Zuerst ersch. in: Natur und Mensch (2003), 6, S. 6-11

Jahrhunderthochwasser 1999 – Jahrhundertniedrigwasser 2003:

Seespiegeltrends und Extremwasserstände am Bodensee

Extremereignisse in der Wasserführung der Flüsse und Seen und im Witterungsverlauf waren in der Geschichte des Menschen häufig ein Anlass zum Innehalten und zum Nachdenken, ganz besonders, wenn sie für ihn existenzbedrohende Ausmasse annahmen. Solche Ausmasse haben das Hochwasser von 1999 und das extreme Niedrigwasser von 2003 am Bodensee glücklicherweise nicht angenommen.



Foto: H. Böhme/Archiv Geo Regio Bodensee

Der Bodensee ist ein besonders geeignetes Untersuchungsobjekt für Wasserstandsschwankungen, denn er ist einer der wenigen nicht regulierten grossen Alpenseen.

Wolfgang Ostendorp
Arbeitsgruppe Bodenseeufer
Magdeburger Str. 10
D-78657 Konstanz
wolfgang.ostendorp@bodensee-ufer.de

Klaus Jöhnk
Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics/ Aquatic Microbiology, University of Amsterdam
NL-1018 WS Amsterdam
kjoehnk@science.uva.nl

Dennoch weisen sie in der Wahrnehmung mancher Zeitgenossen auf die Auswirkungen des – vom Menschen zweifellos mitverursachten – Klimawandels hin. Oder sind die beiden Ereignisse doch bloss «zufällig»? Werden sie nicht eher durch einen Wandel in der Landnutzung, durch Speicherbewirtschaftung im Alpenraum, Wasserüberleitungen und Eindeichungen der Flussauen begünstigt? Und: Wird es zukünftig so weitergehen? Eine Vielzahl von Fragen, deren Beantwortung auch deswegen wichtig ist, weil sie sich nicht nur am Bodensee sondern im gesamten dicht besiedelten mitteleuropäischen Raum stellen. Allerdings ist der Bodensee ein besonders geeignetes Untersuchungsobjekt, denn er ist einer der wenigen nicht regulierten grossen Alpenseen mit wenig veränderten Ausflussschwellen und einem annähernd natürlichen Wasserstandsregime, das bei grobem Hinsehen nur durch die Speicherbewirtschaftung im Alpenrhein-Einzugsgebiet und durch Wasserentnahmen aus dem See selbst modifiziert wird. Im Vergleich zu den meisten anderen Seen des Alpenraums sind die menschlichen Eingriffe in das hydrologische Regime gering.

Die Frage, wie die beiden kurz aufeinanderfolgenden Extremereignisse von 1999 und 2003 in der nun 187-jährigen dokumentierten Pegelgeschichte des Bodensees zu bewerten sind, zerfällt bei genauem Hinsehen in zwei Teile: Lassen sich erstens tatsächlich Trends im Mittelwasserspiegel und in der Eintrittshäufigkeit («Jährlichkeit») von Extremereignissen nachweisen und wenn dies der Fall ist, welches sind zweitens die Ursachen und Hintergründe? Wir werden uns in diesem Beitrag vor allem mit der ersten Frage beschäftigen, und die zweite Frage – gemäss dem derzeit bescheidenen Kenntnisstand – nur kurz streifen.

Der Bodensee – der grösste nördliche Voralpensee

Der jährliche Wasserstandsverlauf des Bodensees wird massgeblich durch den Witterungsverlauf im alpinen Einzugsgebiet bestimmt: Im Winter erreicht der See normalerweise seinen niedrigsten Wasserstand, wenn die Niederschläge als Schnee oder Eis festgelegt sind. Der jährliche Höchstwasserstand wird gegen Ende Juni bzw. Anfang Juli erreicht, wenn die festgelegten Schnee- und Eismengen abschmelzen (Abb. 1).

