammenhang mit physisch-geographischen Parametern und anthropogenen Einflüssen (vgl. auch Kap. 2.8) dargestellt und erläutert. Insbesondere Gründe für die Temperatur- und Sauerstoffverteilung im Seekörper in Zusammenhang mit Windeinwirkung, Strahlung bzw. Lufttemperatur werden aufgezeigt (s. Kap. 5.2, 5.3 u. 5.4). In Kap. 5.1 erfolgte eine Analyse der Veränderung klimatischer Randparameter. Die Station Bad Reichenhall zeigt in den Tendenzen des Monatsmittelwertes der Lufttemperatur gute Übereinstimmung mit der Region Berchtesgaden. Für Bad Reichenhall konnte eine Erhöhung der Lufttemperatur in den letzten 28 Jahren um ca. 2K festgestellt werden. Die jährliche Gesamtsonnenscheindauer ist im Mittel um 100 Stunden gestiegen. Bezüglich der Veränderungen des Systems durch eine mögliche Klimaveränderung lässt sich zusammenfassend sagen, dass die theoretisch zu erwartenden Veränderungen und Beobachtungen von anderen Autoren in anderen Regionen in limnischen Systemen (s. Kap. 3.1) in Bezug auf die abiotische Komponente durchaus in ähnlicher Form am Königssee zu bestätigen sind, wenn man die Zeiträume von 1978 bis 1980 und 1999 bis Juni 2003 miteinander vergleicht.

Der jährliche Wärmeinhalt des Königssees ist durchschnittlich um 10% gestiegen, und dies obgleich die extrem warmen Verhältnisse aus dem Hochsommer 2003 nicht mehr in allen Statistiken berücksichtigt werden konnten. Stellvertretend sei hier ein Beispiel genannt: Am Königssee konnte am 4. 8. 2003 an der Oberfläche die verhältnismäßig hohe Temperatur von 21,8°C gemessen werden. Der höchste Messwert im Jahre 1979 lag bei 17,6°C. Aber auch bei den Hypolimniontemperaturen sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt durchschnittlich 0,2 bis 0,3K höhere Messwerte festzustellen.

Vor allem die im Rahmen der Klimaveränderung zu erwartenden Verhältnisse zu Stabilität und Schichtung lassen sich am Königssee beobachten: Die Stagnations-

phasen haben sich verlängert, und die Zirkulationsphasen sind kürzer geworden. Gleichmaßen ist der Beginn der Stagnation um ca. 11-12 Tage früher im Jahr zu erwarten, und die Auflösung der Schichtung tritt im Durchschnitt ca. 20 Tage später im Jahr ein.

Auch eine Verlagerung der Thermokline um ca. 1m in die Tiefe ist erkennbar. Der Schichtungsindex nach SCHMIDT ist bei den monatlichen Werten (April-Dezember) im Durchschnitt um ca. 40% gestiegen.

Die von anderen Autoren festgestellte generelle Abnahme der Sauerstoffgehalte im Tiefenwasser konnte am Königssee nicht bestätigt werden: Ein Vergleich absoluter Sauerstoffgehalte im monatlichen Mittel der verschiedenen Studien zeigt für die Monate Mai bis Juli eine Zunahme, nur die Werte aus April und September deuten eher auf eine geringfügige Abnahme bis 100m Tiefe hin. Im Rahmen der Untersuchungen konnte der  $\beta$ -orthograde Verlauf der Sauerstoffverteilungskurve mit leicht positiv heterograde Überprägung im Königssee bestätigt werden.

Im gesamten Untersuchungszeitraum gab es zweimal eine verhältnismäßig tiefgreifende Zirkulation: im Winter 1999/2000, und im Sommer 2002. Es ist dargestellt, welche besonderen Wind- und Temperaturkonstellationen eine Vollzirkulation für den Königssee wahrscheinlich machen.

Nach einer GIS-Neuberechnung der Teileinzugsgebiete des Königssees auf Grund der topographischen Verhältnisse des gesamten oberirdischen Einzugsgebietes ist eine Analyse der genauen Flächenverhältnisse hinsichtlich der geologischen, vegetationsgeographischen, bodenkundlichen und nutzungsrelevanten Gegebenheiten erfolgt (s. Kap. 5.5).

Die chemischen Kennwerte ausgewählter Wasserinhaltsstoffe (Nitrat, Chlorid, Sulfat) der Hauptzuflüsse in den Königssee, wurden mit den Besonderheiten der Teileinzugsgebiete in Beziehung gesetzt (s. Kap. 5.6). Es konnte festgestellt werden, dass die chemischen Fließgewässerkenndaten die unterschiedlichen Eigenschaften nachbilden. So kann an Hand der Untersuchungen zum Stoffhaushalt weder in den Nährstoffeinträgen durch die Zuflüsse des Königssees noch im See selbst eine direkte Belastung durch die almwirtschaftliche Nutzung erkannt werden. Die Nitratverhältnisse im See und in allen Gewässern der Teileinzugsgebiete lassen über den Untersuchungszeitraum von August 2000-Juni 2003 einen leichten Anstiegstrend erkennen, allerdings befinden sich die Nitratverhältnisse auf geringem Niveau. Es ist nicht zu klären, ob die Ursachen dafür auf einen verstärkten Eintrag von Luftschadstoffen o-



der auf unterschiedliche Strahlungsverhältnisse in den Untersuchungsjahren zurückzuführen sind.

Auch beim Vergleich mit den Daten von früheren Jahren (1978-1980) lässt sich ein Trend bei den Stoffverhältnissen erkennen: Die Nitratgehalte sowohl an den Zuflüssen als auch im See sind rückläufig. Hier macht sich offenbar der positive Effekt des Baus der Abwasserleitung der Gaststätten St. Bartholomä und Saletalm im Jahre 1991 bemerkbar. Beim Sulfat und Chlorid hingegen lassen sich heute im See höhere Werte feststellen als bei früheren Untersuchungen.

Zum Abflussgeschehen der Teileinzugsgebiete des Königssees wurden grobe Abschätzungen gegeben, und die besonderen Auswirkungen im Rahmen eines Hochwasserereignisses im August 2002 wurden dargestellt (vgl. Kap. 5.7). Im Zusammenhang mit der bei einer möglichen Klimaveränderung häufig diskutierten erhöhten Starkregenbildung wird demonstriert, dass Stoffumsatz und -mobilisierung im EZG des Königssees verstärkt werden können.

