

## 3.11 Klima und Witterung

### 3.11.1 Entwicklung und heutiger Zustand / Prognose

#### *Das Klima im Bodenseegebiet*

Der Bodensee liegt in der warmgemäßigten feuchten Klimazone, im Einflussbereich von atlantischem und kontinentalem Klima. Aus westlicher Richtung erhält der Bodenseeraum feuchte Meeresluft, aus dem Osten vorwiegend trockene, kühle Kontinentalluft. Daneben ist der Raum vom Alpenföhn betroffen, der das Rheintal wie einen Kanal durchströmt und auf den östlichen Teil des Obersees bis etwa Friedrichshafen hinausströmt.

Die Jahresmitteltemperatur beträgt 8-9 °C, das Januarmittel liegt um -1°C, das Juli-mittel bei +18°C [1]. Die große Wassermasse des Sees wirkt ausgleichend auf die Lufttemperaturen der Umgebung: In den Monaten Februar bis Juli speichert das Wasser eine Wärmemenge von durchschnittlich  $585 \times 10^{15}$  Joule, welche von August bis Januar wieder an die Umgebung abgegeben wird [2]. Der milde Winter und eine frostfreie Periode von rund 210 Tagen ermöglichen am See den Anbau temperatur-empfindlicher Pflanzenkulturen. Die Niederschläge nehmen infolge des Staueffekts der Alpen von West nach Ost zu: in Radolfzell fallen durchschnittlich 805 mm im Jahr, in Konstanz 847 mm, in Romanshorn 900 mm und in Bregenz 1 380 mm. Der Anteil der Schneefälle am Niederschlag beträgt bei der Wetterstation Romanshorn derzeit 17%, wobei eine sinkende Tendenz zu verzeichnen ist [3].

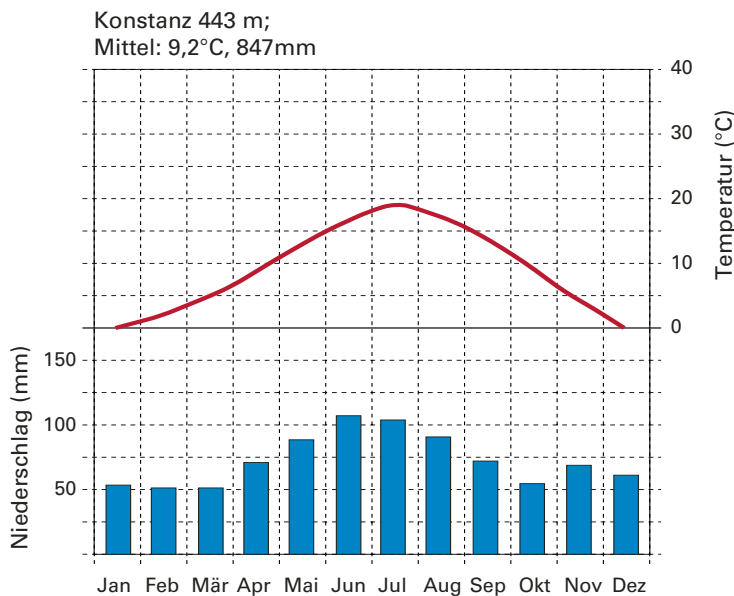


Abb. 3.11-1: Temperaturverlauf und Niederschläge im Mittel der Jahre 1961-1990 in Konstanz [nach 4].

Neben dem großräumigen Windsystem und dem regionalen Einfluss des Alpenföhns wirkt am Bodensee die auch für Meeresküsten typische Erscheinung der See- und Landwinde, die aus der unterschiedlichen Lufterwärmung über dem Wasser und über dem Land resultiert.

