

Das Juni-Hochwasser 2013 – Analyse und Konsequenzen für das Hochwasserrisikomanagement

The June 2013 flood – Analysis and implications for flood risk management

Von G. Blöschl, Th. Nester, J. Komma, J. Parajka und R. A.P. Perdigão, Wien

Mit 15 Abbildungen und 1 Tabellen



Univ. Prof. Dipl.-Ing.
Dr. Günter Blöschl



Dipl.-Ing.
Dr. Thomas Nester



Dipl.-Ing.
Dr. Jürgen Komma



Mag.
Dr. Juraj Parajka



Mag.
Dr. Rui A.P. Perdigão

Kurzfassung

Das Hochwasser 2013 richtete in Österreich erheblichen Schaden an. Hauptverantwortlich für die außergewöhnlich großen Abflüsse waren die hohen Niederschläge am Alpennordrand kombiniert mit einer hohen Bodenfeuchte zu Beginn des Ereignisses. Zuzufolge niedriger Schneefallgrenze fiel im Alpenraum ein Teil des Niederschlags als Schnee. Am Zusammenfluss der Bayerischen Donau mit dem Inn verschärfte die kleine Zeitverzögerung zwischen den beiden Flutwellen das Hochwasser an der Österreichischen Donau. Durch das große Volumen der Welle und die vergleichsweise geringen Überflutungen, nahm der Hochwasserdurchfluss auf seinem Weg weniger stark ab als beim Hochwasser 2002. Der maximale Durchfluss der Donau bei Wien betrug ca. 11000 m³/s, im Vergleich zu 10300, 9600 und 10500 m³/s der Jahre 2002, 1954 und 1899. In diesem Beitrag werden die Entstehung und der Ablauf des Hochwassers 2013 analysiert und in Bezug zu den drei größten Hochwässern der letzten 200 Jahre gesetzt. Es wird die Frage diskutiert, ob Hochwässer generell größer werden und was das jüngste Ereignis für das Hochwasserrisikomanagement bedeutet.

Abstract

The June 2013 flood caused significant damage in Austria. The main reasons for the extraordinary discharges were high precipitation at the northern fringe of the Alps along with high antecedent soil moisture. Snowfall at high altitudes reduced the runoff volume produced. At the confluence of the Bavarian Danube and the Inn, the small time lag between the two flood waves exacerbated the downstream flood at the Austrian Danube. Because of the long duration and less inundation, there was less flood peak attenuation along the Austrian Danube reach than for the August 2002 flood. The maximum flood discharge of the Danube at Vienna was about 11000 m³/s, as compared to 10300, 9600 and 10500 m³/s in 2002, 1954 and 1899, respectively. This paper reviews the meteorological and hydrological characteristics of the event and compares them with those of the three biggest floods in the past 200 years. The paper discusses whether floods are generally increasing as well as the implications of the recent flood for flood risk management.

1. Anlass

Anfang Juni 2013 trat an der Donau, dem Inn und vielen Zuflüssen ein extremes Hochwasser auf, das schwere Schäden verursachte. In Passau erreichten die Hochwasserstände ähnlich extreme Werte wie im Jahr 1501. In Wien war es der größte Hochwasserdurchfluss seit 200 Jahren (seit dem Allerheiligenhochwasser 1787), und an manchen Stellen war es überhaupt das größte je beobachtete Hochwasser. Dabei sind die letzten Hochwasserkatastrophen noch genau in Erinnerung. Im August 2005 war der Westen Österreichs durch eine Flutkatastrophe betroffen. Im August 2002 war es die gesamte Obere Donau und besonders das Grenzgebiet zu Tschechien. Die Hochwasserabflüsse am Kamp waren damals fast dreimal so groß wie das größte Hochwasser im Jahrhundert zuvor (Gutknecht et al., 2002), was zur Bezeichnung „Jahrhundertflut“ führte. Das Julihochwasser 1954 richtete enorme Schäden entlang der gesamten Oberen Donau an. Davor war ein halbes Jahrhundert Ruhe. Im September 1899 gab es eine enorme Hochwasserkatastrophe, ausgelöst durch Niederschläge mit stellenweise über 500 mm. Kresser (1957) gibt einen Überblick über die Hochwässer der Donau.

Was waren nun die Ursachen des Junihochwassers 2013? Wie extrem war es im Vergleich zu früheren Hochwässern? Der vorliegende Beitrag beschreibt die Entstehung und den Ablauf des Hochwassers und vergleicht es mit den größten Hochwässern der letzten 200 Jahre. Der Beitrag geht der Frage nach, ob Hochwässer generell größer werden und was das jüngste Hochwasser für das Hochwasserrisikomanagement bedeutet. Abb. 1 gibt einen Überblick über das Einzugsgebiet der Österreichischen Donau als Grundlage für die Diskussion in diesem Artikel.

2. Entstehung des Hochwassers 2013 und Vergleich mit früheren Ereignissen

2.1. Situation vor dem Ereignis

Die hydrologischen Vorbedingungen des Ereignisses im Juni 2013 waren ungewöhnlich, denn der Niederschlag im ganzen Mai war hoch. In Regensburg wurden im Mai 2013 insgesamt 139 mm Niederschlag gemessen im Vergleich zum langjähr-



Abb. 1: Donaueinzugsgebiet bis zu Pegel Wildungsmauer. Rote Kreise zeigen die in diesem Beitrag verwendeten Pegel.

Fig. 1: Upper Danube basin upstream of Wildungsmauer. Red circles indicate stream gauges used in this paper.

gen Mittel von 68 mm. Zudem waren die Lufttemperaturen eher niedrig, wodurch die Verdunstung gering war. Deshalb waren die Böden außergewöhnlich feucht. Abb. 2 zeigt Simulationen der Bodenfeuchte für Ende Mai 2013 in Bayern. Im Norden Bayerns war die Bodenfeuchte höher als alle Werte der Periode 1962–2012 BfG (2013). Im Inngebiet war die Bodenfeuchte auch hoch, aber nicht so extrem wie im Bayerischen Donaueinzugsgebiet. In Lofer wurde im Mai 2013 ein Niederschlag von 209 mm gemessen im Vergleich zum langjährigen Mittel von 140 mm. Das bedeutet, dass die Böden im ganzen Donaueinzugsgebiet feucht waren, jedoch mit einem starken Gradienten

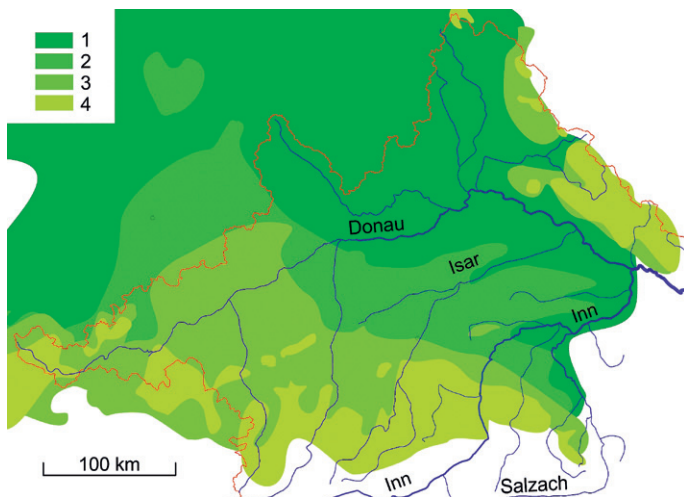


Abb. 2: Bodenfeuchte in Bayern am 31. Mai 2013 verglichen mit dem 31. Mai der Jahre 1962–2012. Index 1 (dunkelgrün) bedeutet, dass die Bodenfeuchte am 31. Mai 2013 größer war als alle anderen Werte der Reihe 1962–2012 zum gleichen Tag, 2 bedeutet den zweitgrößten Wert usw. Aus BfG (2013).

Fig. 2: Soil moisture in Bavaria on 31 May 2013 compared to soil moisture on 31 May for the years 1962–2012. Index 1 indicates that the soil moisture on 31 May 2013 was larger than the soil moisture on the same day for the years 1962–2012. Index 2 means that the soil moisture was the second largest value on this day. From BfG (2013)

vom Norden nach Süden mit den größten Werten im Norden. Der Vergleich mit den Vorbedingungen anderer großer Hochwässer ist interessant. Das Augusthochwasser 2002 war ein Doppelergebnis. Der erste Niederschlagsblock am 7. August führte lokal zu Hochwässern (z.B. im Kampgebiet) und erzeugte weiträumig nahezu gesättigte Bodenbedingungen zu Beginn des zweiten Niederschlagsblocks am 11. und 12. August (Godina et al., 2003). Auch das Hochwasser 1954 hatte ein Vorereignis am 1. und 2. Juli (allerdings kleiner als im Jahr 2002), das zur Erhöhung der Bodenfeuchte zu Beginn des Hauptereignisses vom 7.–12. Juli beitrug (HZB, 1955). Vor Beginn des Hochwassers im September 1899 lag hingegen eine völlig andere Situation vor. Der gesamte August 1899 war trocken gewesen, und auch der Winter 1898/1899 war außergewöhnlich schneearm, sodass die unterirdischen Speicher zu Beginn des Ereignisses einen Tiefstand besaßen (Lauda, 1900).

2.2 Atmosphärische Situation des Ereignisses und Niederschläge

Die Atmosphärische Situation des Ereignisses im Juni 2013 war eine großräumige und stationäre Trog-Wetterlage über Mitteleuropa. Die Vorgeschichte war ein Vb-Tief, danach ein Tief aus der südlichen Adria welches sich mit einer Genua-Zyklone vereinte und unter Verstärkung nach Tschechien weiterzog. Die Niederschläge im Zeitraum vom 29. Mai bis 4. Juni erreichten Werte von bis zu 300 mm, wobei die größten Niederschläge am österreichischen Alpennordrand bzw. an der Grenze zu Bayern auftraten (Abb. 3). Beim Hochwasser im August 2002 war die atmosphärische Situation ähnlich, jedoch waren in Österreich das Mühlviertel und Waldviertel am stärksten überregnet (Godina et al., 2003), und die Grenzregion Bayern-Österreich war weniger stark betroffen. Beim Julihochwasser 1954 war die Wetterlage auch ähnlich, jedoch war Bayern stärker überregnet. Beim Hochwasser im September 1899 hingegen lag kein stationärer Trog vor, sondern ein sehr großräumiges Tiefdruckgebiet, das von Nordafrika bis zum Baltikum und von den Westalpen bis zum Schwarzen Meer reichte. Transport feuchter Luft vom Nordwesten, Nordosten, sowie vom gesamten Mittelmeerraum in das Donaueinzugsgebiet erzeugte exzessive Niederschläge von über 500 mm (Abb. 3).

