

Arbeitsgruppe Wasserstandsvorhersage Bodensee



Ermittlung des Extremwasserstandes (ca. HW₁₀₀₀) für den Bodensee (Ober- und Untersee)

und Hinweise zur Berechnung der Extremwasserstände für den Seerhein sowie für den Übergangsbereich vom Untersee zum Hochrhein

Stand: 07.06.2011

Ermittlung des Extremwasserstandes (ca. HW₁₀₀₀) für den Bodensee (Ober- und Untersee)

und Hinweise zur Berechnung der Extremwasserstände für den Seerhein sowie für den Übergangsbereich vom Untersee zum Hochrhein

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung Obersee	3
Zusammenfassung Untersee	4
1. Veranlassung	5
2. HW-Extremwert für den Bodensee-Obersee	5
2.1 Hochwasserstatistik	5
2.2 Historische Hochwasser und deren Übertragbarkeit	7
2.3 Deterministische Berechnung eines Extremhochwassers.....	9
2.4 Schlussfolgerungen und Empfehlung für den Obersee.....	10
3. Hinweise zur Berechnung des HW-Extremwerts für den Seerhein	11
4. HW-Extremwert für den Bodensee-Untersee	12
4.1 Hochwasserstatistik	12
4.2 Historische Hochwasser und deren Übertragbarkeit	13
4.3 Deterministische Berechnung eines Extremhochwassers.....	13
4.4 Schlussfolgerungen und Empfehlung für den Untersee	14
5. Wellenschlag	15
6. Quellenangaben	15
Anhang	17
A1: Umrechnung der Pegelstände auf unterschiedliche Bezugshorizonte.....	17
A2: Grafik der Hochwasserkennwerte für den Ober- und Untersee	18

Bearbeitung:

A. Sieber; Dr. M. Bremicker, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

C. Mathis, Amt der Vorarlberger Landesregierung

A. Helbling, Bundesamt für Umwelt, Bern

in Abstimmung mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (F.-K. Holle)

Zusammenfassung Bodensee-Obersee

Wasserstands-Kennwerte für den Bodensee-Obersee

Die nachfolgende Tabelle enthält die **Hochwasserstatistik** für den Bodensee-Obersee. Basis der Auswertung sind homogenisierte Seewasserstände von 1817 bis 2006 (190 Jahre) sowie deterministische Extremwertberechnungen.

blau: in 2007 von der AG länderübergreifend festgelegte Extremwerte HW_{2} bis HW_{100}

rot: in 2010 von der AG länderübergreifend festgelegte Extremwerte HW_{300} und HW_{Extrem}

Informationen zu anderen als den hier aufgeführten Jährlichkeiten können der Grafik im Anhang A2 (S. 17) entnommen werden, Informationen zu den nationalen Höhensystemen s. Anlage A1

Jährlichkeit	Wasserstand am Seepegel			
	Konstanz	Konstanz/ Bregenz	Bregenz	Romanshorn
[Jahre]	[m.ü. NN]	[cm über Pegelnul]	[m.ü. Adria]	[m.ü. M]
2 ¹⁾	396,49	460	396,74	396,81
10 ¹⁾	397,01	512	397,26	397,33
20 ¹⁾	397,20	531	397,45	397,52
30 ¹⁾	397,30	541	397,55	397,62
50 ¹⁾	397,42	553	397,67	397,74
100 ¹⁾	397,57	568	397,82	397,89
300 ¹⁾	397,77	588	398,02	398,09
Extrem (~1000)	398,00²⁾	610²⁾	398,25²⁾	398,30²⁾

¹⁾ verwendete Verteilung: 3-parametrische log. Normalverteilung
²⁾ Werte sind im jeweiligen Höhensystem gerundet, d.h. Umrechnung zwischen den Bezugssystemen ergibt nicht exakt dieselben Differenzen

Historische Hochwasserstände am Bodensee-Obersee, bezogen auf die heute gültigen Höhensysteme der Anrainerlande:

Datum historischer See-Hochwasser im Zeitraum 1817 - 2009	Wasserstand am Seepegel			
	Konstanz	Konstanz/ Bregenz	Bregenz	Romanshorn
	[m.ü. NN]	[cm über Pegelnul]	[m.ü. Adria]	[m.ü. M]
07.07.1817	398,25	636	398,50	398,57
18.08.1821	397,80	591	398,05	398,12
24.05. und 11.06.1999	397,54	565	397,79	397,86

Zusammenfassung Bodensee-Untersee

Wasserstands-Kennwerte für den Bodensee-Untersee

Die nachfolgende Tabelle enthält die **Hochwasserstatistik** für den Bodensee-Untersee. Basis der Auswertung sind Aufzeichnungen der Seewasserstände von 1886 bis 2006 (120 Jahre) sowie deterministische Extremwertberechnungen.

blau: in 2007 von der AG länderübergreifend festgelegte Extremwerte HW_2 bis HW_{100}

rot: in 2010 von der AG länderübergreifend festgelegte Extremwerte HW_{300} und HW_{Extrem}

Informationen zu anderen als den hier aufgeführten Jährlichkeiten können der Grafik im Anhang A2 (S. 17) entnommen werden, Informationen zu den nationalen Höhensystemen s. Anlage A1