#### *Klimaänderungen*

Das mitteleuropäische Klima unterliegt nach dem Ende der letzten Kaltzeit starken Schwankungen. Für die letzten 1000 Jahre lassen sich für Süddeutschland mittelfri-

**Warmgemäßigtes  
Klima und Alpenföhn**

**Das Klima im Boden-  
seegebiet ist günstig  
für empfindliche  
Pflanzenkulturen**

**Schneefälle sind  
rückläufig**

### Viele Klimaschwankungen seit der letzten Eiszeit

Das fast völlige Zufrieren des gesamten Bodensees, eine "Seegfröne", ereignete sich zum letzten Mal im Februar und März des Jahres 1963. Seither entwickelte sich eine durchgehende Eisdicke nur noch in einigen Teilen des Bodensee-Untersees.

Fotos [j,a]; Foto links unten [m]

stige Temperaturvariationen von bis zu 1,5°C nachweisen [5]. Während der „Kleinen Eiszeit“ kam es am Bodensee im 14.-16. Jahrhundert zu einer Abkühlung mit einer Häufung von Seegfröne-Ereignissen. Im 20. Jahrhundert hingegen hat die Durchschnittstemperatur global um 0,6°C ± 0,2°C zugenommen [6]. Mitverursacht wird dies nach heutiger Erkenntnis durch die anthropogene Verstärkung des Treibhauseffekts durch die zunehmende Emission treibhauswirksamer Gase.



### Deutliche Temperaturzunahme im Winter

Am Bodensee nahmen im Zeitraum zwischen 1880 und 1997 die Jahrestemperaturen nach Aufzeichnungen der Wetterstation Romanshorn um 1,5°C zu. Deutliche Temperaturzunahmen um bis zu 2°C werden vor allem für die Wintermonate verzeichnet [3]. Ein deutlicher Temperaturanstieg war in den letzten 40 Jahren auch in

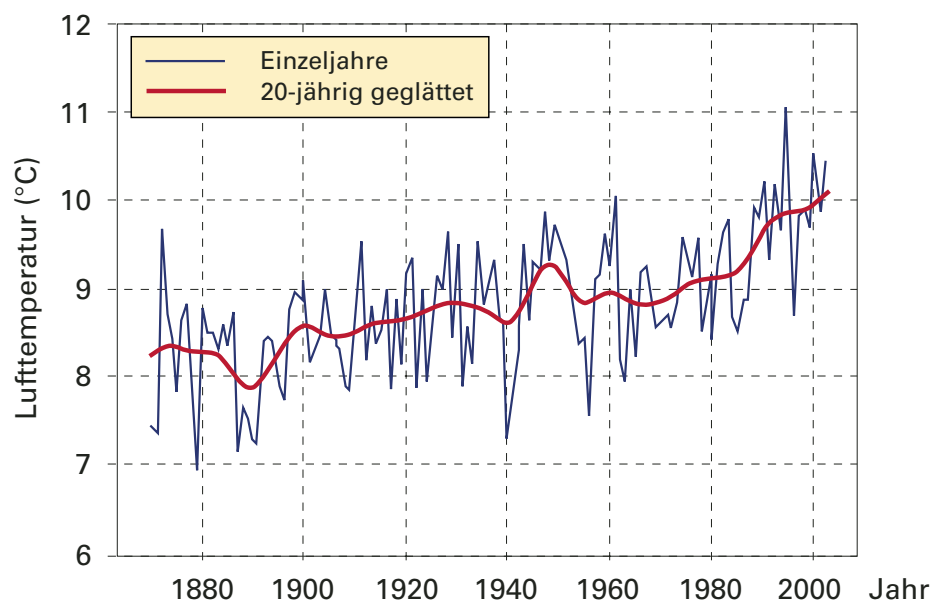


Abb. 3.11-2: Verlauf der mittleren Jahrestemperaturen in Bregenz seit 1880 [7].