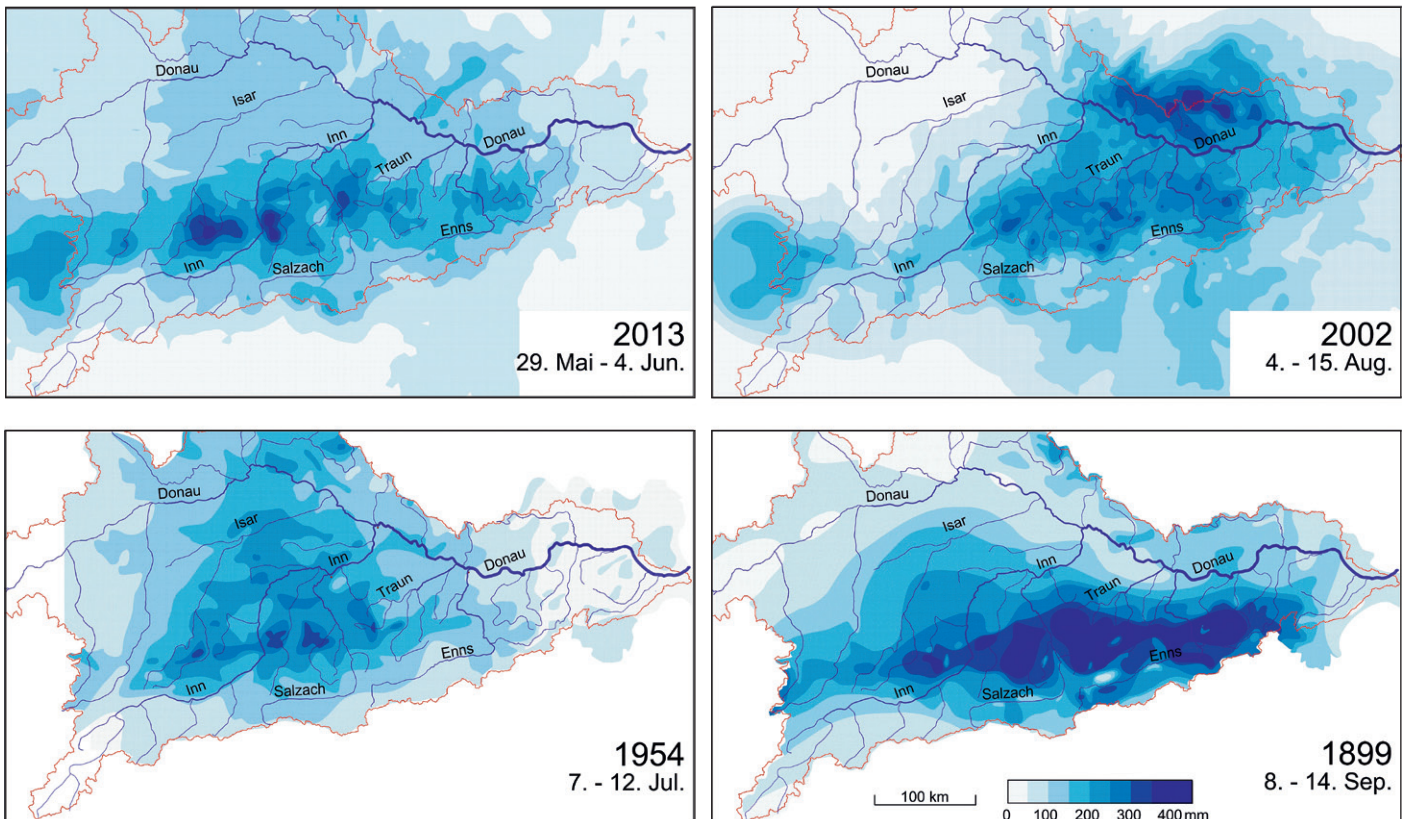


Abb. 3: Ereignisniederschläge der vier größten Hochwässer im Donaueinzugsgebiet in den letzten zwei Jahrhunderten. Interpolation der gemessenen Stationsniederschläge erfolgte mittels Radar (2013, 2002, siehe Haiden et al., 2011) bzw. manuell (1954 und 1899, HZB, 1955; Lauda, 1900). Aus Blöschl et al. (2013a).

Fig. 3: Observed precipitation totals of four large flood events in the Upper Danube basin in the last two centuries. 2013 and 2002 are based on rain gauge data interpolated by the INCA method using radar (Haiden et al., 2011). 1954 and 1899 are based on rain gauge data interpolated manually within the Danube basin (HZB, 1955; Lauda, 1900). From Blöschl et al. (2013a)

2.3. Ereignisniederschläge, Schnee und Abflussbildung

Der Ereignisverlauf des Hochwassers 2013 begann mit heftigen Niederschlägen im Norden des Bayerischen Donaueinzugsgebiets am 29. Mai. Von 29. Mai bis 4. Juni fielen in Regensburg 95 mm. Im südlichen Teil der Bayerischen Donau begann der Niederschlag etwas später, erreichte aber wegen der Staueffekte am Alpennordrand höhere Werte.

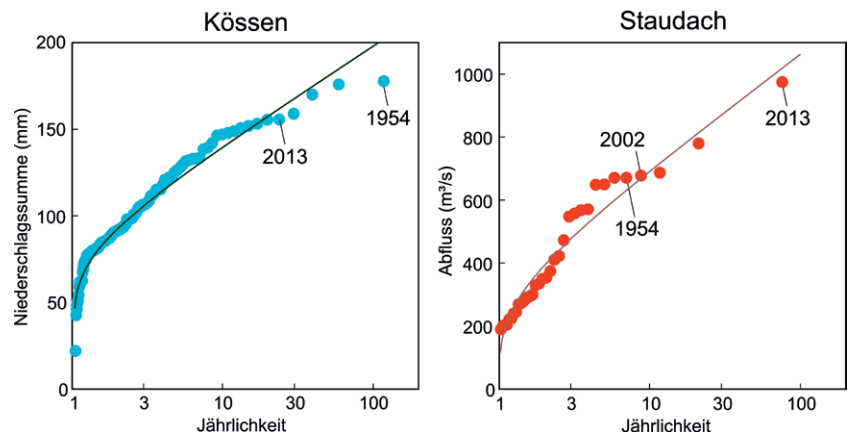
In Kössen bei Kitzbühel wurden für den gleichen Zeitraum 243.5 mm gemessen. Der maximale Zweitagesniederschlag betrug in Kössen 155.6 mm, was den Wert des Augusthochwas-

sers 2002 an dieser Station (132.8 mm) wesentlich überschreitet. Der maximale Zweitagesniederschlag 2013 entspricht an dieser Station einer Jährlichkeit von etwa 30 Jahren (Abb. 4). Allerdings wurde bei den Hochwässern der Jahre 1954 und 1899 ein noch deutlich größerer Zweitagesniederschlag (178 bzw. 170 mm) beobachtet. Im Jahr 1961 waren es 176 mm.

Die maximalen Hochwasserdurchflüsse des in der Nähe liegenden Pegels Staudach an der Tiroler Achen (944 km² Gebietsfläche) waren wesentlich extremer mit einem Durchfluss von 975 m³/s, der einer Jährlichkeit von ca. 100 Jahren entspricht (Abb. 4). Im Einzugsgebiet hatte es im Mai vor dem Ereignis bereits 216 mm geregnet. Während des Ereignisses kamen

Abb. 4: Links: Statistische Auswertung der Jahreshöchstwerte des Niederschlags (Summe über 48 Stunden) für die Station Kössen (Datenreihe 1898–2013). Rechts: Statistische Auswertung der Jahreshöchstwerte des Durchflusses am Pegel Staudach an der Tiroler Achen, Fläche 944 km² (Daten von 1924 bis 2013). 1954 besaß zwar die größten Niederschläge (einschließlich Schneefall in höheren Gebietsteilen), 2013 jedoch die größten Abflüsse seit Beobachtungsbeginn.

Fig. 4: Left: Statistical analysis of annual maximum precipitation (48 hr totals) for the Kössen rain gauge. Right: Statistical analysis of annual maximum runoff for Staudach (944 km²). Lines show fitted Gumbel distributions. Kössen data 1898–2013. Staudach data 1924–2013.



dann nochmals 226 mm hinzu (Abb. 5 oben). Jedoch fiel nicht der gesamte Niederschlag als Regen. Die Nullgradgrenze lag während des Ereignisses relativ tief. An der Station Hahnenkamm (1790 m) wurden am 30. und 31. Mai Temperaturen von ca. -1°C gemessen (Abb. 5 unten). Dadurch fiel in den Alpen ein beträchtlicher Anteil des Niederschlags in Form von Schnee, bis hinunter auf ca. 1600 m. Am Anfang des Ereignisses trat in etwa 15% des Einzugsgebietes Staudach Schneefall auf (Abb. 6 links). Bei wärmeren Temperaturen wäre der Regenanteil größer gewesen und das Hochwasser wohl noch heftiger ausgefallen. Allerdings trug auch nicht der ganze Regen zum Hochwasser bei. Von den 226 mm Niederschlag waren ungefähr 190 mm Regen, und davon kamen 130 mm zum Abfluss (Abb. 6 links). Das entspricht einem Abflussbeiwert von 68%. Im österreichischen Alpengebiet lagen die Abflussbeiwerte generell um 50% oder etwas darüber (Blöschl et al., 2013a).

An der Donau in Bayern war die Situation anders (Abb. 6 rechts). Der Schneeanteil war wegen der durchschnittlich viel geringeren Seehöhen wesentlich kleiner. Im Einzugsgebiet Hofkirchen flossen von den 116 mm Niederschlag (Mittelwert über das Gebiet) nur 31 mm ab. Das entspricht einem Abflussbeiwert von 27%. Der kleinere Wert hängt mit den hoch durchlässigen Bö-

den und der starken Speicherung im Untergrund (trotz hoher Vorbefeuchtung) zusammen.