Für die Umsetzung der für die EU-Wasserrahmenrichtlinie erforderlichen Erfassung von Parametern in Fließ- und Stillgewässern können die Erosionsbasen der Teileinzugsgebiete zum Königssee als quasinatürliche Hintergrundmessstellen fungieren. Entsprechende gebietsspezifische Besonderheiten, wie sie oben aufgeführt wurden, müssen dabei Berücksichtigung finden. Nach Auffassung des Autors sollte der Erfassungskatalog noch um bestimmte Kenngrößen wie Stabilität bzw. Schichtung und Lage der Sprungschicht ergänzt werden, um längerfristige Veränderungen besser einordnen zu können. An Hand dieser Untersuchung wird deutlich, wie wichtig ein zeitlich eng gesetztes Raster für die Aussagekraft von Erkenntnissen zu Umweltveränderungen notwendig erscheint.

Letztlich kann nicht eindeutig geklärt werden, ob die festgestellten Umweltveränderungen im Rahmen natürlicher Schwankungen ähnlich ablaufen würden, oder ob diese allein auf den derzeitigen Klimawandel zurückzuführen sind. Die Feststellung der bisher höchsten Temperaturen seit Beginn der Messungen am Königssee erlaubt nicht auszuschließen, dass es möglicherweise früher auch schon wärmere Verhältnisse gegeben haben kann. Dennoch wird klar, dass in relativ kurzer Zeit (z. B. bei Betrachtung der letzten drei Jahrzehnte), bemerkenswerte Veränderungen im limnischen System Königssee erkennbar sind (vgl. Kap. 5.8).

Die Auswertungen früherer und heutiger Daten zur Nutzung im Nationalpark Berchtesgaden zeigen, dass das Gebiet zum Teil erheblichen Nutzungsaktivitäten unter-

lag. Bei Betrachtung der letzten zehn Jahre ist in der almwirtschaftlichen Nutzung eine leichte Abnahme festzustellen. Diese Nutzungsform bleibt aber nach Abschätzungen von Experten auf diesem Niveau stabil. Im Tourismussektor ist derzeit ebenfalls ein Rückgang an Übernachtungs- und Gästezahlen zu erkennen, auch wenn in diesem Raum die touristische Nutzungsintensität auf hohem Niveau verbleibt. So ergibt sich die Konsequenz, dass sich der Nutzungsgrad im Schutzgebiet vermutlich in nächster Zukunft nicht wesentlich ändern wird. Da der Tourismus eine wichtige lokale Einnahmequelle und Beschäftigungsgarant in der Region ist, wird er weiterhin einen hohen Stellenwert haben. Dennoch gestaltet sich der daraus resultierende Konflikt zwischen einerseits relativ harten Naturschutzansprüchen und andererseits für Nationalparks zu hohen Nutzungsintensität als weitestgehend unproblematisch. Bislang scheinen die Reaktionen des Umweltsystems durch die festgestellten Umweltveränderungen im Energie- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet weniger auf direkte, im Untersuchungsgebiet zu suchende Einflussfaktoren zurückführen zu sein, als auf überregionale oder gar globale Ursachen. So ist – zumindest unter Betrachtung der ausgewählten Parameter und über den untersuchten, relativ kurzen Zeitraum festzustellen, dass das Umweltsystem in sich trotz des anthropogenen Einflusses tragfähig erscheint. Es lässt sich somit die erfreuliche Aussage treffen, dass es sich bei dem Nationalpark Berchtesgaden um ein Schutzgebiet handelt, welches den an sich selbst gerichteten harten Kriterien seiner Bezeichnung derzeit zwar nicht im vollen Umfang gerecht wird, dennoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine negative Beeinflussung durch regionale anthropogene Ursachen zu befürchten hat. Da in Zukunft möglicherweise die regionalen Auswirkungen von Global Change noch drastischer ablaufen können, muss diese Bewertung unablässig erneuert werden und beispielsweise u. a. an Hand der in dieser Studie ausgewiesenen Parameter beharrlich kontrolliert werden.

## 7 Quellen

- ADRIAN, R.; DENEKE, R.; MISCHKE, U.; STELLMACHER, R.; LEDERER, P.: A long-term study of the Heiligensee (1975-1992). - Evidence for effects of climate change on the dynamics of eutrophied lake ecosystems. - In: Arch. Hydrobiol. - Bd. 133, S. 315-337, 1995.
- ALIMOV, A. F.: The response of lake ecosystems to changes in biotic and abiotic conditions. - In: Zoologi ceskij Institut: Trudy Zoologi ceskogog Insituta. - Bd. 272, 1997.
- AMBROSETTI, W.; BARBANTI, L.: Deep water warming in lakes: an indicator of climate change. - In: J. Limnol. - Bd. 58(1), S. 1-9, 1999.
- AMT FÜR ALMSTATISTIKEN DES LANDKREISES BERCHTESGADENER LAND UND ERNÄHRUNG LAUFEN/TRAUNSTEIN(Hrsg.): Almstatistiken des Berchtesgadener Landes. - Laufen, 2002.
- APEL, R.; BÜTTNER, G.; DELANNOY, J. J.; KRAFFT, H.; PLASSMANN, G.: Groundwater flow in Alpine karst aquifers and in porous media - tracer experiments in the National Park Berchtesgaden. - In: SEILER, H. P.; WOHNLICH, S.(Hrsg.): New Approaches Characterizing Groundwater Flow, S. 3-7, 2001.
- ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN(Hrsg.): Königssee - Jahresbericht 1978. 1. Ergebnisbericht zum Projekt Limnologische Erforschung des Königssees. - München, 1978.
- ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN(Hrsg.): Königssee - Jahresbericht 1979. 2. Ergebnisbericht zum Projekt Limnologische Erforschung des Königssees. - München, 1979.
- ARBEITSGRUPPE KÖNIGSSEE DER LIMNOLOGISCHEN ABTEILUNG DES ZOOLOGISCHEN INSTITUTES DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN(Hrsg.): Königssee - Jahresbericht 1980. 3. Ergebnisbericht zum Projekt Limnologische Erforschung des Königssees. - München, 1980.
- ARTMANN, S.; VÖLKEL, J.: Untersuchungen an periglazialen Deckschichten im Nationalpark Berchtesgaden. - In: Ztsch. f. Geomorphologie N.F. - Bd. 43, S. 463-521, 1999.
- BARTHELMESS, T.: Die saisonale Plankton sukzession im Königssee. - In: Forschungsberichte des NP Berchtesgaden. - Bd. 36, 1997.
- BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN(Hrsg.): Entwicklung der Umwelt seit der letzten Eiszeit. - München, 2000.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ(Hrsg.): Internetauftritt unter <http://www.bayern.de/lfu/luft/langzeit/index.html> vom 5.9.2003. - München, 2003.
- BAYERISCHES LANDESVERMESSUNGSAMT MÜNCHEN(Hrsg.): Topographische Karte 1: 50.000 - Berchtesgadener Alpen. - München, 1994.
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN(Hrsg.): Kulturlandschaftsprogramm (KULAP). - München, 2002.
- BAYFORKLIM(Hrsg.): Klimaänderungen in Bayern und ihre Auswirkungen (BayFORKLIM). Abschlussbericht des Bayerischen Klimaforschungsverbundes. - München, 1999.
- BECK, H.: Humboldt und Salzburg. - Salzburg, 1982.
- BECKEDAHL, H. R.: Human Impact - geomorphic response. - In: Geoöko plus. - Bd. 4, 1997.