Bregenz zu verzeichnen (Abb. 3.11-2). Im Rahmen des Projektes „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA, seit 1999) wurden Änderungen der Klimagrößen und des Wasserhaushalts im regionalen Bereich für Baden-Württemberg und Bayern untersucht. Hier wurden für das 20. Jahrhundert folgende Trends festgestellt (KLIWA-Symposium 2000, [8]):

- Zunahme der winterlichen Starkniederschlagshöhen im Zeitraum 1931-98, in großen Teilen Baden-Württembergs um bis zu 40 % des Mittelwertes der Extremwertserien.
- Häufung der Niederschlagsextremwerte in einem Zeitraum von ca. 10-15 Jahren vor und einschließlich 1995, keine weitere Zunahme bis 1998.
- Abnahme der mittleren Schneedeckendauer im Zeitraum 1951/52 bis 1995/96 in Abhängigkeit von der Höhenlage (in den unteren Höhenlagen um 40 % und mehr, in Kamm- und Gipfelbereichen um < 10 %).
- Abnahme der Jahressummen der potenziellen Verdunstung im Zeitraum 1931-1996. Verminderung der potenziellen Verdunstung im Sommer, Zunahme im Winter.

Mit Hilfe von Klimamodellen wird versucht, den Einfluss der klimarelevanten Gase auf das zukünftige Klima zu berechnen. Die Modellierungen beruhen auf Szenarienberechnungen, bei denen der künftige Ausstoß von Treibhausgasen und die Verteilung von Aerosolen variiert werden.

Mit den neuerdings - ausgehend von Globalmodellen - entwickelten Regionalmodellen wird versucht, für kleinere Gebietseinheiten künftige Änderungen des Klimas und deren Auswirkungen vorausszusagen. Ob allerdings der derzeitige Stand der Klimaforschung belastbare Aussagen über Klimaänderungen auf regionaler Ebene zulässt, wird noch diskutiert.

Für Bayern bzw. den süddeutschen Raum wurde im Rahmen des Bayerischen Klimaforschungsprogrammes (BayFORKLIM) ein regionales Klimamodell entwickelt [9]. Alpenraum und Bodenseeregion sind teilweise in die Modellierung miteinbezogen. Bei einer Verdopplung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes gegenüber 1990 würden sich nach diesem Modell folgende Änderungen des regionalen Klimas ergeben [9]:

- Die im Winter in Mitteleuropa vorherrschende westliche Anströmung nimmt an Intensität zu. Dies führt zu einer leichten Erwärmung und Niederschlagszunahme im Winter.
- In den Sommermonaten wird im Mittel die Zufuhr atlantischer Luftmassen schwächer, so dass in Süddeutschland der kontinentale Einfluss stärker werden kann. Die Sommer werden deutlich wärmer und trockener, wobei die gravierendsten Veränderungen im Bodenseegebiet auftreten.
- Insgesamt nimmt die Jahresmitteltemperatur um rund 2 bis 2.5 Grad zu.

#### *Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen*

Künftige Veränderungen des Abflussgeschehens können angesichts der prognostizierten Änderungen von Klimagrößen auch für das Einzugsgebiet des Bodensees nicht ausgeschlossen werden:

- Die prognostizierte weitere Zunahme der Niederschläge im Winter führt zusammen mit der steigenden Schneefallgrenze zu einer Zunahme der Winterabflüsse.

**Klimatrends im Bodenseegebiet**

**Regionale Klimaprognosen und -modelle**

**Mehr Hochwasser im Winter**

**Abschmelzen der Gletscher****Vermehrte Erosionen im Einzugsgebiet****Veränderungen der Bodensee-Wasserstände****Leichter Anstieg der Seetemperatur****Mögliche Probleme bei der Wasserdurchmischung**

- Die mittlere Hochwasserhäufigkeit wird im Winter eher steigen und im Sommer eher etwas abnehmen. Die Resultate betreffend der Tendenzen des sommerlichen Niederschlagsklimas sind jedoch unsicher.
- In vergletscherten Einzugsgebieten werden die sommerlichen Abflüsse dank des Schmelzwassers zunächst eher zunehmen. Mit zunehmendem Gletscherschwund wird jedoch die Anzahl und Dauer der Niedrigwasserführung von glazial beeinflussten Gewässersystemen besonders in trockenen Sommermonaten zunehmen.
- Als Folge der Zunahme von Starkniederschlägen kann die Erosion und damit der Stoffeintrag in die Gewässer (Feststoffe, Nährstoffe, Schadstoffe) erhöht werden.