2.4. Vergleich mit früheren Ereignissen

Wie beim Hochwasser 2002 wies die Niederschlagsverteilung beim Hochwasser 2013 zwei Spitzen auf (Abb. 5 und 6). Es handelte sich also wieder um ein Doppelereignis. Im Gebiet der Tiroler Achen bei Staudach fielen im ersten Teil des Ereignisses 64 mm Niederschlag, im zweiten Teil 162 mm (Abb. 6). Während jedoch 2002 zwischen den Spitzenniederschlägen einige Tage lagen, traten die beiden Spitzen 2013 sehr knapp nacheinander auf. Der kleinere Zeitabstand ist durch die stabilere atmosphärische Situation beim Ereignis 2013 bedingt und führte zu einer einzelnen Hochwasserwelle mit großem Volumen.

Das Hochwasser 2002 war besonders extrem am Kamp. Wegen der sandigen Böden versickert dort bei kleinen und mittleren Hochwässern der größte Teil des Niederschlages (Reszler et al., 2008). Die enormen Niederschläge des Hochwassers 2002 (200 bzw. 115 mm beim ersten bzw. zweiten Ereignis) füllten jedoch die Bodenspeicher auf, wodurch ein Spitzenabfluss von $460\text{ m}^3/\text{s}$ bei Zwettl erzeugt wurde, der fast dreimal so groß war wie der zweitgrößte seit Beginn der Aufzeichnungen gemessene

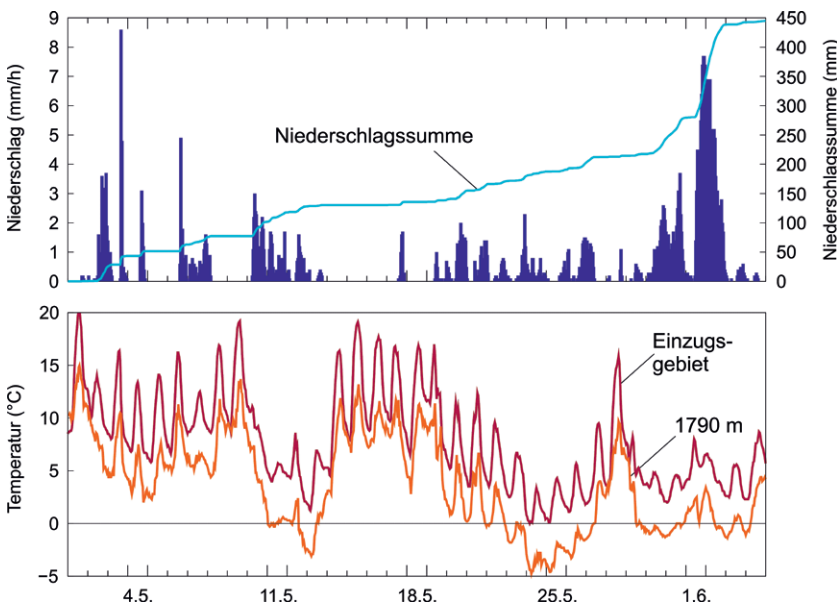


Abb. 5: Oben: Gebietsniederschlag für das Einzugsgebiet Staudach an der Tiroler Achen, Fläche 944 km^2 im Mai/Juni 2013. Unten: mittlere Lufttemperatur für das Einzugsgebiet Staudach, sowie Lufttemperatur an der Station Hahnenkamm, Seehöhe 1790 m ü.A. Zu erkennen sind in der Darstellung oben der hohe Vorregen von 218 mm . Unten ist zu erkennen, dass auf 1790 m die Temperaturen unter Null lagen, und deshalb in hohen Lagen ein beträchtlicher Teil des Niederschlags als Schnee fiel.

Fig. 5: Top: Catchment precipitation for the Staudach catchment (944 km^2) in May and June 2013. Bottom: Catchment average air temperatures for the Staudach catchment and air temperatures at the Hahnenkamm station (1790 m a.s.l.). The top panel shows a large precipitation total (218 mm) in May. The bottom panel shows that at 1790 m a.s.l. temperatures were below 0°C and, at high altitudes, a large fraction of precipitation fell as snow.

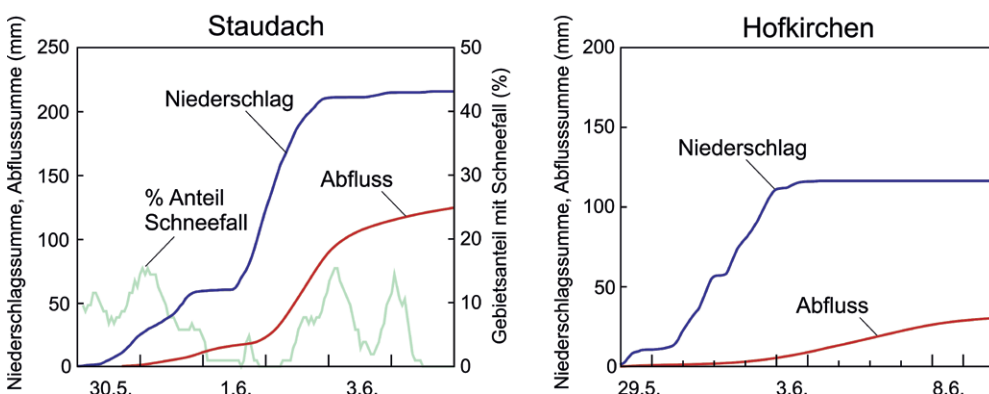


Fig. 6: Cumulative precipitation (blue lines) and cumulative runoff depths (red lines, direct runoff only) for the June 2013 flood event. Left: Staudach catchment (944 km^2), right: Hofkirchen catchment (45610 km^2). Light green line in the left panel shows the catchment area with temperatures below 0°C . The left panel indicates that out of the precipitation total of 226 mm only 130 mm contributed to runoff.

Abb. 6: Summen des Ereignisniederschlags (blau) und des Ereignisabflusses (rot) für das Hochwasserereignis im Juni 2013. Links: Einzugsgebiet Staudach an der Tiroler Achen, Fläche 944 km^2 . Rechts: Einzugsgebiet Hofkirchen an der Donau (Bayern), Fläche 45610 km^2 . Hellgrüne Linie links zeigt den Flächenanteil des Einzugsgebietes Staudach, in dem es während des Ereignisses schneite. Links ist zu erkennen, dass von den insgesamt 226 mm Ereignisniederschlag 130 mm zum Abfluss kamen.

Abfluss von 170 m³/s. Das machte das 2002 Hochwasser am Kamp noch unerwarteter als das Hochwasser 2013 im Einzugsgebiet der Tiroler Achen.

Beim Hochwasser 1954 führte die hohe Überregnung im Gebiet der Bayerischen Donau zu extremen Abflüssen. 1954 wurde in Hofkirchen oberhalb Passaus ein maximaler Abfluss von 3320 m³/s gemessen, beim Hochwasser 2013 ein etwas größerer Werte von 3420 m³/s. Während die Niederschläge 1954 in Bayern größer waren als 2013, waren die Böden trockener. Die große Vorbefeuchtung ist also ein wesentlicher Faktor für die großen Abflüsse 2013. Zudem gab es 1954 in den Alpen Schneefall bis hinunter auf 800 m wodurch der Hochwasserabfluss im Alpenraum deutlich reduziert wurde, während 2013 zwar auch Schneefall auftrat, aber nur bis auf ca. 1600 m.

Die Niederschläge des Ereignisses 1899 waren außerordentlich und übertrafen die der drei anderen Ereignisse bei weitem. In Kössen wurde vom 8.–14. September eine Summe von 318 mm gemessen, in Weißbach sogar 515 mm. Diese Niederschläge wurden durch die sehr ungewöhnliche atmosphärische Situation mit Feuchtetransport aus dem Nordwesten, Nordosten und Süden verursacht. Das Ereignis war aber nicht nur wegen der hohen Niederschläge sondern auch wegen deren enormen räumlichen Ausdehnung bemerkenswert. Ein Zweitagesniederschlag von mehr als 200 mm erstreckte sich über einer Fläche von 1000 km² (Lauda, 1900). Die höchsten Niederschläge traten im Inn-, Salzach-, Traun- und Ennsgebiet auf. Die dadurch ausgelösten Abflüsse waren extrem. Allerdings wurde die Situation durch die trockenen Vorbedingungen begünstigt, da ein beträchtlicher Teil des Niederschlags am Anfang des Ereignis im Boden zurückgehalten wurde. Das erklärt, dass das Hochwasser 1899 zwar außerordentlich groß war, aber nicht viel größer als 1954, 2002 und 2013, obwohl in vielen Gebieten der Ereignisniederschlag um mehr als 50% höher war (Abb. 3). 2013 hatte also im Vergleich zu 1899 zwar wesentlich kleinere Niederschläge, jedoch viel feuchtere Vorbedingungen der Böden.