Jährlichkeit	Wasserstand am Seepegel		
	Radolfzell	Radolfzell	Berlingen
[Jahre]	[m.ü. NN]	[cm über Pegelnull]	[m.ü. M]
2 ¹⁾	396,27	438	396,59
10 ¹⁾	396,81	492	397,13
20 ¹⁾	396,98	509	397,30
30 ¹⁾	397,07	518	397,39
50 ¹⁾	397,17	528	397,49
100 ¹⁾	397,30	541	397,62
300 ¹⁾	397,51	562	397,83
Extrem (~1000)	397,75²⁾	585²⁾	398,05²⁾

¹⁾ verwendete Verteilung: Log Pearson-III
²⁾ Werte sind im jeweiligen Höhensystem gerundet, d.h. Umrechnung zwischen den Bezugssystemen ergibt nicht exakt dieselben Differenzen

Historische Hochwasserstände am Bodensee-Untersee, bezogen auf die heute gültigen Höhensysteme der Anrainerländer:

Datum historischer See-Hochwasser im Zeitraum 1886 - 2006	Wasserstand am Seepegel		
	Radolfzell	Radolfzell	Berlingen
	[m.ü. NN]	[cm über Pegelnull]	[m.ü. M]
4.09.1890	397,44	555	397,76
06./07.1910	397,23	534	397,55
24.05.1999	397,32	543	397,67

1. Veranlassung

Im Rahmen der EG-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (EG-HWRM-RL) sowie im Rahmen der IKSR (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins) sind auch für den Bodensee Hochwassergefahrenkarten (HWGK) bzw. Hochwasserrisikomanagementpläne in Abstimmung mit den angrenzenden Ländern zu erarbeiten.

Für den Bodensee soll die grundsätzliche Abstimmung in der *Koordinierungsgruppe Alpenrhein-Bodensee* stattfinden. Die Abstimmung der hydrologischen Kennwerte, die den drei Szenarien für die HWGK zu Grunde gelegt werden müssen, soll in der *Arbeitsgruppe „Wasserstandsvorhersage Bodensee“* erfolgen, in der Baden-Württemberg, die Schweiz und das österreichische Bundesland Vorarlberg vertreten sind. In dieser AG wurden bereits im Jahr 2007 die Hochwasser-Kennwerte für die Jährlichkeiten 2, 10, 20, 50 und 100 Jahre festgelegt (siehe www.bodensee-hochwasser.info/pdf/W-Kennwerte-Obersee.pdf und www.bodensee-hochwasser.info/pdf/W-Kennwerte-Untersee.pdf)

Ergänzend hierzu werden hiermit von der AG Wasserstandsvorhersage Bodensee die Hochwasser-Kennwerte für die Jährlichkeit 300 Jahre sowie die Extremhochwasserstände (ca. HW_{1000}) für den Ober- und Untersee länderübergreifend abgestimmt und festgelegt. Der festgelegte Extremhochwasserstand für den Obersee ist auch mit dem Land Bayern (LfU BY) abstimmt.

2. HW-Extremwert für den Bodensee-Obersee

2.1 Hochwasserstatistik

In den Tabellen 1 und 2 (s. Seite 6) sind für den Oberseepegel Konstanz die im Rahmen verschiedener Untersuchungen ermittelten Hochwasserkennwerte aufgelistet. Tabelle 1 enthält statistische Untersuchungen, die von den Behörden der zuständigen Länder veröffentlicht wurden bzw. aus diesen Untersuchungen abgeleitete Werte. Tabelle 2 enthält eine ergänzende Untersuchung des IWG, die im Auftrag der LUBW (2010) durchgeführt wurden.

Die in Tabelle 1, Spalte 2 enthaltenen Werte der Wasserstands-Statistik werden als repräsentativer für den Seewasserstand eingestuft als die Werte der Abfluss-Statistik (Spalte 3), da letztere indirekt anhand einer Übertragung von Zeitreihen ermittelt wurden.

Für den HW_{1000} des Obersees zeigen die Auswertungen, je nach ausgewerteter Zeitspanne, Wahl der Homogenisierung und verwendeter Verteilungsfunktion, eine Spannweite zwischen 581 cm und 643 cm.

Tabelle 1: Hochwasserkennwerte für den Obersee-Pegel Konstanz

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Wasserstand Konstanz/Bo.	Abfluss Konstanz/Rh.	Wasserstand Konstanz/Bo.	Wasserstand Konstanz/Rh.	Wasserstand Konstanz/Bo.
Datenquelle:	www.bodensee-hochwasser.info auf Basis Hydrograph. Dienst Österreich (HW ₅₀ / HW ₁₀₀), bzw. Hydrograph. Dienst Österreich (restliche Werte) (jeweils Zeitreihe 1817-1999)	LUBW, BAFU (2010) (Zeitreihe 1817-2008 ³⁾)	zu (3) zugehöriger W aus vereinfachter Abflusskurve LUBW, BAFU (2010) ⁴⁾	zu (3) zugehöriger W aus offizieller Abflusskurve für Konstanz/Rh.	zu (5) zugehöriger W bei Berücksichtigung system. Differenz Obersee/ Seerhein ⁶⁾
Jährlichkeit	W [cm]	Q [m ³ /s]	W [cm]	W [cm]	W [cm]
50	553¹⁾	981		526	534
100	568¹⁾	1028		538	546
200	583¹⁾	-		-	
300	-	1097	565	557	565
500	603¹⁾ / 626²⁾	1127	572	563⁵⁾	571
1000	614¹⁾ / 643²⁾	1167	581	572⁵⁾	580