Die regelmässigen Pegelbeobachtungen begannen im Jahr 1816, in der letzten Phase der «Kleinen Eiszeit», zu einer Zeit als das Klima im nordwestlichen Alpenraum durch ungewöhnlich kühle Sommer mit grossen Schneehöhen in den Alpen gekennzeichnet war. Gleich das darauffolgende Jahr 1817 brachte dem Bodensee das offenbar höchste Hochwasser seit 1511. Über die extremen Niedrigwasserstände früherer Jahrhunderte sind wir weniger gut informiert. Klimarekonstruktionen weisen aber eine Anzahl von extrem warmen und regenarmen Jahren aus (z.B. 1540 und 1616), die teilweise auch durch zeitgenössisch in Steine eingemeisselte Niedrigwassermarken (z.B. 1541, Rhein bei Laufenburg) belegt sind.

Ohne Statistik geht es nicht…

…wenn man lange Pegelreihen untersuchen will. Glücklicherweise hat der nach wie vor unregulierte Bodensee eine der längsten geprüften, ununterbrochenen Pegelreihen überhaupt, so dass er sich in hervorragender Weise zur Untersuchung der oben angesprochenen Fragen eignet. Die letzten Jahre haben dem Bodensee zwei ausserordentliche Ereignisse gebracht. 1999 kam es im Frühjahr zu einem extremen Hochwasser, das beträchtlichen wirtschaftlichen Schaden anrichtete. Dieses Extremhochwasser war nicht nur eins der höchsten sondern trat auch ungewöhnlich früh ein. Und in diesem Jahr haben wir einen Wasserstand, so niedrig wie er noch nie in der Geschichte der Pe-

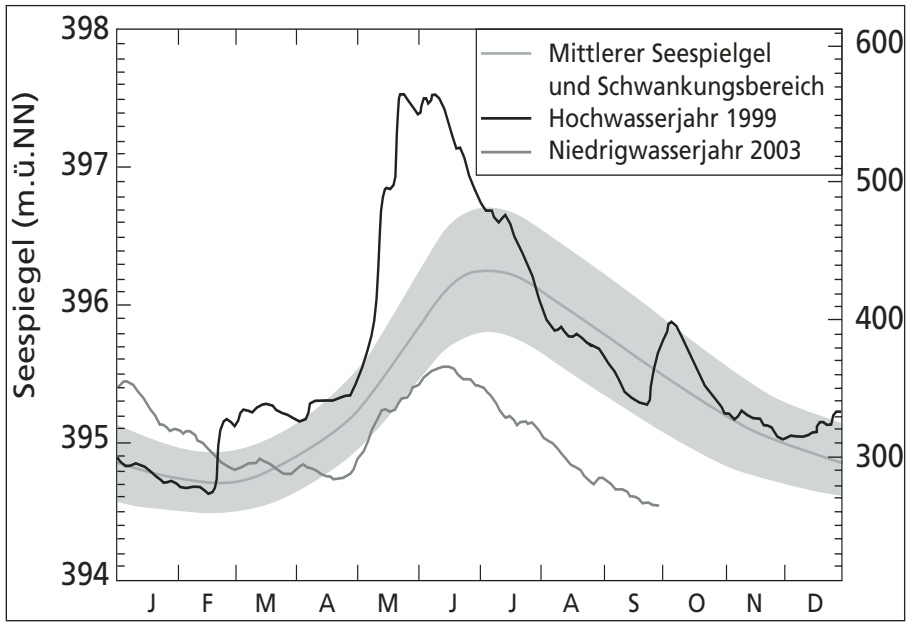


Abbildung 1:
Der Jahresgang des Bodenseepegels in Konstanz bezogen auf das tatsächliche Höhenniveau. und auf den Pegel; dargestellt sind die Linie der mittleren Tageswerte (schwarz), der Schwankungsbereich in Form der Standardabweichung vom Mittelwert (grauer Bereich) sowie die Tageswerte der Jahre 1999 und 2003.