3. Ablauf des Hochwassers

3.1. Zusammenfluss in Passau

Bei einem regionalen Hochwasser in einem Flussgebiet kommt es nicht nur darauf an wie viel Niederschlag fällt und wie viel der

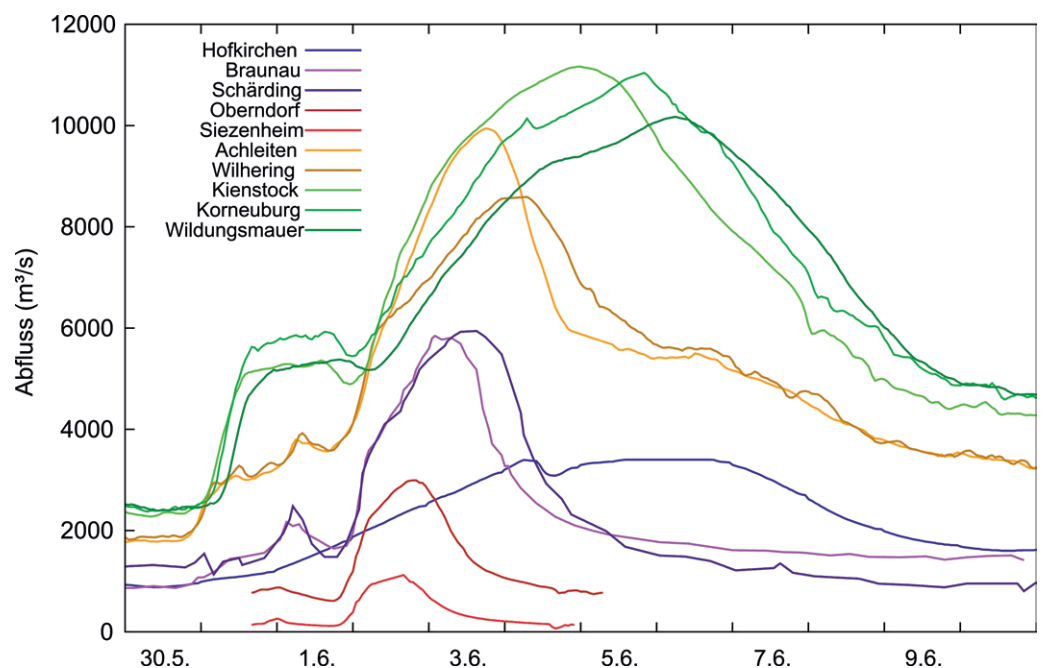
Boden aufnimmt, sondern auch auf das räumliche Zusammenspiel der Einzugsgebiete. Beim Hochwasser 2013 war das räumliche Zusammenspiel ein sehr wichtiger Faktor, der die Größe des Ereignisses bestimmte. Abb. 7 zeigt eine Zusammenschau des Hochwasserablaufes. Ausgehend von den kleinen Gebieten an der Saalach und Salzach (rote Farben) entwickelte sich das Hochwasser am Inn (lila). Nach dem Zusammenfluss mit der Bayerischen Donau nahm das Ereignis an Volumen zu (beige) und verformte sich auf seinem Weg donauabwärts (hellgrün bis dunkelgrün). Zum Vergleich zeigt Abb. 7 die Bayerische Donau (blau). Die Bayerische Donau zeigte nicht nur eine viel stärkere Versickerung im Gebiet als der Inn und Zubringer, sondern auch eine viel stärkere Verzögerung, vor allem wegen des hoch durchlässigen Untergrundes. Außergewöhnlich war beim Hochwasser 2013, dass die Welle der Bayerischen Donau relativ früh auftrat. Dies ist auf die sehr hohe Vorbefeuchtung und auf den etwas früheren Niederschlag als im Inngebiet zurückzuführen. Normalerweise führt zuerst der Inn Hochwasser, erst viel später folgt die Bayerische Donau. Beim Hochwasser 2013 war der zeitliche Unterschied aber kleiner als bei anderen Ereignissen und die beiden Wellen überlagerten sich stärker.

Abb. 8 zeigt die Hochwassermarken am Rathaus von Passau. Die Wand ist noch vom Junihochwasser 2013 feucht. Der benetzte Wasserspiegel ist wesentlich höher als die Marke des Hochwassers im August 1501, allerdings zufolge Einfluss von Wellen. Der maximale Wasserstand in Passau im Juni 2013 wird mit 12,89 m angegeben (BfG, 2013). Der maximale Wasserstand des August 1501 Ereignisses wird, je nach Quelle, mit Werten zwischen 12,70 and 13,20 m angegeben (Schmidt, 2000; BfG, 2013). Damit dürfte das Junihochwasser 2013 eine sehr ähnliche Höhe wie 1501 erreicht und es vielleicht sogar übertrafen haben. 1501 wird generell als das größte Hochwasser im zweiten Jahrtausend angesehen (Kresser, 1957). Auch für die Österreichische Donau bedeutete die Überlagerung des Junihochwassers 2013 einen extrem großen Hochwasserabfluss. In Achleiten kurz unterhalb Passaus wurde ein Scheitelabfluss von 10000 m³/s gemessen.

Die anderen großen Hochwässer der letzten 200 Jahre zeigen unterschiedliche Muster der Überlagerung in Passau. 2002 war die Innwelle wesentlich kleiner wodurch sich in Achleiten ein

Abb. 7: Abflussganglinien ausgewählter Pegel im Donau-einzugsgebiet für das Hochwasserereignis im Juni 2013. Zu erkennen ist, dass die Hochwasserwelle ausgehend von den kleinen Gebieten an der Saalach und Salzach (rote Farben) und dem Inn (lila) an Volumen zunimmt und sich an der Österreichischen Donau (von beige bis dunkelgrün) verformt. Zum Vergleich die Bayerische Donau in blau mit viel gedämpfterer Reaktion.

Fig. 7. Runoff hydrographs in the Danube catchment for the 2013 flood. The volume increases from the small catchments along the Saalach and Salzach Rivers (red) and the Inn River (purple). The shape of the hydrograph changes along the Austrian Danube (beige to dark green).



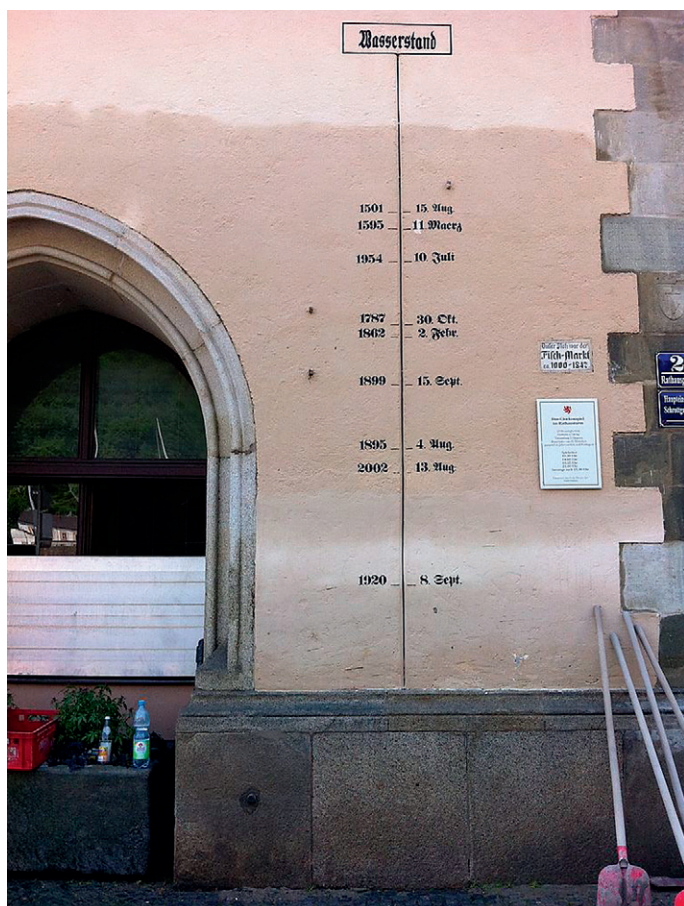


Abb. 8: Hochwassermarken am Rathaus in Passau. Die Wand ist noch vom Junihochwasser 2013 feucht. Die benetzte Höhe des Wassers ist wesentlich höher als die Marke des Hochwassers im August 1501, allerdings zufolge Einfluss von Wellen. Das Junihochwasser 2013 dürfte eine sehr ähnliche Höhe wie 1501 erreicht haben. de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Passau_Pegel_Rathaus_8-6-2013.jpeg.

Fig. 8. Flood marks on the Passau city hall. The 2013 flood mark is clearly visible and is significantly higher than the 1501 flood, due to the effect of waves. The 2013 and the 1501 floods were of similar magnitudes.

Scheitelabfluss von nur 6561 m³/s ergab. 1954 war die Überlagerung ähnlich wie 2013. Allerdings war die zeitliche Differenz

der Wellen von Inn und Bayerische Donau etwas größer und der Maximalabfluss der Bayerische Donau war etwas kleiner. Deshalb war der Scheitelabfluss in Achleiten etwas kleiner mit 9100 m³/s. 1899 war wegen der kleineren Niederschläge und der trockenen Vorbedingungen die bayerische Donauwelle wesentlich kleiner und Achleiten erreichte nur einen Abfluss von 7970 m³/s. Dieses Ereignis wurde vor allem durch den Zufluss von Traun und Enns erhöht.

3.2. Wellenablauf an der Österreichischen Donau

In der Wachau war im Juni 2013 der maximale Hochwasserdurchfluss der Donau etwa gleich groß wie beim Ereignis 2002. Obwohl die Überregnungssituation, die Abflussbildung und das räumliche Zusammenspiel der Hochwässer der verschiedenen Flüsse unterschiedlich waren, ergaben sich ähnliche Größtabflüsse. Damit war in der Wachau der Hochwasserdurchfluss 2013 deutlich größer als bei den Katastrophenhochwässern der Jahre 1954 und 1899 (Abb. 9 links). Sowohl 2013 als auch 2002 ist an dieser Stelle eine Jährlichkeit von etwa 100 Jahren zuzuordnen. Wenn ein Hochwasser flussabwärts wandert, geht normalerweise der maximale Durchfluss stetig zurück, sofern in der Fließstrecke keine großen seitlichen Zuflüsse auftreten. In der Tat waren die maximalen Hochwasserdurchflüsse bei Korneuburg oberhalb von Wien kleiner als in der Wachau (Abb. 9 rechts).

Allerdings war dieser Rückgang 2013 weniger stark ausgeprägt als 2002. Dadurch war in Korneuburg der Hochwasserdurchfluss 2013 etwas größer als 2002. Diese mäßige Abnahme der Maximaldurchflüsse auf dem Weg donauabwärts hat verschiedene Gründe. Zwar waren sowohl 2013 als auch 2002 Doppelereignisse, nur folgten 2013 die beiden Niederschlagsmaxima viel knapper aufeinander. Abb. 10 zeigt die Hochwasserwellen 2013 und 2002 im Vergleich. Für das Hochwasser 2013 ist zu erkennen, dass die zwei Niederschlagsblöcke im Oberlauf zu einer einzigen Welle an der Donau verschmolzen sind. Die Welle weist aber ein größeres Volumen auf als die zweite Welle 2002. Während beim Hochwasser 2013 in Kienstock ein Durchfluss von 9000 m³/s während 81 Stunden überschritten wurde, war dies beim Hochwasser 2002 nur 52 Stunden der Fall. Durch das größere Volumen reduzieren Überschwemmungsgebiete den Maximalabfluss weniger stark als bei einer schlankeren Welle.