Beim Vergleich der verschiedenen Werte ist die **systematische Differenz der Wasserstände zwischen dem Pegel Konstanz/Bodensee und dem Pegel Konstanz/Seerhein zu berücksichtigen**, die durch den „Absenktrichter“ des Bodensees zum Seeausfluss hin bedingt ist. Der mittlere Wasserspiegel am Pegel Konstanz/Seerhein liegt gemäß Analyse der LUBW ca. 7,5 cm tiefer als am Pegel Konstanz/Bodensee.

¹⁾ 3-par Log Normalverteilung

²⁾ 2-par. Log Normalverteilung

³⁾ da Zeitreihe Konstanz/Rh. (1983-2008) zu kurz war, wurde Konstanz/Bo. verwendet und auf Konstanz/Rh. übertragen

⁴⁾ Abflusskurve anhand gemeinsamer Beobachtungsperiode (1984-2007) erstellt

⁵⁾ extrapoliert (HVZ-Abflusskurve)

⁶⁾ langjähriger Mittelwert W(Obersee) - W(Seerhein): ca. 7,5 cm

Tabelle 2: HW₁₀₀₀ für den Obersee-Pegel Konstanz gemäß Berechnung LUBW / IWG (2010)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	Wasserstand Konstanz/Bodensee			
Datenquelle:	IWG Uni Karlsruhe (Zeitreihe 1817 - Sep. 2007)	LUBW / IWG (Zeitreihe 1817 - Sep. 2007 trendbereinigt)	LUBW / IWG (Zeitreihe Okt. 1886 - Sep. 2007)	LUBW / IWG (Zeitreihe Okt. 1886 - Sep. 200 trendbereinigt)
Jährlichkeit	W [cm]	W [cm]	W [cm]	W [cm]
1000	621	598	611	598

2.2 Historische Hochwasser und deren Übertragbarkeit

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die historischen Extremwasserstände am Pegel Konstanz/Bodensee.

Tabelle 3: Historische Wasserstände für den Pegel Konstanz/Bodensee

Historische Wasserstände [cm über PNP Konstanz]	Bemerkung	homogenisierter Wert (sofern vorhanden) [cm über PNP Konstanz]
636 (07.07.1817, HHW 1817-2006)	Werte fragwürdig und nicht repräsentativ für heutigen Zustand (Erläuterungen siehe Text)	614 (Lalk & Godina 2000)
591 (18.08.1821)		
576 (3.9.1890)		
565 (24.05.1999/ 11.06.1999)		
557 (28.06.1910)		
555 (26.06.1926)		



Abb. 1: Historische Hochwassermarken in Bregenz am Obersee. Die Aufnahme erfolgte während des Hochwassers 1999. Durch Setzungen des Steines ist der Wasserstand des Jahres 1999 im Vergleich zu den früheren Wasserständen etwa 5 cm zu hoch. Foto und Information zur Setzung: AVL R

Aus Abb. 1 ist ersichtlich, dass der höchste Wasserstand seit dem Jahre 1566 im Juli 1817 aufgetreten ist. Der zweithöchste eingravierte Wert stammt aus dem Jahr 1566, danach folgt der Hochwasserstand von 1890. Nachdem seit 1566 der höchste Wasserstand am Obersee im Jahre 1817 gemessen wurde, ist der Wasserstand 1817 somit ein Extremwasserstand mit einem empirischen Wiederkehrintervall von mehr als 400 Jahren. (Wenn es seit 1566 einen höheren Wasserstand als 1566 gegeben hätte, wäre er vermutlich festgehalten worden.)

Das Hochwasser des Jahres 1817 war von außergewöhnlichen Randbedingungen beeinflusst. Im Jahr 1815 ereignete sich in Indonesien ein Vulkanausbruch, infolge dessen das Jahr 1816 in den Alpen extrem kalt ausfiel („Jahr ohne Sommer“) und 1817 schmolz der in zwei Jahren aufgebaute Schnee ab.

Die Messwerte der Jahre 1817 und 1821 sind jedoch gemäß Luft (2009) kritisch zu beurteilen, da die aufgezeichneten Tageswerte am Pegel Konstanz/Bodensee von November 1817 bis März 1826 unplausibel sind. Unter anderem treten in diesem Zeitraum abrupte Sprünge um 40 cm und mehr pro Tag auf. Eine mögliche Ursache könnte eine falsche Umrechnung der an der alten Zoll-Pegellatte (mit Pegelnull am oberen Ende der Latte) abgelesenen Werte sein. Eventuell war auch ein Einfluss alten Konstanzer Rheinbrücke gegeben (Details siehe unten).