- BELLAN-SANTINI, D.: Functioning and dynamics of natural and perturbed ecosystems. - London, 1995.
- BIBER, A.: Die historische und aktuelle Entwicklung der Almwirtschaft und des Tourismus im Nationalpark Berchtesgaden und die Auswirkungen auf den Naturraum, unveröfftl. Diplomarbeit am Geographischen Institut der LMU München. - München, 2000.
- BIRGE, E. A.: Plankton studies on Lake Mendota: II. The Crustacea from the plankton from July, 1894, to December, 1896. - In: Trans. Wisconsin Acad. Sci. Arts Lett. - Bd. 11, S. 274-448, 1897.
- BIRKS, H. J. B.; BIRKS, H. H.: Quaternary palaeoecology. - London, 1980.
- BODECHTEL, J.(Hrsg.): Zur Tektonik des Gebietes westlich des Königssees/Berchtesgadener Alpen. - In: Geolog. Rdsch. - Bd. 1, S. 337-349, 1984.
- BOHLE, H. W.: Limnische Systeme. - Berlin, 1995.
- BRADBURY, J. P.: Elk Lake, Minnesota. Evidence for rapid climate change in the north-central United States. - In: Geological Society of America: Special Paper - Bd. 276, 1993.
- BRAUN, R.: Die Geologie des Hohen Gölls. - In: Forschungsberichte des NP Berchtesgaden. - Bd. 40, 1998.
- BRAUN, R.; VOGT, H.; KEITZ: Niederschlagsverteilung. - In: Forschungsberichte des NP Berchtesgaden. - Bd. xx, erscheint demnächst.
- BREMER, H.: Geomorphology and changing environments in Central Europe. - In: Zeitschrift für Geomorphologie - Bd. 110, 1997.
- BRETL, F.: Der Fremdenverkehr im Berchtesgadener Land. - Unveröffentlichte Diplomarbeit an der Universität Erlangen. - Erlangen, 1978.
- BROWN, A. G.: Fluvial processes and environmental change. - Chichester, 1999.
- BÜHRER, H.; AMBÜHL, H.: Die Einleitung von gereinigtem Abwasser in Seen. - In: Schweiz. Z. Hydrol. - Bd. 37, S. 347-369, 1975.
- BUNDESAMT FÜR EICH- UND VERMESSUNGSWESEN(Hrsg.): Österreichische Karte 1: 25000. - Blatt 124, Saalfelden. - Wien, 1996.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE(Hrsg.): Forschungsrahmenkonzeption Globale Umweltveränderungen. - Bonn, 1992.
- CARBOMONT (Hrsg.): Internetauftritt unter: [http://botany.uibk.ac.at/forschung/forschungsprojekte/carbomont\\_ordner/carbomont/](http://botany.uibk.ac.at/forschung/forschungsprojekte/carbomont_ordner/carbomont/). - Innsbruck, 2003.
- CEBON, P.; DAHINDEN, U.; DAVIES, H.; IMBODEN, D. M.; JAEGER, C. C.(Hrsg.): Views from the Alps - Regional Perspectives on Climate Change. - Cambridge, 1998.
- CHEN, C.T.; MILLERO, F.J.: Precise thermodynamic properties for natural waters covering only the limnological range. - In: Limnol. Oceanogr. - Bd. 31, S. 657-662, 1986.
- CHU, C.R.; SOONG, C.K.: Numerical simulation of wind-induced entrainment in a stably stratified water basin. - In: J. Hydraul. Res. - Bd. 35, S. 21-41, 1997.
- COENEN, R.(Hrsg.): Integrative Forschung zum globalen Wandel. Herausforderungen und Probleme. - Frankfurt, 2001.
- DE BRUYN, K.: Hydrologisch-hydrochemische Untersuchungen am Königssee anhand von Tiefenprofilen, unveröfftl. Diplomarbeit am Geographischen Institut der LMU München. - München, 2001.
- DEMERS, E.; KALFF, J.: A simple model for predicting the date of spring stratification in temperate and subtropical lakes. - In: Limnol. Oceanogr. - Bd. 38, S. 1077-1081, 1993.
- DEUTSCHES MAB-NATIONALKOMITEE: Ziele, Fragestellungen und Methoden. - Ökosystemforschung Berchtesgaden. - In: MAB-Mitteilungen, Bd. 16, 1983.