Außerdem dürfte es 2013 in geringerem Maß zu Ausuferungen gekommen sein. Dämme wurden nach dem Hochwasser 2002 verstärkt. Die wasserbaulichen Einrichtungen entlang der

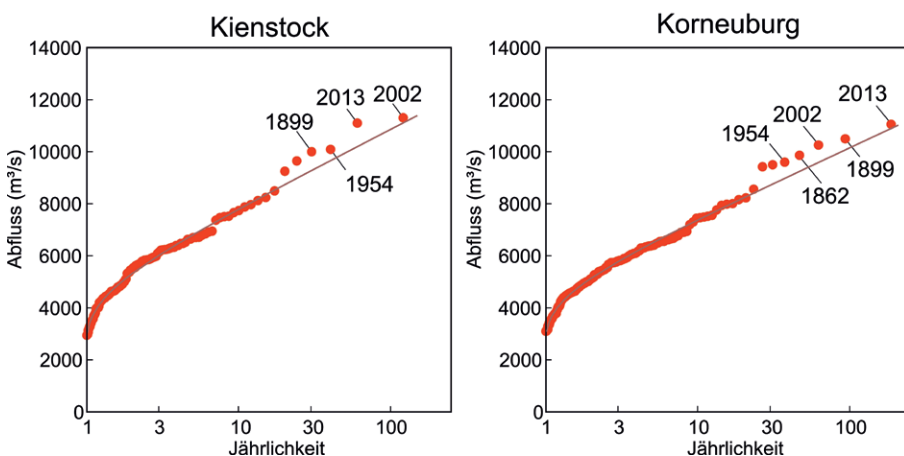


Abb. 9: Links: Statistische Auswertung der Jahreshöchstwerte des Durchflusses der Donau am Pegel Kienstock in der Wachau (Fläche 95970 km²). Rechts: Statistische Auswertung der Jahreshöchstwerte des Durchflusses der Donau am Pegel Korneuburg (Fläche 101536 km²). Links ist zu erkennen ist, dass in der Wachau der Hochwasserdurchfluss etwa gleich groß wie im Jahr 2002 war. Rechts ist zu erkennen, dass bei Korneuburg oberhalb von Wien der Hochwasserdurchfluss etwas größer als 2002 war. Aus Blöschl et al. (2013a).

Donau wurden bei den beiden Ereignissen wohl nicht exakt in der gleichen Weise betrieben, etwa mit Unterschieden im Bereich des Tullner Felds. Dies dürfte ebenfalls zu einer kleineren Reduktion der Abflüsse flussabwärts beigetragen haben. Schließlich handelt es sich bei den Durchflussdaten des Hochwassers 2013 um Rohdaten, die noch eine genaue Prüfung mittels hydrodynamischer Berechnungen erfordern, bevor die Prozesse des Wellenablaufes endgültig eingeschätzt werden können.

Die Abflussganglinien der vier größten Hochwässer der letzten 200 Jahre in Wien sind in Abb. 11 dargestellt. 1954 und 2002 traten Doppelwellen auf, während 1899 und 2013 einfache Wellen auftraten. Die Abflussvolumina über den Zeitraum des

Hochwassers waren für alle vier Hochwässer beträchtlich wie in Tabelle 1 angegeben. Die Direktabflussvolumina der Wellen (ohne Basisabfluss) waren etwa um ein Drittel kleiner. Die Volumina oberhalb der Schwellenwerte von 7000 bzw. 8000 m³/s sind für Überlegungen zum Hochwasserrückhalt relevant, denn genau diese Volumina müssten mindestens im Vorland für die Dauer von etwa einer Woche zurückgehalten werden, wenn die Maximalabflüsse von den aufgetretenen Scheiteln auf die Schwellenwerte reduziert werden sollten. Einen Schwellenwert von 7000 m³/s beispielsweise überschritt beim Hochwasser 2013 ein Volumen von 1,1 Mrd m³. Das entspricht einer Fläche von 550 km² bei einer Wassertiefe von 2 m.

Abb. 10: Vergleich des Hochwassers 2013 (Rohdaten, dunkle Farben) mit dem Hochwasser 2002 (helle Farben) an den Pegeln Kienstock in der Wachau und Korneuburg. Es ist zu erkennen, dass beim Hochwasser 2013 die zwei Niederschlagsblöcke im Oberlauf zu einer einzigen Welle an der Donau verschmolzen sind, die ein größeres Volumen aufweist als die zweite Welle 2002. Kienstock liegt 74 km stromauf von Korneuburg. Aus Blöschl et al. (2013a).

Fig. 10: Comparison of the 2013 flood (dark colours) and the 2002 flood (light colours) for the Kienstock and Korneuburg stream gauges at the Danube. From Blöschl et al. (2013a)

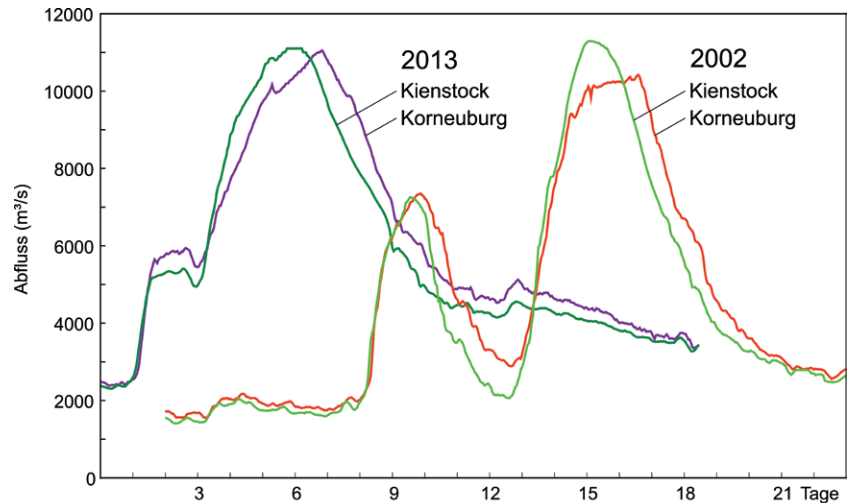


Abb. 11: Abflussganglinien der Donau bei Wien (mit Donaukanal) bzw. Korneuburg der Hochwässer 1899, 1954, 2002, 2013.

Fig. 11. Runoff hydrographs of the Danube at Vienna for the 1899, 1954, 2002 and 2013 floods.

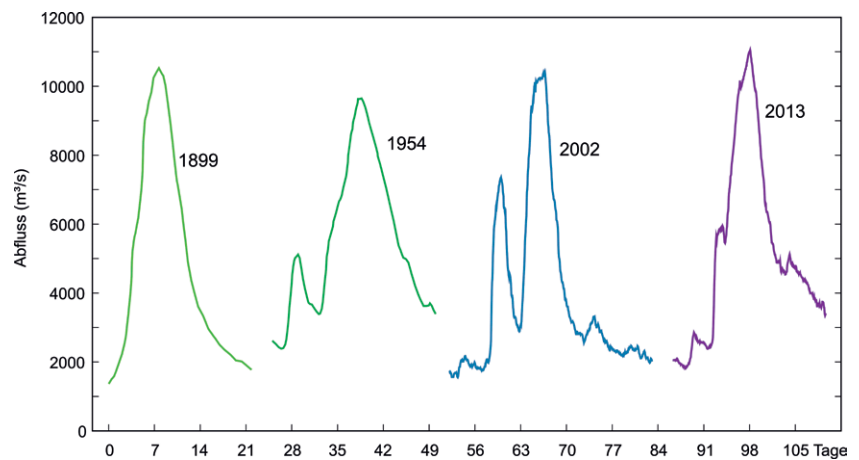


Tabelle 1: Abflussvolumina der größten Hochwässer der Donau bei Wien in den letzten 200 Jahren (*vorläufiger Wert).

Table 1. Runoff volumes of the largest floods of the Danube at Vienna in the last 200 years (*tentative value).

Hochwasser	Scheitelabfluss (m ³ /s)	Zeitraum	Gesamtes Abflussvolumen im Zeitraum (Mrd m ³)	Direktes Abflussvolumen der Hochwasserwelle (Mrd m ³)	Volumen oberhalb eines Schwellenwertes von 7000 m ³ /s (Mrd m ³)	Volumen oberhalb eines Schwellenwertes von 8000 m ³ /s (Mrd m ³)
September 1899	10500	10.-28. Sep. 1899	8,5	6,6	1,1	0,7
Juli 1954	9600	8.-27. Juli 1954	9,9	6,0	0,7	0,3
August 2002	10300	11.-26. Aug. 2002 (zweites Ereignis)	6,5	4,1	0,8	0,5
Juni 2013	11000 *	31. Mai – 17. Juni 2013	9,5	6,1	1,1	0,7

4. Werden die Hochwässer in Österreich größer?

4.1. Hochwassertrends

Das Junihochwasser 2013 erzeugte in vielen Flussabschnitten den größten Hochwasserabfluss der vergangenen zwei Jahrhunderte. Kurz nach dem Hochwasser 2002 stellt sich deshalb die Frage, ob das Junihochwasser 2013 ein Anzeichen dafür ist, dass regionale Hochwässer im Donaugebiet generell zunehmen.