Die Erforschung der Auswirkungen der sich abzeichnenden *Klimaänderungen* auf das Seegeschehen steht erst in ihren Anfängen. Erste Arbeiten zu diesem Thema wurden in den letzten Jahren begonnen [z. B. 11, 12].

**3.11.2 Auswirkungen auf den See***Wasserstand*

Mögliche Folge einer Klimaerwärmung und Zunahme der Trockenheit im Sommer ist eine geringere Wasserzufuhr durch die Flüsse und eine höhere Verdunstung aus dem See. Aus den fallenden Wasserständen würden sich Auswirkungen auf Ufervegetation und Fauna – wie die Beschneidung der Brutgebiete – ergeben. Tatsächlich wurden für die letzten 100 Jahre deutliche Veränderungen der Bodensee-Wasserstände festgestellt (s. Kap. 1). So fielen die jährlichen Höchstwasserstände des Obersees in dieser Zeit um 27 cm und die des Untersees um 25 cm. Auch die mittleren Wasserstände sind im Obersee um 16 cm gefallen [13]. Als Ursache werden Veränderungen der hydraulischen Bedingungen – Abgrabungen, Bauwerke, Erosionsvorgänge im Seeauslauf und der Wasserrückhalt durch Speicherkraftwerke im Einzugsgebiet – genannt. Inwieweit Klimaänderungen zum Fallen der Wasserstände beitragen bzw. beitragen werden, ist ungewiss.

*Temperaturhaushalt*

Im Zeitraum 1964-1996 variierte die Jahresdurchschnittstemperatur im Freiwasser des Obersees zwischen 5,0 °C und 6,3 °C, der Mittelwert über die 33 Jahre lag bei 5,7 °C (Abb. 3.11-3). Es lassen sich mehrere Erwärmungs- und Abkühlungsphasen unterscheiden. Es ist jedoch auch eine insgesamt leicht steigende Tendenz der Seetemperatur seit Beginn der Messreihe festzustellen. Inwieweit diese Tendenz bereits eine globale Erwärmung nachzeichnet, ist unklar, da die klimatologischen Verhältnisse äußerst komplex sind und ihr Einfluss auf die Seetemperatur nicht aus kurz- und mittelfristigen Schwankungen abgeleitet werden kann [14].

*Schichtungs- und Zirkulationsverhalten*

Die limnologisch bedeutsame winterliche Tiefenwassererneuerung und Sauerstoffregeneration werden im Wesentlichen von folgenden Prozessen bestimmt: Vertikalzirkulation / Konvektion, seitliches Einströmen von schwerem kalten Oberflächenwasser aus flacheren Randbereichen des Sees und tiefe Einschichtung von Flusswasser. Alle diese Prozesse sind stark temperaturgesteuert und setzen kalte Winter voraus. Der derzeitige Trend der Klimaentwicklung lässt künftig eine Reihe aufeinander folgender Jahre mit unvollständiger Zirkulation im Bodensee wahrscheinlicher werden als früher [15]. Dadurch würden die sonst regelmäßig bis in größte Tiefe wirkenden Austauschvorgänge länger unterbrochen mit der Folge einer „Alterungstendenz der untersten Schichten“ [11].