- DEUTSCHES MAB-NATIONALKOMITEE: Szenarien und Auswertungsbeispiele aus dem Testgebiet Jenner. – Ökosystemforschung Berchtesgaden. - In: MAB-Mitteilungen. - Bd. 17, 1984.
- DIKAU, R.: Global change - Konsequenzen für die Umwelt. - In: Europa in einer Welt im Wandel. - Bd. 3, 1998.
- DIKAU, R.: Global Change - Konsequenzen für die Umwelt. Einführung. - In: DIKAU, R.; HEINRITZ, G.; WIESSNER, R.(Hrsg.): Global Change - Konsequenzen für die Umwelt, S. 9-11, 1998.
- DIKAU, R.; HEINRITZ, G.; WIESSNER, R.(Hrsg.): Global Change - Konsequenzen für die Umwelt. - Stuttgart, 1998.
- DIN(Hrsg.): Deutsche Einheitsverfahren (DEV) zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung. - Weinheim, 1996.
- D' OLEIRE-OLTMANN; W.: Das Projekt MAB 6 in Berchtesgaden – Planung, Struktur, Perspektiven. – In: Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie. – Bd. 12, 1982.
- DOMMERMUTH, CH.: Beschleunigte Massenabtragung im Jennergebiet, Berchtesgaden. - In: Forschungsberichte des NP Berchtesgaden. - Bd. 32, 1995.
- DOWNES, M.T.: An improved hydrazin reducing method for the automated determination of low level nitrate levels in freshwater. - In: Water Res. - Bd. 12, S. 673-675, 1978.
- DWD (DEUTSCHER WETTERDIENST)(Hrsg.): Klimadaten zu den Stationen Bad Reichenhall, Schönau am Königssee und Bischofswiesen-Winkl. - München, 2003.
- EDINGER, J. E.; DUTTWEILER, D. W.; GEYER, J. C.: The Response of Water Temperatures to Meteorological Conditions. - In: Water Resources Research. - Bd. 4 (5), S. 1137-1143, 1968.
- EGGENSBERGER, P.: Kräfte der Veränderung im Alpenraum - Lernen vom 20. Jahrhundert. - München, 1999.
- ENDERS, G.: Theoretische Topoklimatologie. - In: Forschungsberichte des NP Berchtesgaden. - Bd. 1, 1979.
- EUGSTER, W.: Mikrometeorologische Bestimmung des NO<sub>2</sub>-Flusses an der Grenzfläche Boden/Luft. - In: Geographica Bernensia. - Bd. 37, 1994.
- EUROPARC; IUCN(Hrsg.): Richtlinien für Managementkategorien von Schutzgebieten - Interpretation und Anwendung der Managementkriterien in Europa. - Grafenau, 2000.
- FANG, X.; STEFAN, H.G.: Projections of climate change effects on water temperature characteristics of small lakes in the contiguous U.S. - In: Climatic Change. - Bd. 42, S. 377-412, 1999.
- FEHN, K.: Almen und Almwirtschaft im Berchtesgadener Land vom Mittelalter bis zur Gegenwart. - In: Zeitschrift für Agrargeschichte und Agrarsoziologie. - Bd. 16, S. 36-45, 1968.
- FINDENEGG, I.: Über den Sauerstoffgehalt tiefer Seen und seine indikatorische Bedeutung für ihren Trophiezustand. – In: Arch. Hydrobiol. – Bd. 30, S. 337-344, 1936.
- FINKE, L.: Landschaftsökologie. - Braunschweig, 1994.
- FISCHER, K. H.; WEIS, W.; SIEBECK, O.; MÜLLER, R.: Implications of slow deep water renewal of Lake Königssee derived from combined tritium-3helium measurements. - In: Arch. Hydrobiol. - Bd. 102(4), S. 409-414, 1985.
- FISCHER, K.: Die würmeiszeitliche und stadiale Vergletscherung der Berchtesgadener Alpen. - In: Untersuchungen zur Geomorphologie der Bundesrepublik

- Deutschland - Neue Ergebnisse der Geomorphologischen Kartierung. - Berliner Geogr. Abh. - Bd. 47, S. 207-225, 1988.
- FISCHER, K.: Geomorphologische Karte des Nationalparks Berchtesgaden. - 1:25000. - Augsburg, 2000.
- FISCHER, M.: Möglichkeiten der numerischen Ökosystem-Modellierung im Einzugsgebiet des Königssees. - Unveröffentlichte Studie im Auftrag der Nationalparkverwaltung Berchtesgaden. - München, 2002.
- FISCHER, M.: Rechnergestützte Auswertung von Windmessungen im Königssee – Einzugsgebiet, unveröffentl. Zulassungsarbeit am Geographischen Institut der LMU München. - München, 2001.
- FOREL, F. A.: La termique des laques l' eau douce. In : Verh. schweiz. naturf. Ges. – Bd. 75, S. 5-8, 1892.
- FRANZ, H. P.: Der deutsche Beitrag zum UNESCO-Programm "Der Mensch und die Biosphäre (MAB). Stand, Entwicklung, Ergebnisse und Ausblick. – In: MAB-Mitteilungen, Bd. 18, S. 1-197, 1985.
- FREDERICK, K. D.: Assessing the impacts of climate change on natural resource systems. - Dordrecht, 1994.
- GELLER, W.: The temperature stratification and related characteristics of Chilean lakes in midsummer. - In: Aquatic Sciences. - Bd. 54, S. 37-57, 1992.
- GERTEN, D.; ADRIAN, R.: Differences in the persistency of th North Atlantic Oscillation signal among lakes. . - In: Limnol. Oceanogr. - Bd. 46, S. 448-455, 2001.
- GLASER, R.: Klimageschichte Mitteleuropas. - Darmstadt, 2001.
- GOLLAN, T.: Vorhersage und Erklärung des Verhaltens und der Belastbarkeit von Ökosystemen unter veränderten Umweltbedingungen. - In: Bayreuther Forum Ökologie. - Bd. 16, 1995.
- GORHAM, E.; BOYCE, F.M.: Influence of lake surface area and depth upon thermal stratification and the depth of the summer thermocline. - In: J. Great Lakes Res. - Bd. 15, S. 233-245, 1989.
- GRANADOS, I.; TORO, M.: Recent warming in a high montain lake (Laguna Cimera, Central Spain) inferred by means of fossil chironomids. - In: J. Limnol. - Bd. 59, S. 109-119, 2000.
- GRASSL, H.: Nachhaltigkeit braucht Forschung zum Globalen Wandel. - In: DIKAU, R.; HEINRITZ, G.; WIESSNER, R.(Hrsg.): Global Change - Konsequenzen für die Umwelt, S. 12-21, 1998.
- GROTE, A.: Der Sauerstoffhaushalt der Seen. In: Binnengewasser. – Bd. 14, Stuttgart, 1934.
- GÜSS, S.; ALBRECHT, D.; KRAMBECK, H.J.; MÜLLER, NAVARRA, D.C.; MUMM, H.: Impact of climatic variables on the dynamics of a lake ecosystem (Plußsee) assessed by cyclo-stationary MCCA of long-term observations. Ex-terner Bericht der GKSS. - Geesthacht, 1998.
- HABER, W.; SPANDAU, L.; Tobias, K.(Hrsg.): Zusammenfassender Abschlussbericht der in den Fachbereichen durchgeführten Erhebungen (Entwurf). - Ökosystemforschung Berchtesgaden. In: UBA-FB-Berichte. - Bd. 90(1), 1988.
- HOFF, G.: Diplomkartierung an der Sektion Geographie des Departments für Geo- und Umweltwissenschaften der LMU München. – Nebenzuflüsse im EZG des Königssee. München, 2003.
- HOFMANN, G.: Klimatologie des Alpenparks, Windsysteme und Inversionen. - In: Forschungsberichte des NP Berchtesgaden. - Bd. 25, 1992.
- HOFMANN, G.: Luftchemische Messungen im Alpennationalpark Berchtesgaden und seinem Vorfeld in den Jahren 1996 bis 2000. – Unveröffentlichter Abschlussbericht. - München, 2002.