Die Frage hat viele Facetten. Vorerst ist es sinnvoll, Beobachtungen der Hochwasserabflüsse in Hinblick auf mögliche Trends zu untersuchen. Abb. 12 (rechts) zeigt Trendanalysen der gemessenen maximalen jährlichen Hochwasserabflüsse des Zeitraumes 1976–2007 in Österreich. 22% der Gebiete mit Einzugsgebietflächen kleiner 500 km² weisen einen signifikant steigenden Trend auf (4% fallend), bei den größeren Gebieten sind es 12% (7% fallend). Erweitert man die Trendanalyse auf

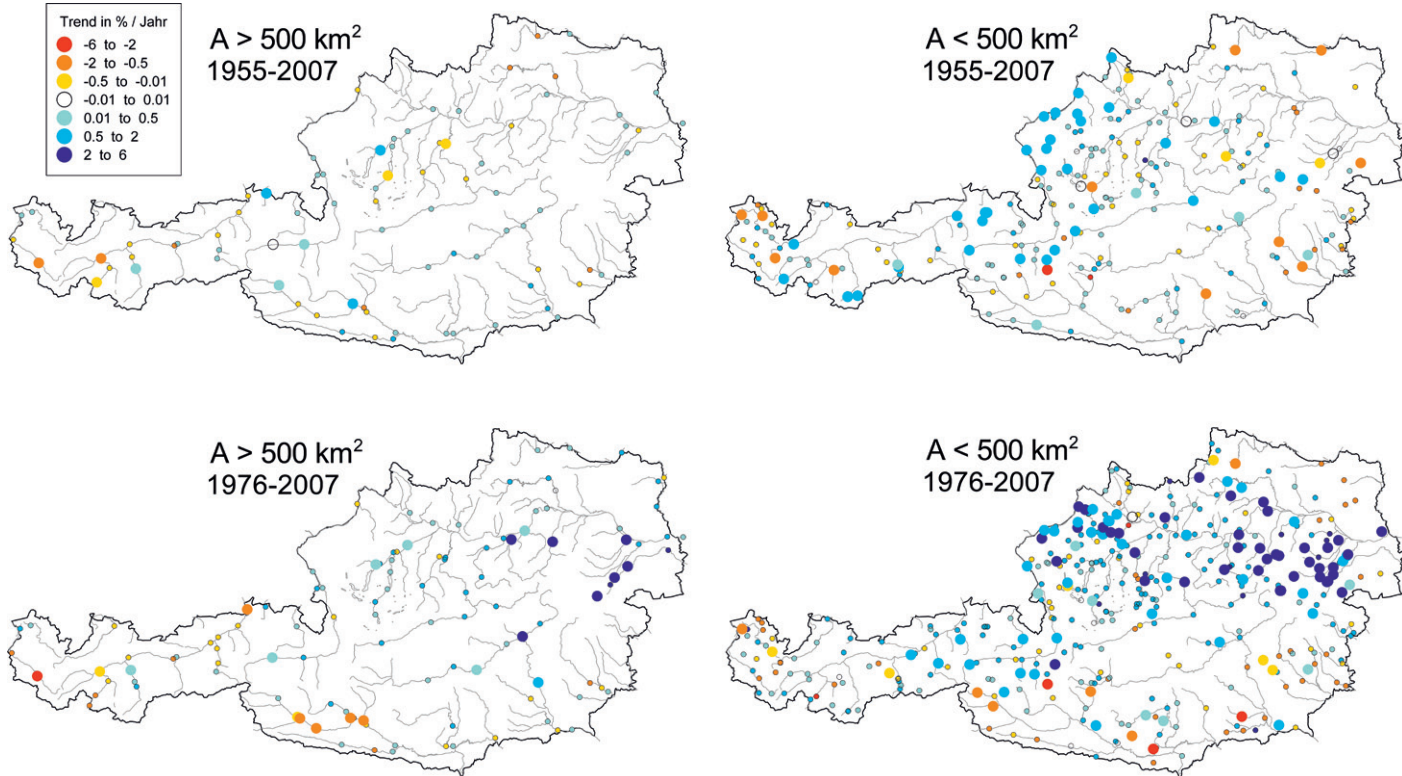


Abb. 12: Trends von Jahresmaxima der Hochwasser für die Reihe 1955–2007 bzw. 1976–2007. Große Kreise blau: steigende Trends, große Kreise rot: fallende Trends. Kleine Kreise: Trends nicht signifikant (5% Niveau). Oben: Gebiete größer 500 km², unten: Gebiete kleiner 500 km². Ohne Junihochwasser 2013. Aus Blöschl et al. (2011).

Fig. 12. Trends of annual maximum floods for the periods 1955–2007 and 1976–2007. Large blue circles: increasing trend, large red circles: decreasing trend. Small circles: no significant trend. Top: Catchments larger than 500 km², bottom: catchments smaller than 500 km². The 2013 flood is not included. From Blöschl et al. (2011)

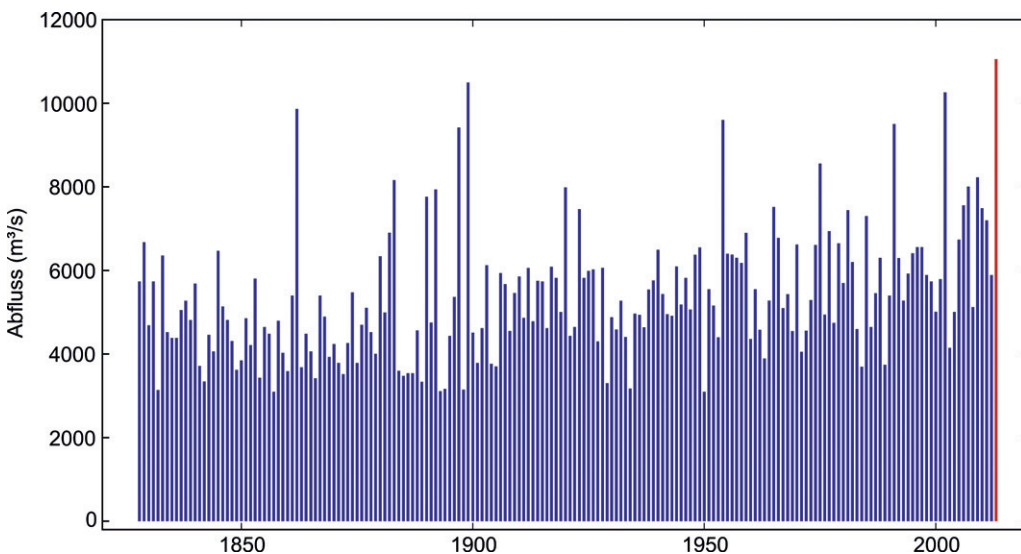


Abb. 13: Jahreshochwässer der Donau bei Wien seit 1828. Verändert nach Blöschl und Montanari (2010).

Fig. 13. Annual maximum floods of the Danube at Vienna since 1828. Modified after Blöschl and Montanari (2010).

den Zeitraum 1955–2007, so zeigen 17% der kleinen Gebiete einen steigenden Trend (8% fallend), bei den größeren Gebieten sind es 7% (7% fallend). Ein linearer Trend ist also bei den kleinen Gebieten in den letzten Jahrzehnten festzustellen, bei größeren Gebieten bzw. Betrachtung eines längeren Zeitraumes ist der Befund weniger klar.

Abb. 13 zeigt die Durchflüsse der Jahreshochwässer der Donau seit Beginn der systematischen Beobachtungen im Jahr 1828. Bei den kleinen Hochwässern gibt es im 20. Jahrhundert einen steigenden Trend, bei den großen Hochwässern ist jedoch kein Trend zu erkennen. Es stellt sich nun die Frage wie diese Daten zu interpretieren sind, und was daraus für die Zukunft ableitbar ist.

4.2. Einflussfaktoren auf Änderungen des Hochwasserregimes

Regionale Hochwässer können im Wesentlichen durch drei Faktoren verstärkt werden (Merz et al., 2012; Kundzewicz, 2012): Klima, Landnutzung und Wasserbauten. Hinweise auf Änderungen im Klimasystem liegen in der Literatur vor, wie z.B. eine längerer Dauer bestimmter Wetterlagen in den letzten Jahren (Petrow et al., 2009). Bei den Extremniederschlägen ist die Datenlage weniger klar (Blöschl und Montanari, 2010). Ein frappierendes Phänomen, das weltweit zu beobachten ist und mit der Kopplung von Ozean und Atmosphäre zusammenhängt, ist, dass Hochwässer nicht zufällig sondern in Phasen mit unterschiedlicher Häufigkeit auftreten. So sieht man in Abb. 13 eine Häufung großer Hochwässer am Ende des 19. Jahrhunderts, aber keine großen Hochwässer in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Wie das Hochwasser 2013 gezeigt hat, wird die Größe von Hochwässern aber nicht nur durch den Niederschlag, sondern durch die Kombination von Niederschlag mit den Gebietsbedingungen (Bodenfeuchte, Schnee) bestimmt. Deshalb kann der Zeitpunkt des Auftretens der Hochwässer innerhalb des Jahres (die Saisonalität) Aufschlüsse über zukünftige Änderungen der Hochwässer geben (Parajka et al., 2010). In Gebieten, in denen Hochwässer oft im Winter auftreten (z.B. im Innviertel und im Mühlviertel), können höhere Lufttemperaturen zu mehr flüssigem Niederschlag und weniger Schneefall führen, und damit zu einer Verschärfung der Hochwassersituation (Blöschl et al., 2011). In Gebieten, in denen Hochwässer im Sommer auftreten, ist dieser Effekt nicht zu erwarten.

Der zweite Faktor ist die Landnutzung. Im ländlichen Bereich kann die Bodenbearbeitung der Felder mit schweren Maschinen den Boden kompakter machen und dadurch den Oberflächenabfluss erhöhen. Dieser Effekt ist auf kleinen Flächen klar nachweisbar, für ganze Flussgebiete wegen der räumlichen Variabilität hingegen nicht (Blöschl et al., 2007). Wald wirkt bei kleinen Ereignissen durch das Speichervermögen reduzierend auf den Hochwasserabfluss (Salazar et al., 2012), bei großen Ereignissen hingegen kaum, wie für das Hochwasser in Paznaun im August 2005 gezeigt wurde (Kohl et al., 2008). Zudem hat der Waldanteil in Österreich in den letzten Jahren zugenommen. Schipisten oder Siedlungsflächen können lokal Hochwässer erhöhen, für ganze Flussgebiete ist der Einfluss wegen der geringen Flächenanteile aber meist sehr klein.

Der dritte Faktor sind wasserbauliche Maßnahmen wie Flussbegradigungen und Hochwasserdämme, die die Schäden insgesamt enorm reduzieren, wegen des Wegfalls von Retentionsvolumina aber die Hochwässer in den darunterliegenden Flussstrecken erhöhen können. Beim Hochwasser 1899 war an der Donau und Zuflüsse eine Fläche von insgesamt 1070 km² überflutet (Lauda, 1900). Mit einer angenommenen Wassertiefe von 2 m, entspricht die Fläche einem Volumen von ca. 2 Mrd m³, also etwa einem Drittel des Direktabflussvolumens des Ereignisses von 6,6 Mrd m³ (Tabelle 1). Im Laufe der Jahre ist das

Retentionsvolumen generell zurückgegangen (z.B. Kresser, 1954). Der Einfluss wasserbaulicher Maßnahmen auf den Hochwasserabfluss kann gut mit den im Bauingenieurwesen üblichen hydraulischen Modellen bestimmt werden und unterscheidet sich je nach den örtlichen Gegebenheiten.