Konstanzer Online-Publikations-System (KOPS)
URL: http://www.ub.uni-konstanz.de/kops/volltexte/2008/5493/
URN: http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:352-opus-54930

gelaufzeichnungen aufgetreten ist. Die Auftrittswahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses lässt sich mathematisch fassen, wenn man die gesamte Entwicklung des Pegelstandes der letzten beiden Jahrhunderte verfolgt. Langfristig wirksame klimatische Trends oder die Intensivierung der menschlichen Einflussnahme im Einzugsgebiet wirken sich im Trendverhalten des Seespiegels aus. Im Mittel zeigt der Seespiegeltrend eine Abnahme des Wasserstandes seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1816, unterbrochen durch einen leichten Anstieg zwischen 1895 und 1925. In den letzten Jahrzehnten ist wieder eine Verringerung des Wasserspiegels zu verzeichnen, wobei sich dieser Trend in den letzten Jahren abzuschwächen scheint (Abb 2).

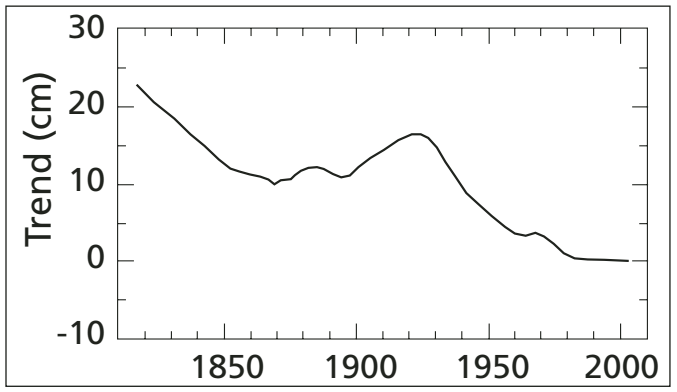


Abbildung 2:
Trendverlauf des Bodenseepegels bezogen auf den Wasserstand des 1. Januar 1999 von 300 cm am Pegel Konstanz.

Unter Berücksichtigung dieses Trends lassen sich die Extremereignisse gruppieren und es lassen sich ihre Jährlichkeiten angeben. In Tabelle 1 sind die 10 höchsten und die 10 niedrigsten jährlichen Pegelstände gezeigt, gruppiert nach ihrer Rangfolge für den tatsächlichen Wasserstandsverlauf (nicht trendbereinigt); daneben ist auch die korrigierte Rangfolge angegeben, wenn man den Trend berücksichtigt.

Demnach war das Hochwasser von 1999 (zusammen mit dem von 1890) das zweitgrösste nach 1817. Das Niedrigwasser von 2003 taucht in dieser Tabelle noch nicht auf, da das winterliche Minimum noch nicht erreicht wurde. Da der Seespiegel im Winter noch weiter absinkt, ist zu erwarten, dass es im Frühjahr 2004 zu einem Rekordtiefstand im Niedrigwasser kommen wird. Verfolgt man den mittleren Verlauf in Abbildung 1, so kann man spekulieren, dass der Wasserstand möglicherweise auf Werte um 210 cm fallen wird – sofern es im Winterhalbjahr nicht verstärkt regnet. Ein solch niedriger Wasserstand würde eine Jährlichkeit von rd. 1000 Jahren haben.

Hochwasser			Niedrigwasser		
Jahr	max. Pegel Original, [cm]	Rang Original/ trendbereinigt	Jahr	min. Pegel Original, [cm]	Rang Original/ trendbereinigt
1817	623	1/1	1858	226	1/2
1890	576	2/3	1836	227	2/1
1821	568	3/5	1972	237	3/18
1999	564	4/2	1848	238	4/4
1876	561	5/4	1949	238	5/13
1910	557	6/6	1909	238	6/3
1926	555	7/7	1963	238	7/19
1851	549	8/8	1854	239	8/5
1855	548	9/11	1895	241	9/8
1849	547	10/12	1891	242	10/9

Tabelle 1:
Die 10 grössten Hoch- und Niedrigwasser-Extremereignisse am Bodensee (Pegel Konstanz) und ihre Rangfolge (angegeben auf der Basis der Original-Pegelreihe und der trendbereinigten Pegelreihe)