- HOLENSTEIN, J.; MAURER, H.: Umweltwandel am Bodensee. - St. Gallen, 1994.
- HOLLAN, E.: Erneuerung des Tiefenwassers im Bodensee durch weitreichende see-eigene Dichteströmungen. - In: Tagungsbericht 1998 der Deutschen Gesellschaft für Limnologie (DGL). - Bd. 1, S. 213-235, 1999.
- HOLLAN, E.: Mögliche Auswirkungen einer Klimaveränderung auf größere Binnenseen. - In: ARBEITSKREIS KLIWA (LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTEMBERG, BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT, DEUTSCHER WETTERDIENST(Hrsg.): Kliwa-Berichte, S. 213-235, 2001.
- HONDZO, M.; STEFAN, H. G.: Regional water temperature characteristics of lakes subjected to climate change. - In: Climate Change. - Bd. 24, S. 187-211, 1993.
- HONDZO, M.; STEFAN, H. G.: Three Case Studies of Lake Temperature and Stratification Response to Warmer Climate. - In: Water Resour. Res. - Bd. 27(8), S. 1837-1846, 1991.
- HUGGETT, R. J.: Environmental change. The evolving ecosphere. - London, 1997.
- HUPFER, M.: Binnengewässer und Klimaschwankungen. - In: Warnsignal Klima. Wissenschaftliche Fakten. Wissenschaftliche Auswertungen. - S. 292-297, 1998.
- HURRELL, J. W.; KUSHNIR, Y.; OTTERSON, G.; VISBECK, M.(Hrsg.): The North Atlantic Oscillation. - Climatic significance and Environmental Impact. - Washington, 2003.
- HUTCHINSON, G. E.: A treatise on limnology. - New York, 1957.
- IDSO, S.B.: On the concept of lake stability. - In: Limnol. Oceanogr. - Bd. 18, S. 681-683, 1973.
- IMBODEN, D.; WÜEST, A.: Mixing mechanisms in lakes. - In: A. LERMAN, D. IMBODEN, J. GAT (Hrsg.): Physics and chemistry of lakes. - S. 83-138, 1995.
- IPCC(Hrsg.): Climate Change 2001. - Impacts, Adaptation, and Vulnerability. - Cambridge, 2001.
- IPCC(Hrsg.): Climate Change 2001. - Mitigation. - Cambridge, 2001.
- IPCC(Hrsg.): Climate Change 2001. - The Scientific Base. - Cambridge, 2001.
- JOHANNES, B. : Die Erosivität der Niederschläge an einem alpinen Standort - Konsequenzen für die Isoerodenkarte von Bayern. - In: Ztsch. f. Kulturtechn. u. Landentw. - Bd. 38, S. 71-75, 1997.
- JOHANNES, B. : Oberflächenabfluss und Bodenabtrag bei künstlichen Starkniederschlägen von Almweideflächen im Nationalpark Berchtesgaden. - In: Forstwiss. Cbl. - Bd. 114, S. 293-301, 1995.
- KAREIVA, P. M.: Biotic interactions and global change. - Sunderland, 1993.
- KLEE, O.: Angewandte Hydrobiologie. - Stuttgart, 1991.
- KLIWA (ARBEITSKREIS KLIWA (LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTEMBERG UND BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT)(Hrsg.): Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. - In: KLIWA-Berichte, Bd. 1, 2000.
- KOBER, M.: Nationalparke im Hochgebirge: Konzepte, Begründung und Nutzungskonflikte, dargestellt an den Beispielen Nationalpark Berchtesgaden und Yellowstone-Nationalpark. - Berchtesgaden, 1998.
- KURDIREKTION DES BERCHTESGADENER LANDES(Hrsg.): Fremdenverkehrsstatistik für das Verbandsgebiet. - Berchtesgaden, 2002.
- LAMPERT, W.; SOMMER, U.: Limnoökologie. - Stuttgart, 1993.
- LANDAU, H.; WÖRLE, G.: Dokumentationsteil des Fachbereichs Limnologie. - Forschungsbericht zum UNESCO-Projekt „Man and Biosphere“, Ökosystemforschung Berchtesgaden. - Schorndorf, 1988.

- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) UND BUNDESMINISTER FÜR VERKEHR (BMV)(Hrsg.): Pegelvorschrift. - Anlage D. - Richtlinie für das Messen und Ermitteln von Abflüssen und Durchflüssen. - Hamburg, 1991.
- LANGENSCHIEDT, E. : Das Untersuchungsgebiet Jenner im Nationalpark Berchtesgaden - Beschreibung und Ergebnisse der Dauerbeobachtungen. - In: Forstw. Cbl. - Bd. 114, S. 282-284, 1995.
- LANGENSCHIEDT, E.: Geologie der Berchtesgadener Berge. - Berchtesgaden, 1994.
- LANGENSCHIEDT, E.; OTHOLD, D.: Geologische Karte von Bayern 1:25000. Nationalpark Berchtesgaden. - München, 1989.
- LIEBSCHER, H. J.: Mögliche Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Wasserbeschaffenheit von Fließgewässern. - In: Tagungsband Internat. Symposium Klimaänderung und Wasserwirtschaft. - Bd. 56b, S. 233-251, 1996.
- LIENER, S.: Zur Feststofflieferung in Wildbächen. - In: Geographica Bernensia - Bd. G 64, 2000.
- LIPPERT, W.; SPRINGER, S; WUNDER, H. : Die Farn- und Blütenpflanzen des Nationalparks. - In: Forschungsberichte des NP Berchtesgaden. - Bd. 37, 1997.
- LIVINGSTONE, D. M.: Temporal structure in the deep-water temperature of four Swiss lakes: A short-term climate change indicator? - In: Verh. Intern. Verein. Limnol. - Bd. 25, S. 75-81, 1993.
- LIVINGSTONE, D. M.: An Example of the simultaneous occurrence of climatic-driven "sawtooth" deep-water warming/cooling episodes in several Swiss lakes. - In: Verh. Intern. Verein. Limnol. - Bd. 26, S. 822-828, 1997.
- LIVINGSTONE, D. M.: Ice break-up on southern Lake Baikal and its relationship to local and regional air temperatures in Siberia and to the North Atlantic Oscillation. - In: Limnol. Oceanogr. - Bd. 44(6), S. 1486-1497, 1999.
- LIVINGSTONE, D. M.: Large-scale climatic forcing detected in historical observations of lake ice break-up. - In: Verh. Intern. Verein. Limnol. - Bd. 27, S. 2775-2783, 2000.
- LIVINGSTONE, D. M.: Eighty years of spatially coherent Austrian lake surface temperatures and their relationship to regional air temperature and the North Atlantic Oscillation. - In: Limnol. Oceanogr. - Bd. 46(5), S. 1220-1227, 2001.
- LIVINGSTONE, D. M.: Impact of Secular Climate Change on the Thermal Structure of a large Temperature Central European Lake. - In: Climate Change. - Bd. 57, S. 205-225, 2003.
- LIVINGSTONE, D.M.; LOTTER, A.F.: The relationship between air and water temperatures in lakes of the Swiss Plateau: a case study with paleolimnological implications. - In: J. o. Paleolimnology - Bd. 19, S. 181-198, 1998.
- LIVINGSTONE, D.M.; LOTTER, A.F.; WALKER, I.R.: The Decrease in Summer Surface Water Temperature with Altitude in Swiss Alpine Lakes: A Comparison with Air Temperature Lapse Rates. - In: Arctic, Antarctic and Alpine Research. - Bd. 31(4), S. 341-352, 1999.
- LOZÁN, J. L.; MERKT, J.; PACHUR, H.-J.: Klima und Binnenseen. - In: Warnsignal Klima. Wissenschaftliche Fakten. Wissenschaftliche Auswertungen. - S. 90-97, 1998.
- MAGNUSON, J.; ROBERTSON, D.; BENSON, B.; WYNNE, R.; LIVINGSTONE, D.; TADASHI ARAI; ASSEL, R.; BARRY, R.; CARD, V.; KUUSISTO, E.; GRANIN, N.; PROWSE, T.; STEWART, K.; VUGLINSKI, V.: Historical Trends in Lake and River Ice Cover in the Northern Hemisphere. - In: Science - Bd. 289, S. 1743-1746, 2000.