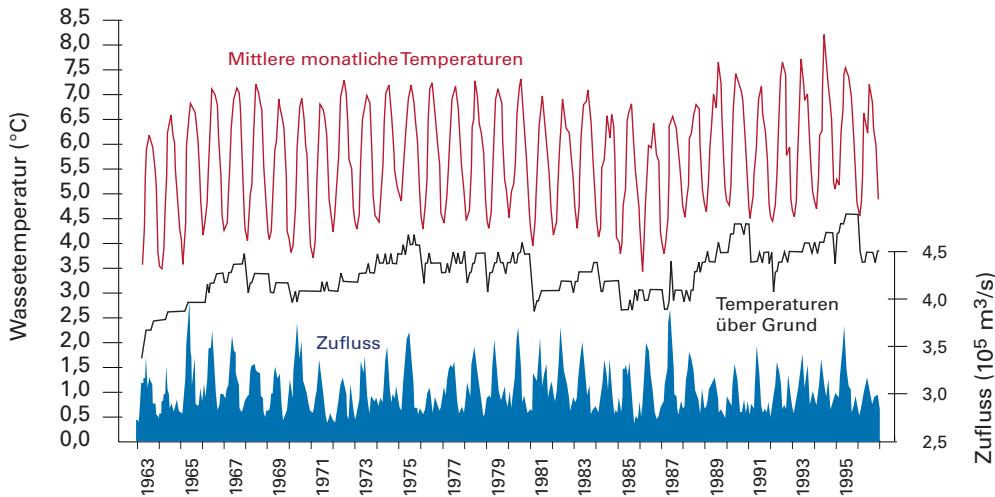


Abb. 3.11-3: Mittlere monatliche Temperaturen im Freiwasser des Obersees, Temperaturen in 1 m über Grund und mittlere monatliche Zuflussmenge, 1963-96 [nach 14]

### Nährstoffhaushalt

Mit einer verstärkten Erosion als mögliche Folge einer klimabedingten Zunahme von Starkniederschlägen wäre ein erhöhter Feststoff- und Nährstoffeintrag in die Gewässer verbunden. Das Niederschlagswasser selbst könnte durch ein häufigeres Anspringen der Regenentlastungen einen zusätzlichen Eintrag ungenügend behandelter Abwässer in die Seezuflüsse bewirken.

### Biologische Systeme

Die – als Folge des Abbaus stratosphärischen Ozons („Ozonloch“) - erhöhte UV-Strahlung kann Veränderungen im Plankton des Sees hervorrufen. Bei Untersuchungen im Rahmen des Bayerischen Klimaforschungsprogramms wurde ein hemmender Einfluss von UV-B-Strahlung auf die Sauerstoffproduktion von *Euglena gracilis*, einer auch im Bodensee vorkommenden Flagellatenart, nachgewiesen. Bis in Wassertiefen von 15-20 cm wurden sogar letale Schädigungen an Zooplanktern festgestellt. Jedoch dürften auch in größeren Tiefen noch subletale Schäden, die sich auf das Populationswachstum negativ auswirken würden, möglich sein [9]. Besonders im Flachwasserbereich muss mit Schädigungen der Biozöosen bei einer Erhöhung der UV-Einstrahlung gerechnet werden.

#### 3.11.3 Handlungserfordernisse

Die Auswirkungen der globalen Klimaänderung auf den Bodensee sind bisher noch nicht ausreichend bekannt. Die Klimamodellierungen im Rahmen des Programms BayFORKLIM, in denen Bodensee- und Alpengebiet zum Teil miterfasst wurden, erlauben erste Einschätzungen bezüglich der künftigen Änderung des Klimas und der damit verbundenen Auswirkungen. Einzelne Korrelationen zwischen klimatischen und biologischen Phänomenen im Bodensee wurden bereits beschrieben [16]. Zur Erweiterung der Kenntnisse wäre eine speziell auf das Bodenseeeinzugsgebiet bezogene Klimamodellierung wünschenswert. Einbezogen werden müssten Untersuchungen zu Folgen erhöhter UV-Strahlung für die Gewässerorganismen.

**Stoffeinträge durch vermehrte Erosionen**

**Schädigung der Biozöosen durch verstärkte UV-Einstrahlung**

**Forschungsbedarf**

*Weiterer Forschungsbedarf*

- Die vorhandenen Klimamodelle sollen so verfeinert werden, dass sie eine auf das Bodenseeeinzugsgebiet bezogene Klimamodellierung erlauben.
- Der Datenbestand der bereits bestehenden Messnetze soll auf seine Kompatibilität kontrolliert und verfügbar gemacht werden.
- Für die klimarelevanten Größen sollte, unter Einbeziehung bestehender Messstellen, ein auf ein Langzeitmonitoring ausgerichtetes koordiniertes Messnetz geschaffen werden.
- Szenarien zur Auswirkung von Klimaveränderungen auf die hydrologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet und auf die Lebensräume des Sees sollen erarbeitet werden.