Die Jährlichkeiten einiger Extremwasserstände sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Das Extremhochwasser von 1999 war nahezu ein Jahrhundertereignis, anders gesagt: ein Hochwasser dieser Grösse ist – statistisch gesehen – einmal in 87 Jahren zu erwarten. Dies bedeutet natürlich nicht, dass wir in den nächsten Jahren kein Extremhochwasser zu erwarten haben, nach dem Zufallsprinzip kann es sogar schon nächstes Jahr wieder so weit sein. Die letzten Zeilen in Tabelle 2 geben noch die zu erwartenden Pegelstände an für Ereignisse mit 5 bis 1000 jähriger Wiederkehrperiode.

In die soeben vorgestellte Analyse gehen nur die maximalen bzw. minimalen Wasserstandswerte der jeweiligen Jahre ein, sie sagt nichts darüber aus, zu welchem Zeitpunkt dieser Höchst- bzw. Niedrigststand zu erwarten ist, oder mit welcher Wahrscheinlichkeit wir etwa im September einen derart niedrigen Wasserstand erwarten können, wie es derzeit der Fall ist.

Mensch und Natur reagieren anders…

…auf die extremen Hoch- bzw. Niedrigwasserstände. Für den Menschen, seine Sachwerte und seine Geschäftigkeit ist es eher zweitrangig, wann genau das Schadhochwasser eintritt: stets werden an Strassen, Gebäuden und landwirtschaftlichen Anbauflächen vergleichbare Schäden hervorgerufen. Pflanzen und Tiere der Uferzone sind viel feiner an den jährlichen Wasserstandsgang des Bodensees angepasst. Denken wir beispielsweise an den Hecht, der zur Laichzeit im Frühjahr gern auf die überschwemmten Riedwiesen geht, an die Sumpf-Siegwurz und die Orchideen der Riedwiesen und die Strandrasen-Arten, deren Blüte und Fruchtansatz an die überschwemmungsfreie Periode gebunden ist. Das gilt aber auch für eine so robuste Pflanze wie das Schilf (Phragmites australis), das als Landpflanze während der Aufwuchsphase stets einige Blätter an der Luft entfalten können muss. Für diese und viele anderen Arten mehr ist es erheblich, wann ein bestimmter Wasserstand eintritt und wie lange er einen bestimmten Schwellenwert über- oder unterschreitet. Die Zeitreihenanalyse, wie sie oben dargestellt wurde, muss also verfeinert werden, indem wöchentliche oder gar tägliche Wasserstände betrachtet werden.

In Abbildung 2 wurde dargestellt, dass der Mittelwasserspiegel des Bodensees seit etwa 1925 einem stark negativen Trend unterliegt. Dieser Trend stellt sich jedoch je nach Jahreszeit anders dar (Abbildung 3): In den Monaten Dezember bis März sehen wir einen positiven Trend, d.h. die täglichen Pegelwerte nehmen leicht zu. Allerdings lässt sich der Trend nicht statistisch sichern. Im April erfolgt ein recht deutlicher Übergang zu einem negativen Trend, der sich in den Monaten Juni bis Oktober verstärkt und dann auch für eine kleine Zeitspanne statistisch gesichert ist. Für die Monate mit positivem Trend überschreitet der mittlere jährliche Seespiegelanstieg kaum +0,2 cm/Jahr (entsprechend rd. +15 cm für den Zeitraum zwischen 1931 und 2003), im Juli und August hingegen überschreitet er betragsmässig – 0,5 cm/Jahr, mithin ergibt sich eine mittlere Abnahme von mehr als – 35 cm in dem betrachteten Zeitraum. Wir dürfen also gegenwärtig eine Zunahme von vergleichsweise hohen Wasserständen im Frühjahr und ganz sicher auch eine Zunahme von niedrigen Sommerwasserspiegeln erwarten. Diese Trends dürften mittelfristig eine Anpassungsreaktion der Pflanzen und Tiere des Bodenseeufers zur Folge haben, – in welcher Weise dies geschieht, – graduell oder «schubweise» nach Extremereig-