- MANDL, F: Das östliche Dachsteinplateau. In: CERWINKA, G.; MANDL, F (Hrsg.): Vier Jahrtausende Almen im Hochgebirge. - Bd. 1, 1996.
- MANGHABATI, A.: Einfluss des Tourismus auf die Hochgebirgslandschaft am Beispiel des Nationalparks Berchtesgaden. - In: Forschungsberichte des NP Berchtesgaden. - Bd. 13, 1988.
- MANNSFELD, K.; GRUNEWALD, K.; GEBEL, M.: Methoden zur Quantifizierung diffuser Nährstoffeinträge in Gewässer. - In: Materialien zur Wasserwirtschaft - Bd. , 1998.
- MATTHEWS, J. A.: The encyclopaedic dictionary of environmental change. - London, 2001.
- MAURER, H.(Hrsg.): Umweltwandel am Bodensee. - St. Gallen, 1994.
- MAUSER, W.; COLGAN, A.; LUDWIG, R.; NIEMEYER, S.; PROBECK, M.; REICHERT, D.; STOLZ, R.: Glowa-Danube - Werkzeuge zum Integrativen Einzugsgebiets-Management der Oberen Donau. - In: Münchener Geographische Abhandlungen - Bd. A 52, S. 275-285, 2002.
- MCCOMBIE, A. M.: Some relations between air temperatures and the surface water temperature of lakes. - In: Limnol. Oceanogr. - Bd. 4, S. 252-258, 1959.
- MESSERLI, B. und MESSERLI, P.: Wirtschaftliche Entwicklung und ökologische Belastbarkeit im Berggebiet. – Nationales Forschungsprogramm MAB des Schweizerischen Nationalfonds. – In: Fachbeiträge zur Schweizerischen MAB-Information. – Bd. 1; S. 1-16, 1979.
- MESSERLI, B.: Die Verantwortung der Geographie und der Wissenschaft für Europa und die Welt im Wandel. - In: DIKAU, R.; HEINRITZ, G.; WIESSNER, R.(Hrsg.): Global Change - Konsequenzen für die Umwelt, S. 22-31, 1998.
- METZLER, D.; JOB, H.: Regionalökonomische Effekte des Tourismus im Nationalpark Berchtesgaden. - In: Jahrbuch für Fremdenverkehr, Organ des Deutschen Wirtschaftswissenschaftlichen Institutes für Fremdenverkehr an e. V. an der Universität München. - Bd. 45, S. 29-45, 2003.
- MICHLER, G.: Der Wärmehaushalt des Sylvensteinspeichers . - In: Münchener Geographische Abhandlungen. - Bd. 12, 1974.
- MICHLER, G.: Vergleichende Temperatur- und Sauerstoffmessungen in 30 südbayerischen Seen während der Frühjahrsvollzirkulation und der Sommerstagnation im Jahr 1984. - In: Beiheft zu den Berichten d. Akademie f. Naturschutz u. Landschaftspflege. - Bd. 6, S. 145-166, 1987.
- MICHLER, G: Untersuchungen an Sedimentkernen aus 25 südbayerischen Seen hinsichtlich umweltrelevanter und paläoökologischer Fragestellungen – ausgewählte Beispiele. - In: Verh. Ges. Ökologie. - Bd. 12, S. 391-401, 1982.
- MOSIMANN, TH.: Landschaftsökologie - Stand der Forschung. - In: DIKAU, R.; HEINRITZ, G.; WIESSNER, R.(Hrsg.): Global Change - Konsequenzen für die Umwelt, S. 210-211, 1998.
- MÜLLER, R. : Die Verteilung des Sauerstoffs im Königssee und ihre Ursachen, unveröffentl. Diplomarbeit der Fakultät für Biologie der LMU München. - München, 1981.
- NATIONALPARKVERWALTUNG BERCHTESGADEN(Hrsg.): Internetauftritt unter [www.nationalpark-berchtesgaden.de](http://www.nationalpark-berchtesgaden.de). - Berchtesgaden, 2003.
- NATIONALPARKVERWALTUNG BERCHTESGADEN(Hrsg.): Nationalparkplan. - Berchtesgaden, 2000.
- NATIONALPARKVERWALTUNG BERCHTESGADEN(Hrsg.): Verleihung des Europadiploms. - Berchtesgaden, 1990.
- NISBET, E. G. : Globale Umweltveränderungen. Ursachen, Folgen, Handlungsmöglichkeiten, Klima, Energie, Politik. - Heidelberg, 1994.