Alle verfügbaren zuverlässigen Informationsquellen stimmen darin überein, dass die 1817 und 1821 gemessenen Wasserstände nicht direkt auf die heutigen Randbedingungen übertragbar sind, da **die Hochwasserstände des Obersees in den vergangenen Jahrzehnten und Jahrhunderten deutlich abgesunken sind.**

In LfU (1990) ist ein Rückgang der jährlich höchsten Wasserstände für den Obersee (Referenzpegel Konstanz) und Untersee (Berlingen) um ca. 25 cm in 100 Jahren für den Beobachtungszeitraum 1887 bis 1987 quantifiziert. Auch in LUBW & BAFU (2010) ist ein hochsignifikanter fallender Trend angegeben, der für den Pegel Konstanz/Bodensee für die Jahre 1818 bis 2007 mit $-0,174$ cm/Jahr quantifiziert wird. Der von Lalk & Godina (2000) homogenisierte Messwert von 1817 für den Seepegel Konstanz liegt bei 614 statt der gemessenen 636 cm.

Der systematische Rückgang der Hochwasserstände seit Beginn der kontinuierlichen Messungen hat folgende Gründe:

1. Natürliche und/oder anthropogene Veränderung der hydraulischen Auslaufbedingungen vor allem in den späten 1930er und 1940er Jahren (natürliche Erosionsvorgänge im Bereich des „Konstanzer Trichters“ und in der Seerheinrinne, Tieferlegung der Schiffahrtsrinnen, Bau der Konstanzer Rheinbrücke und eventuell Erosion durch Strahlwirkung von Schiffsschrauben bei NW) (LfU 1990 und Lalk & Godina 2000).
2. Veränderungen des Zuflussregimes des Alpenrheins durch den Einfluss des Kraftwerk-Speicherbetriebs, dessen Ausbau schwerpunktmäßig in den Jahren 1952 bis 1976 erfolgte (LfU 1990).
3. Einfluss der Rheinbrücke und Rheinmühle bei Konstanz
Im Jahre 938 war eine erste hölzerne Brücke über den Seerhein gebaut und dann ab 1418 mit einer Mühle kombiniert worden. Die zahlreichen Brückenpfähle und weitere Anbauten zwischen den Brückenjochen bewirkten (z.B. auch während des Hochwassers 1817) einen Anstau des Sees, so dass für die Mühle das nutzbare Gefälle erheblich erhöht wurde. Im Jahr 1856 vernichtete ein Brand den Mühlenkomplex, der danach nicht wieder aufgebaut wurde (Konold 2000). Luft (2009) erwähnt allerdings, dass die Wasserstände am Pegel Konstanz/Bodensee in der Zeitspanne 1827 bis 1909 keine „spektakulären Trends und Inhomogenitäten“ aufweisen.

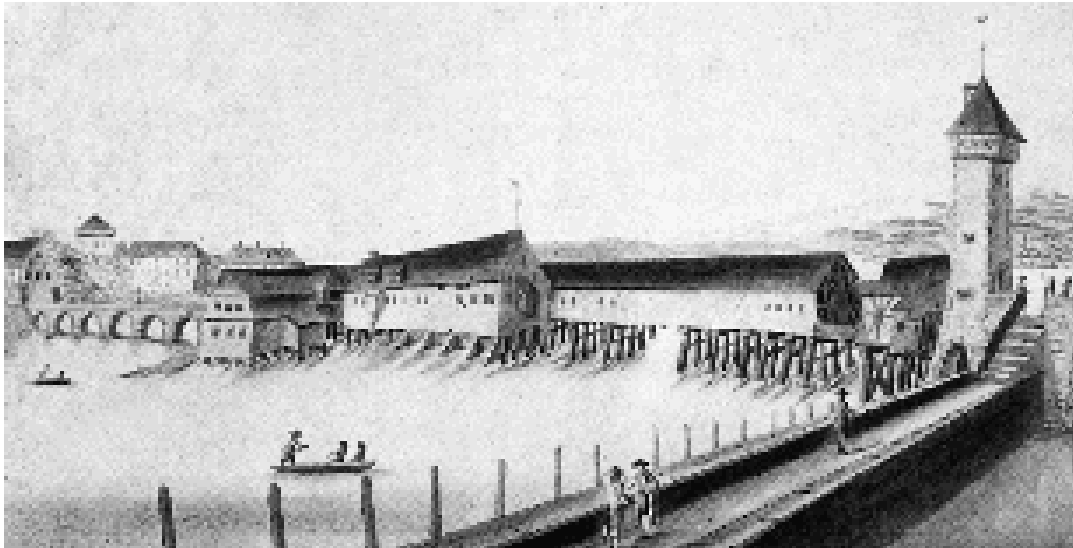


Abb. 2: Rheinbrücke und Rheinmühle in Konstanz um 1800 vom Unterwasser aus gesehen. Man erkennt an der Strömung sehr gut die stauende Wirkung des Bauwerks (aus: Konold 2000)



Abb. 3: Konstanzer Rheinbrücke beim Hochwasser 1999 als Vergleich zur historischen Zeichnung

Der mit 636 cm angegebene „Messwert“ für das HHW 1817 ist aus den genannten Gründen zumindest als fragwürdig einzustufen und darüber hinaus nicht repräsentativ für den heutigen Zustand. Von Lalk & Godina (2000) wird für das Hochwasser 1817 ein auf heutige Verhältnisse homogenisierter Wert von 614 cm angegeben. Dieser homogenisierte HHW-Wert stellt einen besseren Anhaltswert für extreme Bodenseehochwasser dar als der historische Messwert von 1817.