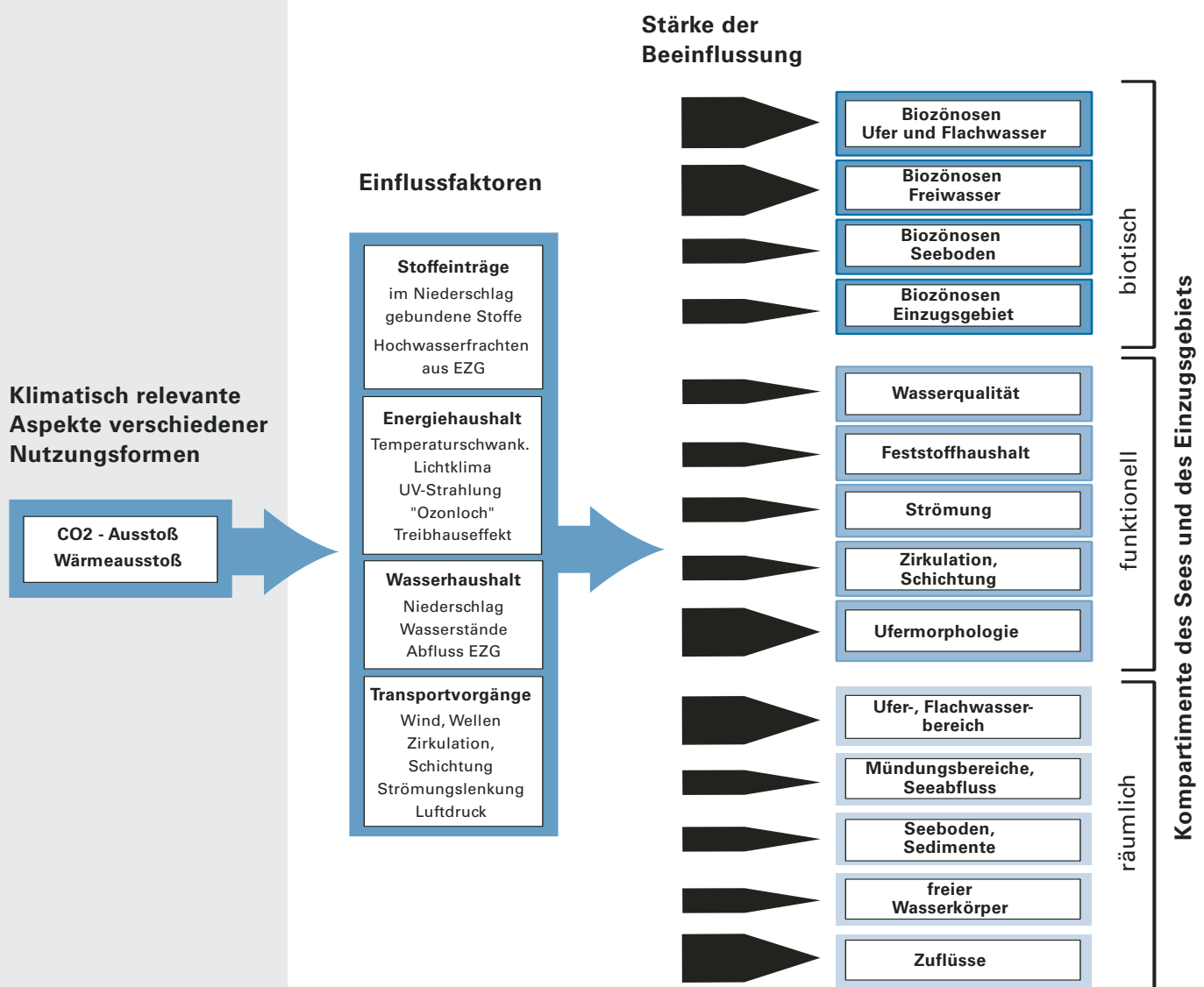


Abb. 3.11-4: Klima und Witterung - Einflüsse auf den See

## Literatur

- [1] RAUH, P. (1989): Das Klima des Bodenseegebiets. - Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 1/89: 12-14
- [2] BODENSEE NATURMUSEUM KONSTANZ (Hrsg., 2000): Vom See, seiner Entstehung und seiner Umwelt. - Führer durch das Bodensee-Naturmuseum Konstanz. 82 S.
- [3] FRAUENFELDER, C. (1999): Das Bodenseeklima. - Schriften des Vereins für Geschichte des Bodensees und seiner Umgebung 117: 245-256
- [4] MÜHR, B. (2003): Klimadiagramme. - <http://www.klimadiagramme.de/Deutschland/konstanz.html>
- [5] GLASER, R., BEYER, U. & BECK, C. (1999): Klimageschichte in Süddeutschland seit dem Jahr 1000. Abschlussbericht zum Projekt „Z 3“ des Bayerischen Klimaforschungsprogramms. - Bayerischer Klimaforschungsverbund (BayFORKLIM), 22 S.
- [6] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC): Climate change 2001. - <http://www.ipcc.ch>
- [7] AUER, I. & WERNER, R. (Red.) (2001): : Klima von Vorarlberg. Eine anwendungsorientierte Klimatographie. - 3 Bde. Bregenz (Amt der Vorarlberger Landesregierung).
- [8] ARBEITSKREIS KLIWA (2002): Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 29.-30. 11.2000 in Karlsruhe. - KLIWA-Berichte. H. 1, 278 S.
- [9] BAYERISCHES KLIMAFORSCHUNGSVERBUND (BayFORKLIM) (1999): Klimaänderungen in Bayern und ihre Auswirkungen. Abschlußbericht. - Bayer. Klimaforschungsverbund, München 1999, 90 S.