- OHLENDORF, C.; BIGLER, C.; GOUDSMIT, G.-H.; LEMCKE, G.; LIVINGSTONE, D.M.; LOTTER, A.F.; MÜLLER, BEATE; STURM, M.: Causes and effects of long periods of ice cover on a remote high Alpine lake. - In: J. Limnol. - Bd. 59 (Suppl. 1), S. 65-80, 2000.
- OLIVER, H. R. : The role of water and the hydrological cycle in global change. - In: NATO: Nato, ASI series/I - Bd. 31, 1995.
- PRAML, C.: GIS – unterstützte Untersuchungen zur Nährstoffdynamik im Einzugsgebiet des Königssees, Nationalpark Berchtesgaden. unveröfftl. Diplomarbeit am Geographischen Institut der LMU München. - München, 2001.
- REGIERUNG VON OBERBAYERN(Hrsg.): Hinweise zur Bewirtung auf Almen. - München, 1991.
- ROBERTS, N.: The changing global environment. - Oxford, 1994.
- ROBERTSON, D. M.; RAGOTZKIE, R. A. : Changes in the thermal structure of moderate to large sized lakes in response to changes in air temperature. - In: Aquatic Sciences. - Bd. 52/4, S. 360-379, 1990.
- ROßKNECHT, H.: Langjährige Entwicklung chemischer Parameter im Bodensee-Obersee. - In: Ber. Int. Gewässerschutzkomm. Bodensee - Bd. 48, 1998.
- SANEI, H. ET AL. : Characterizing the Recent Sediments from Pigeon Lake, Alberta as Related to Anthropogenic and Natural Fluxes. - In: Environmental Geosciences - Bd. 2, S. 177-189, 2000.
- SCHAUMBURG, J.: Seen in Bayern - Limnologische Entwicklung von 1980 bis 1994. - In: Informationsberichte des Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft - Bd. 1/96, S. 1-216, 1996.
- SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P.: Lehrbuch der Bodenkunde. - Stuttgart, 1992.
- SCHELLNHUBER, H.-J.: Earth system analysis. - Berlin, 1998.
- SCHINDLER, D. W.; BAYLEY, S. E.; PARKER, B. R.; BEATY, K. G.; CRUIKSHANK, D. R.; FEE, E. J.; SCHINDLER, E. U.; STANTON, M. P.: The effects of climate warming on the properties of boreal lakes and streams at the Experimental Lakes Area, northwestern Ontario. - In: Limno. Oceanogr. - Bd. 41(5), S. 1004-1017, 1996.
- SCHINDLER, D. W.; BEATY, K. G.; FEE, E. J.; CRUIKSHANK, D. R.; DEBRUYN, E. R.; FINDLAY, D. L.; LINSEY, G. A.; SHEARER, J. A.; STANTON, M. P.; TURNER, M. A.: Effects of Climatic Warming on Lakes of the Central Boreal Forest. - In: Science. - Bd. 250, S. 967-970, 1990.
- SCHINDLER, D. W.; CURTIS, P. J.; PARKER, B. R.; STANTON, M. P.: Consequences of climate warming and lake acidification for UV-B penetration in North American boreal lakes. . - In: Nature. - Bd. 379, S. 705-708, 1996.
- SCHINDLER, O.: Der Königssee als Lebensraum. - In: Veröffentlichungen der Zoologischen Staatssammlung München. - Bd. 1, S. 99-130, 1950.
- SCHLENKHOFF, A. U.: A Water Quality Tool for the Reservoir Wupper. IAWQ-IWSA Joint Specialist Conference on Reservoir Management and Water Supply. - Prague, 1997.
- SCHLENKHOFF, A. U.: Die Simulation der Gewässergüte mit DYRESM am Beispiel der Wuppertalsperre. - Aachen, 1996.
- SCHMIDT, G.: Möglichkeiten und Grenzen der durchflussorientierten Probennahme im Rahmen der Bilanzierung von Nährstofffrachten für Fließgewässer. - In: Leipziger Geowissenschaften - Bd. 11, S. 45-51, 1999.
- SCHMIDT, G.; FRÜHAUF, M.: Abflussdynamik und Stofftransport im Einzugsgebiet des wiedererentstehenden salzigen Sees. - In: Geoöko. - Bd. 21, S. 229-252, 2000.

- SCHMIDT, G.; FRÜHAUF, M.: Nährstoffbilanzierungen für Fließgewässereinzugsgebiete als Grundlage zur Planung von Nutzungsänderungen im Einzugsgebiet des wiedererentstehenden sazigen Sees. - In: Geoöko. - Bd. 23, S. 153-174, 2002.
- SCHMIDT, W.: Über Temperatur- und Stabilitätsverhältnisse von Seen. - In: Geogr. Ann. - Bd. 10, S. 145-177, 1928.
- SCHMIDTLEIN, S.: Aufnahme von Vegetationsmustern auf Landschaftsebene. – Forschungsberichte des Nationalpark Berchtesgaden. - In: Forschungsberichte des NP Berchtesgaden. - Bd. 44, 2000.
- SCHNEIDER, S.: Untersuchungen zur vertikalen Verteilung des Sauerstoffgehaltes im Königssee (Nationalpark Berchtesgaden) – Ein Methodenvergleich. - München, 2001.
- SCHÖNER, H.: Berchtesgadener Fremdenverkehrschronik, 1871-1922, (Teil I). - Berchtesgaden, 1971.
- SCHÖNER, H.: Berchtesgadener Fremdenverkehrschronik, 1871-1922, (Teil I). - Berchtesgaden, 1974.
- SCHWAB, D.J.; MORTON, J.A.: Estimation of overlake wind speed from overland wind speed: a comparision of three methods. - In: J. Great Lakes Res. - Bd. 10, S. 68-72, 1984.
- SEITZ, G.: Untersuchungen zum Nitrat-, Phosphat- und Silikathaushalt im Königssee, unveröfftl. Diplomarbeit der Fakultät für Biologie der LMU München. - München, 1979.
- SHUTER, B. J.; SCHLESINGER, D. A.; ZIMMERMANN, A. P.: Empirical Predictors of annual surface water temperatures cycles in North American Lakes. - In: Can. J. Fish. Aquati. Sci. - Bd. 40, S. 1838-1845, 1983.
- SIEBECK, O.: Der Königssee. - Eine limnologische Projektstudie. - In: Forschungsberichte des NP Berchtesgaden. - Bd. 5, 1982.
- SIEBECK, O.; MÜLLER, R.: Die Schichtungsverhältnisse des Königssee. - In: Arch. Hydrobiol. - Bd. 101 (1/2), S. 289-301, 1984.
- SIEBECK, O.; TRAUNSPURGER, W.: Der Königssee - eine limnologische Studie als Grundlage für eine Ökosystemanalyse. - In: Verh. d. Ges. f. Ökologie - Bd. 23, S. 63-68, 1994.
- SMITH, J. B.: Adapting to climate change. - New York, 1996.
- SMOL, J. P.: Paleolimnology: recent advances and future challenges. - In: Mem. Ist. Ital. Idrobiol. - Bd. 47, S. 253-276, 1990.
- SMOL, J. P.; WALKER, I. R.; LEAVITT, P. R.: Paleolimnology and hindcasting climatic trends. - In: Verh. Int. Ver. Limnol. - Bd. 24, S. 1240-1246, 1991.
- SPANDAU, L.: Der Einfluss des Sommertourismus auf die natürlichen Ressourcen untersucht im MAB - Testgebiet Jenner. - In: MAB-Mitteilungen - Bd. 19, S. 165-171, 1984.
- SPANDAU, L.; SIUDA, C.; Das Geographische Informationssystem im MAB 6-Projekt. – Ökosystemforschung Berchtesgaden. – Fachbereichsbericht FB 93 Kartographie, Datenaufbereitung. Unveröffentlichte Studie der Nationalparkverwaltung Berchtesgaden. - Berchtesgaden, 1985.
- SPIEGEL-SCHMIDT, A.: Alte Forschungs- und Reiseberichte aus dem Berchtesgadener Land. - In: Forschungsberichte des NP Berchtesgaden. - Bd. 14, 1988.
- STAATLICHE SEENSCHIFFFAHRT KÖNIGSSEE(Hrsg.): Fahrgaststatistiken. - Berchtesgaden, 2002.
- STAHR, A. ;DOMMERMUTH, Ch.: Erosion im Hochgebirge und der strukturelle Wandel der Almwirtschaft. - In: Spektrum d. Wiss. - Bd. 5, S. 16-18, 1993.