2.3 Deterministische Berechnung eines Extremhochwassers

Auf Anfrage der IRKA (Internationale Regierungskommission Alpenrhein) und der IRR (Internationale Rheinregulierung) wurden im Jahr 2008 von der AG Wasserstandsvorhersage Bodensee Berechnungen zum Einfluss eines Extremhochwassers des Alpenrheins auf den Bodensee durchgeführt.

Dabei wurden für die Bodensee-Zuflüsse folgende Randbedingungen angesetzt: Alpenrhein HQ₃₀₀, Bregenzerach, Dornbirnerach, Rotach, Schussen und Argen jeweils HQ₁₀₀, die anderen Zuflüsse wurden vernachlässigt. Für den Ausgangswert des Seewasserstandes zu Beginn des fiktiven Hochwassers wurden verschiedene Varianten (niedriger, mittlerer und hoher Ausgangswert) angenommen. Die Berechnungen des Seewasserstands wurden mit dem gemeinsamen Bodenseemodell (WHM LARSIM) der Bodenseeanlieger durchgeführt.

In Tabelle 4 sind die Maximalwasserstände der Modellberechnungen für die verschiedenen Anfangsbedingungen aufgeführt. Es wird deutlich, dass der durch ein Extremhochwasser des Alpenrheins ausgelöste Hochwasserstand des Bodensees stark vom Startwert des Seespiegels abhängig ist. Entsprechend dem Jahresgang des Bodensees (grüne Ganglinie in Abb. 4) ist das Potential zur Ausbildung extremer Seewasserstände in den Sommermonaten, wenn der mittlere Seewasserspiegel über 400 cm liegt, am größten. Bei einem Startwert des Seespiegels von 430 cm ergibt sich beim o.g. Zuflussszenario ein Maximalwert des Obersees bei Konstanz von 609 cm.

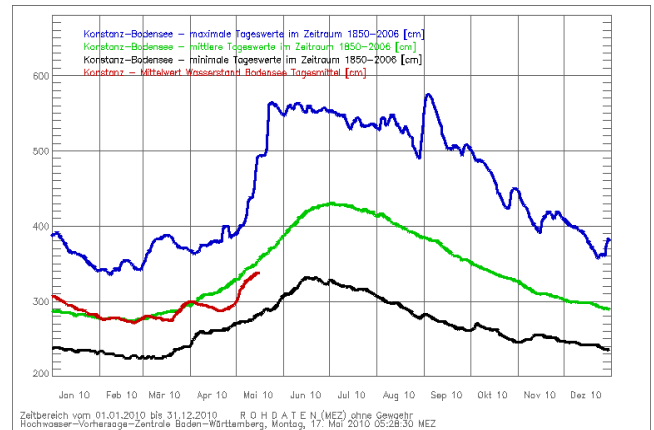


Abb. 4: Jahresgang des Wasserstands am Pegel Konstanz / Bodensee

Tabelle 4: Maximale Wasserstände für den Pegel Konstanz/Bodensee bei einem fiktiven Extremhochwasser (HQ₃₀₀) des Alpenrheins

Wasserstand Obersee (Pegel Konstanz) [cm]	
Ausgangswert zu Beginn des fiktiven HW	Berechneter Maximalwert
320	558
400	591
430 (= ungefähr mittlerer Wasserstand des Bodensees in den Monaten Juni/Juli)	609
495	649

2.4 Schlussfolgerungen und Empfehlung für den Obersee

Nach Auswertung aller vorliegenden Informationen wird vorgeschlagen, **für den Extremwasserstand (ca. HW₁₀₀₀) des Obersees (Pegel Konstanz) einen Wasserstand von 610 cm anzusetzen.**

Der vorgeschlagene Wasserstand $HW_{\text{extrem}} = 610$ cm ist mit den zur Verfügung stehenden Informationsquellen (historische Hochwasserstände, statistische Extremwertberechnungen und deterministische Berechnungen) plausibel in Einklang zu bringen:

- Er liegt in der Größenordnung des homogenisierten Wasserstands des historischen Extremhochwassers von 1817.
- Er liegt in der Mitte der von LUBW & BAFU (2010), Lalk & Godina (2000) und LUBW (2010) extremwertstatistisch ermittelten Spannweite der 1000-jährlichen Wasserstände.
- Er lässt sich unter Verwendung plausibler Randbedingungen mit dem deterministischen Bodenseemodell nachvollziehen.

In den unterschiedlichen Landeshorizonten entspricht der vorgeschlagene Extremwert von 610 cm folgenden Geländehöhen:

Tabelle 5: HW-Extremwerte für den Bodensee-Obersee, bezogen auf die Landeshorizonte der Anliegerstaaten

	Wasserstand am Seepiegel		
	Konstanz (D) [m ü. NN]	Bregenz (A) [m über Adria]	Romanshorn (CH) [m ü. Marseille]
HW_{extrem} (bezogen auf 610 cm am Pegel Konstanz)	397,99	398,24	398,31
HW_{extrem} (gerundet im jeweil. Höhensystem)	398,00	398,25	398,30

Zwischen den Höhensystemen der Anliegerstaaten bestehen eindeutige Beziehungen. Es ist daher anwendungsbezogen zu unterscheiden, ob bei der Verwendung von HW_{extrem}-Werten mit Bezug auf die Landeshorizonte die gerundeten Werte verwendet werden (um keine Scheingenauigkeit vorzuspiegeln) oder aber die exakten Werte. Der maximal hierdurch bewirkte Unterschied beträgt an der schweizerisch-österreichischen Landesgrenze 2 cm und ist wohl vernachlässigbar.