Die Frage ob Hochwässer in Österreich größer werden oder nicht, ist also nicht abschließend und global zu beantworten. Bedeutsam ist, dass viele Faktoren zusammenspielen, die die Größe und Eigenschaften von extremen Überschwemmungen und die Schäden bestimmen. Jedenfalls gibt es jetzt mehr Sachwerte, die durch Hochwässer betroffen sein können, als früher. Bezüglich hydrologischer Faktoren haben beim Hochwasser 2013 die hohe Vorfeuchte und die kleine Verschiebung zwischen den Hochwasserspitzen von Bayerischer Donau und Inn wesentlich zur Erhöhung seiner Größe beigetragen. Umgekehrt gab es auch Faktoren, die leicht extremer hätten sein können. Insgesamt gab es weniger Niederschlag als 1899 und Schneefall im Alpenraum bis hinunter auf 1600 m. Offensichtlich sind extremere Situationen aus hydrologischer Perspektive möglich, wenn auch unwahrscheinlich. Ein Niederschlag wie 1899 mit hoher Vorfeuchte des Bodens wie im Jahr 2013, ev. mit höherer Schneefallgrenze, würde zu einem deutlich größeren Hochwasser als 2013 führen. Für die Bestimmung von Bemessungsabflüssen ist deshalb die Kombination von ungünstigen Faktoren, in Ergänzung zu hochwasserstatistischen Auswertungen, angebracht, wie bereits von Kresser (1957) und Gutknecht (1994) betont. Dies gilt umso mehr, wenn man mit veränderten hydrologischen Bedingungen rechnen muss (Blöschl und Merz, 2008). Diesem Umstand wird im neuen Merkblatt zur Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten Rechnung getragen (DWA, 2012; siehe auch Gutknecht et al., 2006; Merz und Blöschl, 2008).

5. Konsequenzen für das Hochwasserrisikomanagement

5.1. Integriertes Hochwasserrisikomanagement

Zwar richtete das Junihochwasser 2013 erhebliche Schäden an, doch konnten Schutzmaßnahmen zu einer bedeutenden Reduktion der Schäden – im Vergleich zur Situation ohne Schutz – beitragen. Während man sich in der Vergangenheit vorwiegend auf technische Maßnahmen wie Dämme konzentrierte, sieht das moderne, integrierte Hochwasserrisikomanagement eine Kombination von verschiedenen Maßnahmen vor, entsprechend dem Kreislauf von Vorsorge und Bewältigung (Abb. 14). So besteht die Flächenvorsorge darin, in der Raumplanung Hochwasserrisikoflächen als Bauland zu vermeiden (siehe z.B. Merz et al., 2008). Die Schaffung von Retentionsflächen für den Wasserrückhalt ist grundsätzlich immer zu begrüßen, da diese jedenfalls die Größe des Ereignisses, auch für alle Unterlieger, reduzieren. Allerdings ist für regionale Hochwässer wie im Juni 2013 der Flächenbedarf groß, da das Ausmaß der Abflussminderung durch das Verhältnis des Retentionsvolumens zum Hochwasservolumen bestimmt wird (Tabelle 1). Kleinere Flächen können und sollen auch wirksam zur Scheitelreduktion beitragen, doch nimmt ihr Einfluss mit abnehmender Größe des Retentionsvolumens ab.

In besiedelten Gebieten ist es schwierig, ausreichend Flächen für einen wirksamen Schutz gegen Hochwässer von Flüssen wie der Donau zur Verfügung zu stellen. Deswegen ist der technische (wasserbauliche) Hochwasserschutz durch Schutzdämme oder mobile Systeme nach wie vor das Rückgrat der Maßnahmen. Wie wichtig funktionsfähige Dämme sind, zeigte das Hochwasser 2013 deutlich. Vermehrt ist dabei auch die Situation ins Auge zu nehmen, dass Hochwässer auftreten können, die wesentlich größer als alle zuvor beobachteten Ereignisse und die Bemessungswerte sind. Die dadurch verursachten Überflü-

tungen durch entsprechende Maßnahmen, wie überströmbare Dammstrecken, im Zusammenspiel mit der Flächenvorsorge in kontrollierte Bahnen zu lenken, ist ein wichtiger Beitrag zum richtigen Umgang mit dem Restrisiko. Zudem kommt dem Objektschutz, dem Wecken der Eigenverantwortung betroffener Bürger und deren Bereitschaft zur eigenen Risikowahrnehmung, eine zunehmende Bedeutung zu. Um durch rechtzeitige Evakuierung oder Objektschutz den Ausmaß der Schäden zu vermindern, sind funktionierende Hochwasserfrühwarnsysteme erforderlich. Hochwasservorhersagen werden meist zwei Tage oder mehr im Voraus erstellt, etwa für die Donau und Donauzubringer wie den Kamp (Blöschl et al., 2008; Reszler et al., 2008). Abb. 15 zeigt die Hochwasserprognose für den Pegel Kienstock, die am 3. Juni 2013 erstellt wurde, und den Abfluss über 48 Stunden vorhersagt. Zu diesem Zeitpunkt wurde ein Maximalabfluss von 11400 m³/s prognostiziert. Der tatsächlich aufgetretene Maximalabfluss betrug dann ca. 11200 m³/s. Der Unterschied zwischen Prognose und Beobachtung war demnach nur 2% bei einer Prognosefrist von 48 Stunden. Mit neuen hydrologischen Modellen ist es zudem möglich, auch die da-

bei erwartete Vorhersageunsicherheit abzuschätzen (Blöschl, 2008; Nester et al., 2012). Damit steht für die Einsatzplanung nicht nur der wahrscheinlichste Wert, sondern auch ein „worst case“ zur Verfügung.

5.2. Blick auf das Gesamtsystem

Insgesamt hat das Junihochwasser gezeigt, wie wichtig der Blick auf das Gesamtsystem ist. Es sind nicht mehr ausschließlich Einzelmaßnahmen, sondern eine Fülle verschiedener Maßnahmen des integrierten Hochwasserrisikomanagement im Zusammenhang zu sehen, wie von der EU Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (EU, 2007) vorgesehen. Wenn sich auch die Bedeutung einzelner Maßnahmen je nach Situation verschiebt, so ist die Verringerung der Vulnerabilität des Systems (Blöschl et al., 2013b) immer ein zentraler Punkt. Beitragen kann dazu beispielsweise eine Reduktion der Vermögenswerte im hochwassergefährdeten Bereich, das Anlegen von Überläufen von Dämmen für den Fall extremer Hochwässer und das Vorsehen von Redundanz in Warnsystemen und Notfallplänen. Interessant ist hier die Studie von Wardekker et al. (2010), die für den Fall von Rotterdam verschiedene denkbare Katastrophen (sogenannte „wildcards“) betrachtet, und überlegt wie man mit solchen Situationen umgeht.

Die Betonung des Gesamtsystems beim Umgang mit Hochwässern entspricht auch generell der Tendenz im Bauingenieurwesen, den Blick nicht mehr ausschließlich auf das einzelne Bauwerk zu richten, sondern ein Gesamtsystem im Kontext von Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt zu betrachten, in das die Baumaßnahmen integriert sind. Dafür ist verbessertes Know How erforderlich. Im Hydrological Open Air Laboratory (HOAL) bei Petzenkirchen in Niederösterreich (www.waterresources.at) werden die hochwasserauslösenden Prozesse im Detail erforscht, und in einem vom European Research Council (ERC) geförderten Projekt werden Veränderungen der Hochwässer in ganz Europa untersucht (erc.hydro.tuwien.ac.at). Die Forschungsergebnisse fließen dann in komplexe hydrologische Modelle ein, mit denen Hochwässer genauer vorhergesagt und der Hochwasserschutz zuverlässiger geplant werden kann.

Wann das nächste Hochwasser genau kommt, kann man zwar wegen der Komplexität der Prozesse nicht über Jahre voraus prognostizieren. Aber die Maßnahmen des integrierten Hoch-

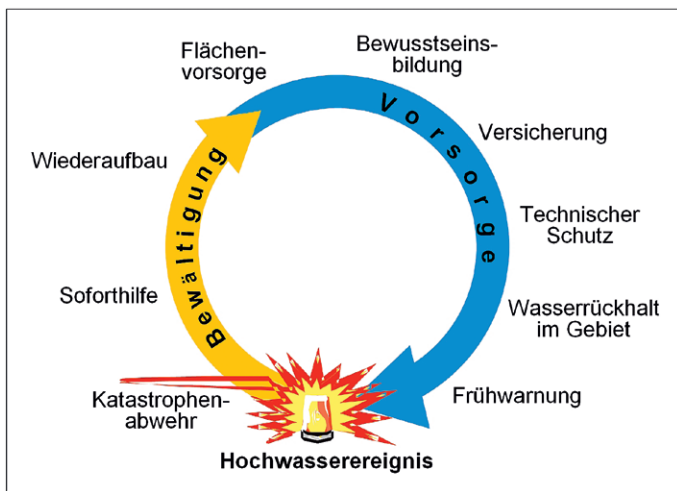


Abb. 14: Maßnahmen des Integrierten Hochwasserrisikomanagement.

Fig. 14. Methods of integrated flood risk management.