- STAHR, A.: Bodenkundliche Aspekte der Blaikenbildung auf Almen. - In: Forschungsberichte des NP Berchtesgaden. - Bd. 36, 1997.
- STAHR, A.; DOMMERMUTH, Ch.: Erosion im Hochgebirge und der strukturelle Wandel der Almwirtschaft. - In: Spektrum der Wissenschaft - Bd. 5, S. 16-18, 1993.
- STAHR, K.: Puffern Böden Umweltbelastungen?. - In: DIKAU, R.; HEINRITZ, G.; WIESSNER, R.(Hrsg.): Global Change - Konsequenzen für die Umwelt, S. 50-64, 1998.
- STANLEY, S. M.: Historische Geologie. - Heidelberg, 1994.
- STEFAN, H.G.; FANG, X.: Simulated climate change effects on year-round water temperatures in temperate zone lakes. - In: Climate Change. - Bd. 40, S. 547-576, 1998.
- STRAILE, D; LIVINGSTONE, D. M.; WEYHENMEYER, G; GEORGE, D.: The Response of Freshwater Ecosystems to Climate Variability Associated with the North Atlantic Oscillation. - In: (Hrsg.): The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact. - Geophysical Monograph 134 by the American Geophysical Union, S. 263-279, 2003.
- STRZEPEK, K. M.(Hrsg.): As climate changes. - Cambridge, 1995.
- STUMM, W.: Die Beeinträchtigung aquatischer Ökosysteme durch die Zivilisation. - In: Verh. d. Ges. Deutscher Naturf. u. Ärzte - Bd. 109, S. 25-33, 1978.
- TASCH, P.: Aufbau, Kalibrierung und Auswertung eines automatischen Abflussmesssystems an den Hauptzuflüssen im Einzugsgebiet des Königssees / Nationalpark Berchtesgaden, unveröfftl. Diplomarbeit am Geographischen Institut der LMU München. - München, 2002.
- UMWELTBUNDESAMT GMBH(Hrsg.): Jahresbericht 1999. - Luftgütemessungen des Umweltbundesamtes und meteorologische Messungen. - Wien, 2000.
- UMWELTBUNDESAMT GMBH(Hrsg.): Jahresbericht 2000. - Luftgütemessungen des Umweltbundesamtes und meteorologische Messungen. - Wien, 2001.
- UMWELTBUNDESAMT GMBH(Hrsg.): Jahresbericht 2001. - Luftgütemessungen des Umweltbundesamtes und meteorologische Messungen. - Wien, 2002.
- VALLENTYNE, J.R.: Principals of modern limnology. - In: Amer. Sci. - Bd. 45, S. 218-244, 1957.
- VISCONTI, G.(Hrsg): Global change and protected areas. - In: Advances in global change research. - Bd. 9, 2001.
- WANNER, H.; EUGSTER, W.: Hausgemachtes oder Ferntransport? Probleme des Europäischen Lufthaushaltes. - In: DIKAU, R.; HEINRITZ, G.; WIESSNER, R.(Hrsg.): Global Change - Konsequenzen für die Umwelt, S. 34-49, 1998.
- WASSERWIRTSCHAFTSAMT TRAUNSTEIN(Hrsg.): Daten zur limnologischen Situation des Königssees. - Traunstein, 1996.
- WEIGAND, E.; PELIKAN, U.; RATSCHAN, C.; SCHEDER, C.: Gewässerökologische Bewertung des Einflusses von Alm- und Forstwirtschaft auf Karstquellen im Nationalpark Kalkalpen (Österreich). - In: Revue de Géographie Alpine. - Bd. 2, S. 103-115, 2002.
- WETZEL, R.: Limnology. - Lake and River Ecosystems. - San Diego, 2001.
- WHEATER, H.(Hrsg.): Global hydrological processes. Hydrology in a changing environment. - Chichester, 1998.

## Lebenslauf

Name: Mark Vetter  
Geburtsdatum: 07.04.1972  
Geburtsort: Berlin-Reinickendorf  
Familienstand: ledig  
Staatsangehörigkeit: deutsch

**Schulausbildung:** *1978-1984*  
Grundschule in Berlin-Renickendorf  
*1984-1991*  
Realschule/Gesamtschule mit gymnasialer Oberstufe in  
Berlin-Reinickendorf  
Abschluss: Abitur

**Studium:** *10/1991 - 04/1998*  
Studium der Geographie an der Humboldt-Universität zu  
Berlin  
Nebenfächer: Geoinformatik und Gartenbau  
Abschluss: Diplom  
*04/1998 - 06/2001*  
Promotionsstudium am Institut für Geographie der Univer-  
sität München (Stipendium)

**Beruflicher Werdegang:** *seit 06/2001*  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Sektion Geographie  
des Departments für Geo- und Umweltwissenschaften der  
LMU München

München den 22.12.2003