Aus diesem Grunde wird vorgeschlagen, für Bearbeitungen im System der Landeshorizonte die gerundeten Werte zu verwenden.

3. Hinweise zur Berechnung des HW-Extremwerts für den Seerhein

Als Seerhein wird der etwa vier Kilometer lange Abschnitt des Rheins bezeichnet, der den Ober- und den Untersee verbindet. Der mittlere Wasserspiegel (Zeitraum 1887-1987) liegt am Pegel Gottlieben/Seerhein laut LfU (1990) ca. 11 cm tiefer als am Pegel Konstanz/Bodensee. Bei diesem Wert handelt es sich um einen Schätzwert „ohne Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs von Veränderungen im Querschnitt des Bodensee-Auslaufes“. Eine von der LUBW durchgeführte Analyse der Zeitreihe 1999 bis 2006 ergab eine mittlere systematische Wasserstandsdifferenz von 7,5 cm zwischen den Pegeln Konstanz/Bodensee und Konstanz/Seerhein.

Sofern die HW-Extremwerte des Seerheins hydraulisch berechnet werden, sollten als Randbedingungen der Extremwasserstand des Untersees sowie ein Abfluss des Seerheins in der Größenordnung des von LUBW & BAFU (2010) ermittelten HQ_{1000} für den Pegel Konstanz/Rhein (rund $1200 \text{ m}^3/\text{s}$) verwendet werden. Ggf. ist der Seerheinabfluss so anzupassen, dass der HW-Extremwert des Obersees am Pegel Konstanz in den hydraulischen Berechnungen abgebildet wird.

4. HW-Extremwert für den Bodensee-Untersee

Die Festlegung und Plausibilisierung des HW_{extrem} für den Untersee ist schwieriger als für den Obersee, da die vorhandenen Messzeitreihen kürzer sind und keine hydraulischen Untersuchungen vorliegen.

4.1 Hochwasserstatistik

In Tabelle 6 sind in Spalte 3 die für den Unterseepegel Radolfzell von der AG Wasserstandsvorhersage Bodensee im Jahr 2007 ermittelten Hochwasserkennwerte aufgelistet. Basis für die damalige Festlegung der Hochwasserkennwerte war eine pegelbezogene Hochwasser-Statistik des BAFU für den Pegel Berlingen/Untersee, die anschließend über einen Vergleich mit den HW-Kennwerten für den Oberseepegel Konstanz geringfügig nachjustiert wurden.

Tabelle 6: Hochwasserkennwerte für den Ober- und Untersee

(1)	(2)	(3)	(4)
	Wasserstand Konstanz/Bo.	Wasserstand Radolfzell	Differenz Obersee - Untersee
Datenquelle:	www.bodensee-hochwasser.info auf Basis Hydrograph. Dienst Österreich (HW ₅₀ / HW ₁₀₀), bzw. Hydrograph. Dienst Österreich (HW ₂₀₀) (jeweils Zeitreihe 1817-1999)	www.bodensee-hochwasser.info (Zeitreihe 1886 - 2005)	
Jährlichkeit	W [cm]	W [cm]	
50	553	528 ¹⁾	25 cm
100	568	541 ¹⁾	27 cm
200	583	-	
300		-	
500		-	
1000			
HW Mai/Juni 1999	565	543	22 cm

¹⁾ Log-Pearson-III-Verteilung

Der mittlere Wasserstand des Untersees liegt nach LfU (1990) am Pegel Berlingen ca. 22 cm tiefer als am Pegel Konstanz (Zeitreihe 1887-1987). Bei Hochwasser kann die Differenz aber je nach den hydraulischen Verhältnissen kleiner oder größer ausfallen (s. Tab. 6, Spalte 4).

4.2 Historische Hochwasser und deren Übertragbarkeit

Tab. 7 gibt einen Überblick über die historischen Extremwasserstände am Pegel Radolfzell. Kontinuierliche Messungen an diesem Pegel gibt es erst seit dem Jahr 1961. Der aufgeführte Wert des Jahres 1890 ist daher aus den Messungen am Unterseepegel Berlingen abgeleitet.

Tabelle 7: Historische Wasserstände für den Pegel Radolfzell

Historische Wasserstände [cm über PNP Radolfzell, vor 1961 abgeleitet aus W Berlingen]	
555	(04.09.1890) <i>HHW 1896-2006</i>
543	(24.05.1999)
534	(06./07.1910)

Die verfügbaren Informationsquellen stimmen darin überein, dass **die Hochwasserstände des Untersees in den vergangenen Jahrzehnten deutlich abgesunken sind**. LfU (1990) quantifiziert die Absenkung der jährlich höchsten Wasserstände für den Untersee (Pegel Berlingen) auf ca. 25 cm in 100 Jahren für den Beobachtungszeitraum 1887 bis 1987. Die systematische Absenkung der Hochwasserstände ist vermutlich auf Veränderungen des Zuflussregimes des Alpenrheins durch den Einfluss des Kraftwerk-Speicherbetriebs zurückzuführen, dessen Ausbau schwerpunktmäßig in den Jahren 1952 bis 1976 erfolgte (LfU 1990).