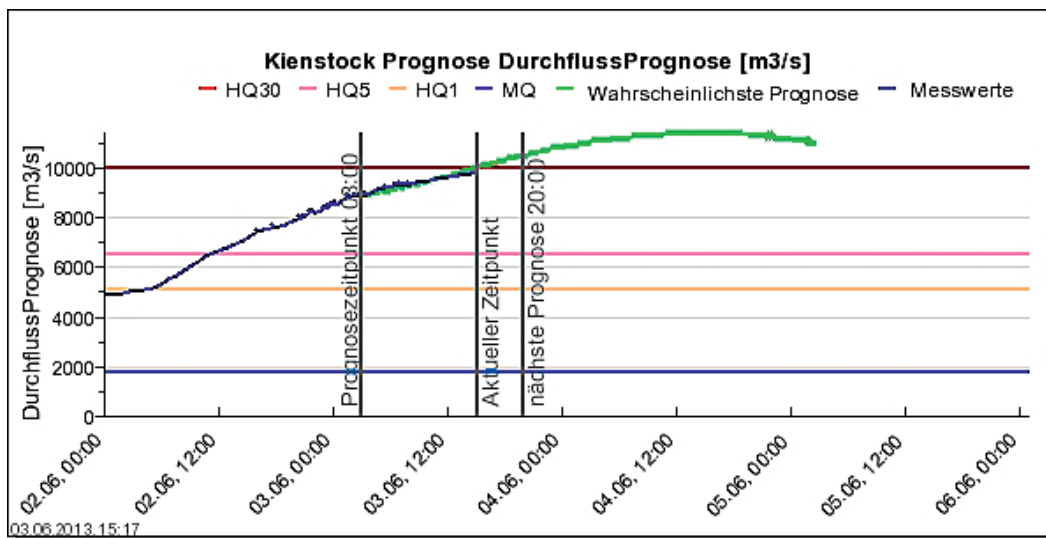


Abb. 15: Publierte Prognose des Abflusses am Pegel Kienstock erstellt am 3. Juni 2013, 3h. Grün: Prognose. Blau: Messung. Eine Prognose von maximal 11400 m³/s gegenüber dem tatsächlich aufgetretenen Wert von ca. 11200 m³/s entspricht einem Unterschied von nur 2% bei einer Prognosefrist von 48 Stunden. Aus <http://www.noel.gv.at/>

Fig. 15. Runoff forecast at the Kienstock gauge published on 3 June 2013, 03:00. Green: forecast. Blue: observed runoff. A forecasted maximum of 11400 m³/s compared to an observation of 11200 m³/s represents a difference of 2% for a lead time of 48 hours. From <http://www.noel.gv.at/>

wasserrisikomanagements erlauben eine optimale Vorbereitung auf die Situation, wenn es wirklich zu einem Hochwasser kommt.

Danksagung

Allen Institutionen, die Daten für diese Auswertung zur Verfügung stellten wird ausdrücklich gedankt, insbesondere den Hydrographischen Diensten und der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Alle hier gezeigten Daten sind vorläufig und unverbindlich. Die Untersuchung wurde durch das ERC (Advanced Grant on Flood Change) und den FWF (P 23723-N21) gefördert. Der vorliegende Artikel baut auf den ausgezeichneten Arbeiten von O.Univ.-Prof. Dr. Werner Kresser und O.Univ.-Prof. Dr. Dieter Gutknecht auf.

6. Literatur

- [1] BfG (2013) Das Juni-Hochwasser des Jahres 2013 in Deutschland. BfG Bericht Nr 1793, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- [2] Blöschl G. and A. Montanari (2010) Climate change impacts – throwing the dice? *Hydrological Processes*, 24, (3) 374–381.
- [3] Blöschl, G. (2008) Flood warning – on the value of local information. *International Journal of River Basin Management*, 6 (1), 41–50.
- [4] Blöschl, G. und R. Merz (2008) Bestimmung von Bemessungshochwässern gegebener Jährlichkeit – Aspekte einer zeitgemäßen Strategie. *Wasserwirtschaft*, 98 (11) 12–18.
- [5] Blöschl, G., A. Viglione and A. Montanari (2013b) Emerging approaches to hydrological risk management in a changing world. In: *Climate Vulnerability: Understanding and Addressing Threats to Essential Resources*. Elsevier Inc., Academic Press, 3–10.
- [6] Blöschl, G., A. Viglione, R. Merz., J. Parajka, J. Salinas und W. Schöner (2011) Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasser und Niederwasser. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 63, (1–2), 21–30.
- [7] Blöschl, G., Ch. Reszler und J. Komma (2008) Hydrologische Hochwasservorhersage für den Kamp – Erfahrungen mit den Ereignissen 2006 und 2007. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 60 (3–4), a13–a18.
- [8] Blöschl, G., S. Ardoin-Bardin, M. Bonell, M. Dorninger, D. Goodrich, D. Gutknecht, D. Matamoros, B. Merz, P. Shand and J. Szolgay (2007) At what scales do climate variability and land cover change impact on flooding and low flows? *Hydrological Processes*, 21, 1241–1247.
- [9] Blöschl, G., T. Nester, J. Komma, J. Parajka and R. A. P. Perdigão (2013a) The June 2013 flood in the Upper Danube basin, and comparisons with the 2002, 1954 and 1899 floods. *Hydrology and Earth System Sciences – Discussions*, 10, 9533–9573.
- [10] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (2012) Merkblatt Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, DWA-M. 552, Hennef, Deutschland.
- [11] EU (2007) Richtlinie 2007/60/EG Des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken Amtsblatt der Europäischen Union L 288/27–L288/34.
- [12] Godina, R., P. Lalk, P. Lorenz, G. Müller und V. Weigluni (2003) Die Hochwasserereignisse im Jahr 2002 in Österreich, *Mitt. Hydrogr. Dienstes Österreich*, 82, 1–39.
- [13] Gutknecht, D. (1994) Extremhochwässer in kleinen Einzugsgebieten. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 46, 50–57.
- [14] Gutknecht, D., Ch. Reszler und G. Blöschl (2002) Das Katastrophenhochwasser vom 7. August 2002 am Kamp – eine erste Einschätzung. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 119 (12), 411–413.
- [15] Gutknecht, D., G. Blöschl, Ch. Reszler und H. Heindl (2006) Ein „Mehr-Standbeine“-Ansatz zur Ermittlung von Bemessungshochwässern kleiner Auftretenswahrscheinlichkeit. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 58, H 3/4, 44–50.
- [16] Haiden, T., A. Kann, C. Wittmann, G. Pistotnik, B. Bica and C. Gruber (2011) The integrated nowcasting through comprehensive analysis (INCA) system and its validation over the eastern Alpine region, *Weather Forecasting*, 26, 166–183a.
- [17] HZB (1955) Das Juli-Hochwasser 1954 im österreichischen Donaugebiet. *Beiträge zur Hydrographie Österreichs*, Nr. 29. Hydrogr. Zentralbüro Wien, 139 S.
- [18] Kohl, B., K. Klebinder, G. Markart, F. Perzl, H. Pirkl, F. Riedl und L. Stepanek (2008) Analyse und Modellierung der Waldwirkung auf das Hochwasserereignis im Paznauntal vom August 2005. www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2008_2_505.pdf.
- [19] Kresser, W. (1954) Der Einfluß der Regulierungs- und Kraftwerksbauten auf die Hochwasserverhältnisse der österreichische Donau, *Oesterreichische Wasserwirtschaft* 6, 65–68.
- [20] Kresser, W. (1957) Die Hochwässer der Donau. *Schriftenreihe des österreichischen Wasserwirtschaftsverbandes*, 32–33, Springer, Wien, 95 S.
- [21] Kundzewicz, Z. W. (Ed.) (2012) *Changes in Flood Risk in Europe*. IAHS Special Publication 10, IAHS Press, Wallingford, 516 S.
- [22] Lauda, E. (1900) Die Hochwasserkatastrophe des Jahres 1899 im österreichischen Donaugebiete, *Beiträge zur Hydrographie Österreichs*, IV. Heft, k.k. hydrographisches Central-Bureau, Wien.
- [23] Merz R., G. Blöschl und G. Humer (2008) Hochwasserabflüsse in Österreich – das HORA Projekt. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 60, (9–10) 129–138.
- [24] Merz, B., S. Vorogushyn, S. Uhlemann, J. Delgado and Y. Hundecha (2012) HESS Opinions “More efforts and scientific rigour are needed to attribute trends in flood time series”. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 1379–1387.
- [25] Merz, R. und Blöschl, G. (2008) Informationserweiterung zur Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 52, (6) 300–309
- [26] Nester, T., J. Komma, A. Viglione and G. Blöschl (2012) Flood forecast errors and ensemble spread – a case study, *Water Resources Research*, 48, W10502.
- [27] Parajka, J., S. Kohnová, G. Bálint, M. Barbuc, M. Borga, P. Claps, S. Cheval, A. Dumitrescu, E. Gaume, K. Hlavcová, R. Merz, M. Pfandner, G. Stancalie, J. Szolgay and G. Blöschl (2010) Seasonal characteristics of flood regimes across the Alpine–Carpathian range. *Journal of Hydrology*, 394 (1–2), 78–89.
- [28] Petrow, T., J. Zimmer and B. Merz (2009) Changes in the flood hazard in Germany through changing frequency and persistence of circulation patterns. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1409–1423.
- [29] Reszler, Ch., G. Blöschl und J. Komma (2008) Steuerung der Verschlussorgane von wasserwirtschaftlichen Speichern – Ein Ansatz zur Optimierung im Hochwasserfall. *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift*, 153 (1–3), 139–151.
- [30] Reszler, Ch., J. Komma, G. Blöschl und D. Gutknecht (2008) Dominante Prozesse und Ereignistypen zur Plausibilisierung flächendetaillierter Niederschlag-Abflussmodelle. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 52 (3), 120–131.
- [31] Salazar, S., F. Francés, J. Komma, T. Blume, T. Francke, A. Bronstert and G. Blöschl (2012) A comparative analysis of the effectiveness of flood management measures based on the concept of “retaining water in the landscape” in different European hydro-climatic regions, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 3287–3306.
- [32] Schmidt, M. (Ed.) (2000) *Hochwasser und Hochwasserschutz in Deutschland vor 1850*. Oldenbourg Industrieverlag, München, 280 S.
- [33] Warddekker, J. A., A. de Jong, J. M. Knoop and J. P. van der Sluijs (2010) Operationalising a resilience approach to adapting an urban delta to uncertain climate changes. *Technol. Forecast. Soc. Change*, 77 (6), 987–998.

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Günter Blöschl
Dipl.-Ing. Dr. Thomas Nester
Dipl.-Ing. Dr. Jürgen Komma
Mag. Dr. Juraj Parajka
Mag. Dr. Rui A.P. Perdigão

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13, 1040 Wien
+43-1-58801-22301
bloeschl@hydro.tuwien.ac.at