Hochwasser			Niedrigwasser		
Jahr	Pegel Original [cm]	Jährlichkeit trendbereinigt	Jahr	Pegel Original [cm]	Jährlichkeit trendbereinigt
1817	623	1253	1836	227	1571
1999	564	87	1858	226	333
1890	576	87	1909	238	50
1876	561	48	1848	238	40
1821	568	36	1854	239	29
	493	5		240	5
	515	10		234	10
	554	50		224	50
	566	100		221	100
	598	1000		212	1000

Tabelle 2:
Jährlichkeiten einiger Jahresextremwasserstände für trendbereinigte Pegelwerte (Pegel Konstanz)

nissen, muss eingehenden Untersuchungen vorbehalten bleiben.

Die Schwankungsbreite der Tageswerte und die für jedes Datum auftretenden Extremwerte müssen wie schon oben erläutert trendbereinigt werden. Stellt man sich die Frage, mit welcher Wahrscheinlichkeit zu einem bestimmten Datum oder in einer bestimmten Kalenderwoche der zu diesem Zeitpunkt übliche Wert über- bzw. unterschritten wird, so erhält man wertvolle Informationen über den zeitlichen Verlauf der Jährlichkeiten. In Abbildung 4 ist dies am Beispiel der beiden Extremjahre 1999 und 2003 gezeigt. Das sehr frühe Auftreten des Hochwassers von 1999 hatte demnach eine Jährlichkeit von ca. 5000 Jahren. Natürlich ist dies ein reiner Rechenwert, denn die Pegeldaten reichen ja nur 187 Jahre zurück. Man muss also besser sagen, dass die Jährlichkeit dieses Ereignisses zu diesem Zeitpunkt mindestens 187 Jahre ist, bzw. ein solches Ereignis noch nie in dieser Art und Weise seit Beginn der Pegelaufzeichnungen vorgekommen ist. Nach Abfallen des Hochwassers Anfang Juni geht auch die Jährlichkeiten stark zurück, der Wasserstand folgt dem «üblichen» Verlauf.

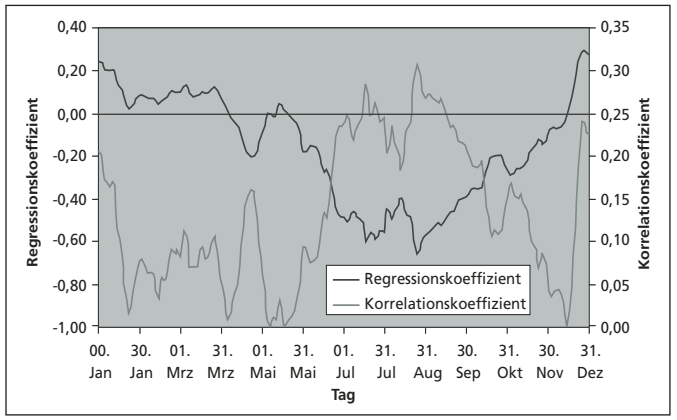


Abbildung: 3
Wasserstandstrends für den Zeitraum 1931 bis 2002: dargestellt sind die Regressionskoeffizienten (d.h. Steigung, Trend eines linearen Regressionsmodells) und die Absolutwerte der Korrelationskoeffizienten differenziert nach Tagen; positive bzw. negative Regressionskoeffizienten zeigen für den o.g. Zeitraum einen zunehmenden bzw. abnehmenden Seespiegel an; bei einem Korrelationskoeffizienten grösser als 0,296 ist von einem signifikanten Trend (Irrtumswahrscheinlichkeit von 10%) auszugehen.