4.3 Deterministische Berechnung eines Extremhochwassers

Im Zusammenhang mit der in Kap. 2.3 genannten deterministischen Berechnung eines Extremhochwassers für den Bodensee-Obersee wurden von der AG Wasserstandsvorhersage Bodensee auch die entsprechenden Wasserstände für den Untersee mitberechnet. In diesem Berechnungsszenario wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass dem Untersee ausschließlich Wasser aus dem Seerhein zufließt. Andere Unterseezuflüsse können in diesem Zusammenhang als vernachlässigbar angesehen werden. Der auf die Seefläche des Untersees fallende Niederschlag wurde im Modell berücksichtigt.

In Tabelle 8 sind die Maximalwasserstände der Modellberechnungen für die verschiedenen Anfangsbedingungen aufgeführt. Auch hier wird deutlich, dass der durch ein Extremhochwasser des Alpenrheins ausgelöste Hochwasserstand des Untersees stark vom Startwert des Seespiegels abhängig ist. Entsprechend dem Jahresgang des Bodensees (vgl. grüne Ganglinie in Abb. 4) ist das Potential zur Ausbildung extremer Seewasserstände in den Sommermonaten, wenn der mittlere Seewasserspiegel bereits über 400 cm liegt, am größten. Bei einem Startwert des Oberseespiegels von 430 cm ergibt sich beim in Kapitel 2.3 ausgeführten Zuflusszenario für den Pegel Radolfzell ein Maximalwert des Untersees von 586 cm.

Tabelle 8: Maximale Wasserstände für den Pegel Radolfzell bei einem fiktiven Extremhochwasser (HQ₃₀₀) des Alpenrheins

Wasserstand Untersee (Pegel Radolfzell) [cm]	
Ausgangswert zu Beginn des fiktiven HW	Berechneter Maximalwert
Obersee: 320, Untersee: 299	558
Obersee: 400, Untersee: 377	582
Obersee: 430, Untersee: 406 (= ungefähr mittlerer Wasserstand des Bodensees in den Monaten Juni/Juli)	586
Obersee: 495, Untersee: 470	608

Die Wasserstands-Abfluss-Beziehung für den Untersee-Ausfluss ist für Wasserstände oberhalb 540 cm extrapoliert und daher mit größeren Unsicherheiten behaftet, die sich folglich auch in die berechneten Scheitelwerte fortpflanzen.

4.4 Schlussfolgerungen und Empfehlung für den Untersee

Nach Auswertung aller vorliegenden Informationen wird vorgeschlagen, **für den Extremwasserstand (ca. HW₁₀₀₀) des Untersees (Pegel Radolfzell) einen Wasserstand von 585 cm anzusetzen**. Dieser Wert (siehe rote Hervorhebung in Tabelle 8) ist aus der in Kapitel 4.3 erläuterten deterministischen Extremwertberechnung unter der Randbedingung eines realistischen Ausgangswasserstands abgeleitet und steht somit auch im Einklang mit dem entsprechenden Extremwasserstand des Obersees. Um keine Scheingenauigkeit durch Angabe eines zentimeterscharfen Wasserstandes vorzuspiegeln, wurde der Wert von 586 cm auf **585 cm** gerundet.

In den unterschiedlichen Landeshorizonten entspricht der vorgeschlagenen Extremwert von 585 cm folgenden Geländehöhen:

Tabelle 9: HW-Extremwerte für den Bodensee-Untersee, bezogen auf die Landeshorizonte der Anliegerstaaten

	Wasserstand am Seepiegel	
	Radolfzell (D) [m ü. NN]	Berlingen (CH) [m ü. Marseille]
HW_{extrem} (bezogen auf 585 cm am Pegel Radolfzell)	397,74	398,06
HW_{extrem} (gerundet im jeweil. Höhensystem)	397,75	398,05

Zwischen den Höhensystemen der Anliegerstaaten bestehen eindeutige Beziehungen. Es ist daher anwendungsbezogen zu unterscheiden, ob bei der Verwendung von HW_{extrem} -Werten mit Bezug auf die Landeshorizonte die gerundeten Werte verwendet werden (um keine Scheingenauigkeit vorzuspiegeln) oder aber die exakten Werte. Der hierdurch bewirkte Unterschied an der schweizerisch-deutschen Landesgrenze beträgt 2 cm und ist wohl vernachlässigbar.

Aus diesem Grunde wird vorgeschlagen, für Bearbeitungen im System der Landeshorizonte die gerundeten Werte zu verwenden.

5. Wellenschlag

Bei technischen Anlagen kann nach DIN 19700 bzw. DVWK-Merkblatt 246/1997 (Freibordbemessung an Stauanlagen) ein Wellenschlag berücksichtigt werden. Ob bei einem natürlichen Gewässer wie dem Bodensee bei der Ermittlung extremer Wasserstände ebenfalls ein Wellenschlag zu berücksichtigen ist, war nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Der AG Wasserstandsvorhersage Bodensee sind darüber hinaus auch keine systematischen Analysen über das zeitgleiche Auftreten von extremen Hochwasserständen des Bodensees einerseits und windindiziertem Wellenschlag andererseits bekannt.