- [10] OCCC (Organe consultatif en matière de recherche sur le climat et les changements climatiques) (1998): Klimaänderung Schweiz. Auswirkungen von extremen Niederschlagsereignissen. - Wissensstandsbericht. 32 S.
- [11] HOLLAN, E. (2000): Mögliche Auswirkungen einer Klimaveränderung auf grössere Binnenseen. - Vortrag am KLIWA (Klima und Wasserwirtschaft)-Symposium vom 29./30.11.2000 in Karlsruhe
- [12] ARBEITSKREIS KLIWA (2002): Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 29.-30. 11.2000 in Karlsruhe. - KLIWA-Berichte. H. 1, 278 S.
- [13] LUFT, G. (1993): Langfristige Veränderung der Bodensee-Wasserstände und mögliche Auswirkungen auf Erosion und Ufervegetation. - Seeuferzerstörung und Seeuferrenaturierung in Mitteleuropa (Hrsg.: Ostendorp, W. & Krumscheid-Plankert, P.), Limnologie aktuell Band 5: 61-75
- [14] ROßKNECHT, H. (1998): Langjährige Entwicklung chemischer Parameter im Bodensee-Obersee. - Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee Bericht Nr. 48, 143 S., Eigenverlag
- [15] BÜHRER, H. (2002): Tolerierbare Phosphor-Fracht des Bodensee-Obersees. 2. Aufl. - Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee Bericht Nr. 54, 81 S., Eigenverlag
- [16] STRAILE, D. (2000): Meteorological forcing of plankton dynamics in a large and deep continental European lake. - Oecologia 122 (1): 44-50
- [17] WEYHENMEYER, G. A., ADRIAN, R., GAEDKE, U., LIVINGSTONE, D. M. & MABERLY, S. C. (2002): Meteorological forcing of plankton dynamics in a large and deep continental European lake. - Oecologia 122 (1): 44-50