Der aussergewöhnliche Niedrigwasserstand in 2003 begann sich bereits im Juni abzuzeichnen (s. Abb. 1) und hatte Ende August einen «unwahrscheinlich» niedrigen Stand, welcher statistisch gesehen etwa alle 700 Jahre auftreten würde. Da wir nur die Pegeldaten bis Ende September auswerten konnten, lässt sich über die weitere Entwicklung der Jährlichkeiten dieses Jahres noch keine Aussage treffen.

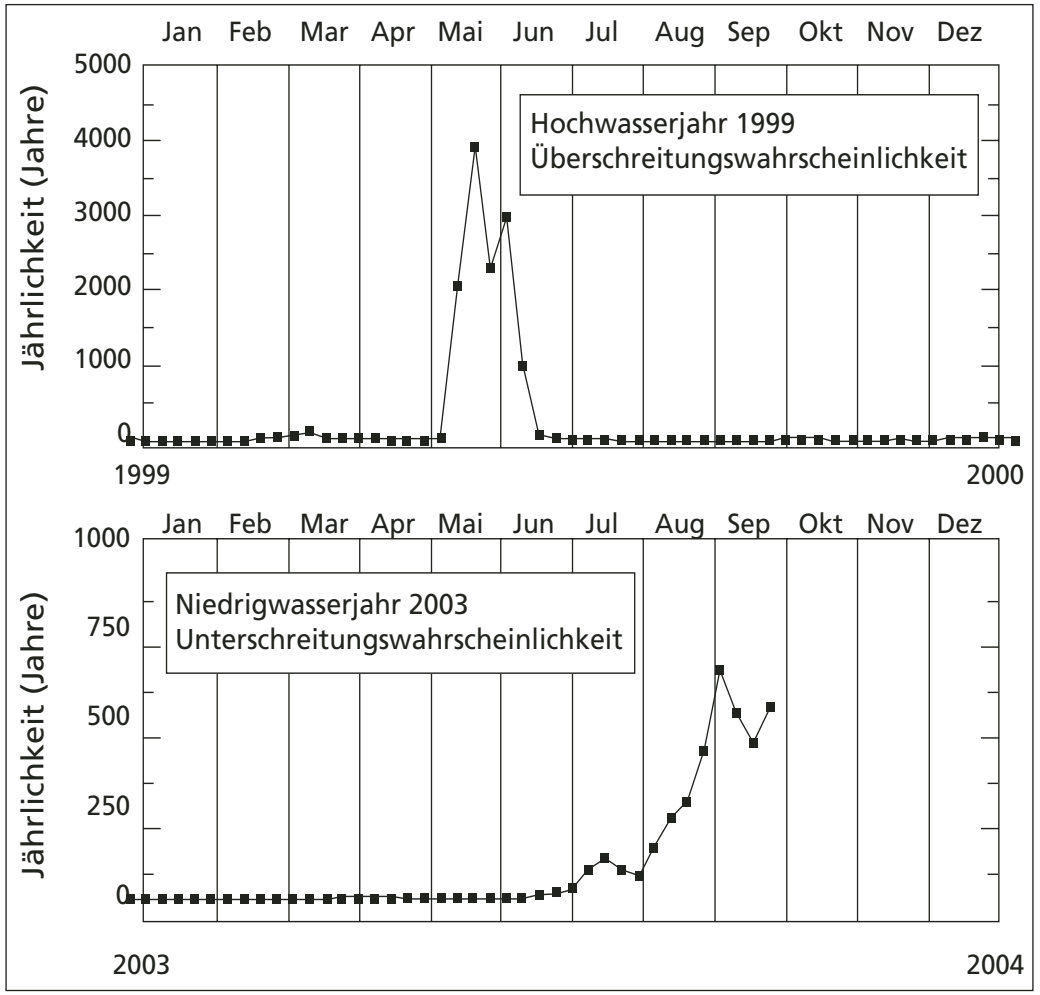


Abbildung 4 + 5:
Jährlichkeiten im zeitlichen Verlauf für das extreme Hochwasserjahr 1999 und das Niedrigwasser 2003 (Daten bis Ende September).