Der vorgeschlagene HW-Extremwert beinhaltet daher keinen Zuschlag zur Berücksichtigung eines Wellenschlags.

6. Quellenangaben

Konold, W. (2000): Die Regulierung des Bodensees: eine alte Geschichte. *Der Bürger im Staat*, Heft 2 2000 Der Rhein, S. 82-86. www.buergerimstaat.de/2_00/rhein.pdf

Lalk, P. & Godina, R. (2000): Extremwertstatistische Bewertung des Bodensee-Hochwassers im Jahre 1999. *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, Nr. 79, S. 53-58.

LfU (1990): *Handbuch Hydrologie Baden-Württemberg. Veränderung der Bodensee-Wasserstände von 1887 bis 1987.*

LUBW (2010): HW_{1000} für den Bodensee-Obersee. Extremwertberechnung des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Auftrag der LUBW (unveröffentlicht).

LUBW & BAFU (2010): Aktualisierung des Hochwasserabfluss-Längsschnitts für den Hochrhein. *Untersuchungsbericht des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Auftrag der LUBW.*

Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des KIT (2009): Langzeitverhalten der Bodensee-Wasserstände, Entwurf vom 18.01.2009 mit Ergänzungen vom 16.01.2009 (unveröffentlicht).

Luft, G. (2009): Prüfung, Plausibilisierung, Homogenisierung der W(d)-Daten u. Korrekturen am Pegel Konstanz/Bodensee (unveröffentlicht).

Anhang

A1: Umrechnung der Pegelstände auf unterschiedliche Bezugshorizonte

Die Wasserstandsangaben im vorliegenden Bericht sind für unterschiedliche Bezugshorizonte angegeben. Die Ursache hierfür ist, dass die Bodenseeanrainerländer Deutschland, Österreich und Schweiz ihre Höhenangaben auf unterschiedliche Normalwasserstände beziehen: Deutschland auf den Normalwasserstand der Nordsee bei Amsterdam (m ü. NN), Österreich auf den Normalwasserstand der Adria bei Triest (m ü. A) und die Schweiz auf den Normalwasserstand bei Marseille (m ü. M).

Für die Obersee-Pegel Konstanz und Bregenz sowie den Unterseepegel Radolfzell sind im vorliegenden Bericht neben den absoluten geodätischen Höhen zusätzlich die auf die jeweiligen Pegelnullpunkte von 391,89 m ü. NN (Pegel Konstanz und Pegel Radolfzell) bzw. 392,14 m ü. A (Pegel Bregenz) bezogenen Relativmaße angegeben, da diese in der Regel in der wasserwirtschaftlichen Praxis in Deutschland und Österreich verwendet werden. In der Schweiz werden die Pegelwasserstände dagegen in der Regel als geodätische Höhen angegeben.

In Abb. A 1 sind die Differenzen zwischen den Landeshorizonten grafisch dargestellt.

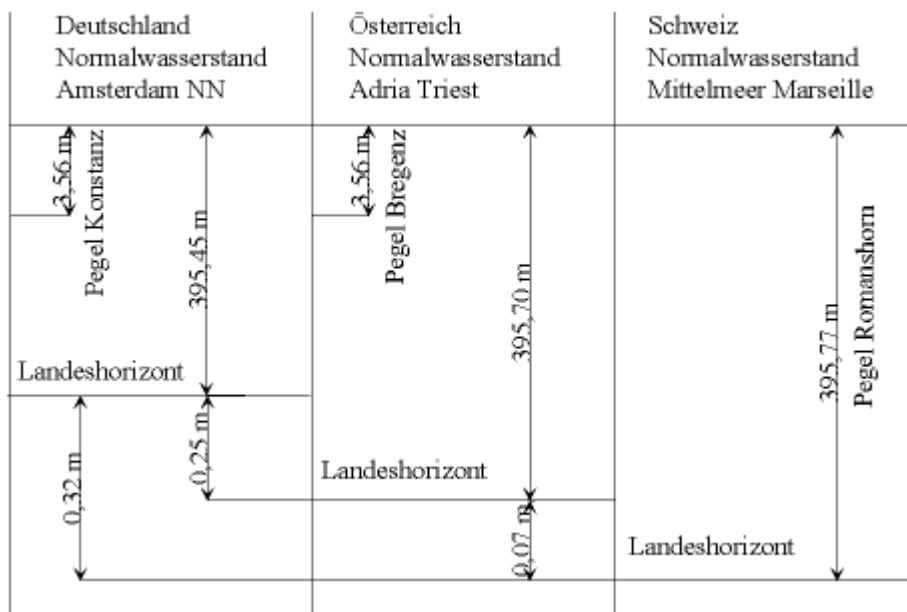


Abb. A 1: Umrechnung der Wasserstände am Beispiel des Mittelwasserstands.

Bei Mittelwasserstand zeigen die Pegel Konstanz/Bodensee und Bregenz jeweils 3,56 m an, der Pegel Romanshorn 395,77 m. (Quelle: Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee)

A2: Grafik der Hochwasserkennwerte für den Ober- und Untersee

Wasserstand [cm über 391.89 m+NN]