Einfluss von Klimaschwankungen auf den Bodensee-Wasserspiegel

Das frühe Auftreten des Hochwassers von 1999 lässt sich aus der Niederschlagsentwicklung im Einzugsgebiet des Bodensees erklären. So kam es Mitte Mai und Anfang Juni zu Starkniederschlägen im voralpinen und zentralalpinen Raum. Gleichzeitig waren die Maitemperaturen um mehrere Grad höher als normal, was zu einer zusätzlichen Wasserzufuhr durch beginnende Schneeschmelze in den Alpen führte. Diese extremen lokalen Witterungsbedingungen können rein zufällig eingetreten sein, jedoch zeichnet sich ein gewisser globaler Trend für den Alpenraum ab, welcher von einer Erhöhung der Niederschlagsmenge im Frühjahr und eine Verschiebung der Schneeschmelze zu immer früheren Zeitpunkten ausgeht. Das würde in Zukunft zu einer Häufung von frühen Hochwässern führen. Und durch die Verschiebung der Hochwasserspitze erhält man gleichzeitig einen früher eintretenden Abfall des Wasserstandes, ähnlich wie 2003. Insgesamt aber muss man eingestehen, dass der Zusammenhang zwischen Pegelvariationen und überregionalen Klimavariationen bisher zu wenig untersucht sind.

Danksagung

Wir bedanken uns bei der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg für die Überlassung der Pegeldaten von Konstanz.

Literatur

JÖHNK, K., D. STRAILE und W. OSTENDORP : Water level variability and trends in Lake Constance in the light of the 1999 centennial flood. – Limnologica (im Druck)

KLEIN, E. (2001): Flora . in: NABU (Hg.), Jahresbericht 2000 über das Natur- und Landschaftsschutzgebiet «Wollmatinger Ried – Untersee – Gnadensee», S. 36 – 43.

KOBELT, K. (1926): Die Regulierung des Bodensees. Hochwasserschutz, Kraftnutzung und Schiffahrt. – Mitt. Amt für Wasserwirtschaft Bd. 20 .

LUFT, G., G. VAN DEN EERTWEGH und H. VIESER (1990): Veränderung der Bodensee-Wasserstände von 1887 bis 1987. – Handbuch Hydrologie Baden-Württemberg 6.2.

OSTENDORP, W., N. WALZ und R. BRÜGGEMANN (2003): Grenzüberschreitender Seeuferschutz im Spannungsfeld von Nutzungsinteressen am Beispiel Bodensee, Teil 1 und Teil 2 . - UWSF – Z. Umweltchem Ökotox 15: 125 – 134, 187 – 198.

PFISTER, Chr. (1985): Klimageschichte der Schweiz 1525 – 1860. – Academica Helvetica Bd. 6, Heft 1, 184 S. + Tabb. i.Anh. Heft 2, 163 S. + Tabb. i.Anh.

RAPP, J. und Chr.-D. SCHÖNWIESE (1996): Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891 – 1990. – Frankfurter geowiss. Arb. B 5: 255 S.

SCHMIDLI, J., Chr. SCHMUTZ, Chr. FREI, H. WANNER und Chr. SCHÄR (2002): Mesoscale precipitation variability in the region of the european alps during the 20th century. – Int. J. Clim. 22: 1049-1074.

STUBER, M. (2002): Gottesstrafe oder Forschungsobjekt? – Zur Resonanz von Erdbeben, Überschwemmungen, Seuchen und Hungerkrisen im Korrespondentennetz Albrecht von Hallers. – In: CHR. PFISTER (Hg.), Am Tag danach – Zur Bewältigung von Naturkatastrophen in der Schweiz 1500 – 2000. – Bern, Haupt-Verl., S. 39-54.

ZELLER, R. (2002) : Wahrnehmung und Deutung von Naturkatastrophen in den Medien des 16. und 17. Jahrhunderts. – In: CHR. PFISTER (Hg.), Am Tag danach – Zur Bewältigung von Naturkatastrophen in der Schweiz 1500 – 2000. – Bern, Haupt-Verl., S. 27-38.