

Günter Blöschl, Thomas Nester, Juraj Parajka und Jürgen Komma

Hochwasserprognosen an der österreichischen Donau und Datenassimilation

Flood forecasting on the Austrian Danube and data assimilation

Der Artikel gibt einen kurzen Überblick über die Hydrologie des Hochwassers im Juni 2013 im Einzugsgebiet der österreichischen Donau sowie über die Genauigkeit der operationellen Hochwasserprognosen. Das Prognosesystem wird in Hinblick auf die Ursachen der Vorhersagefehler des Abflusses und die Einschätzung der Wahrscheinlichkeiten der Ensembles untersucht. Verschiedene Möglichkeiten zur Erhöhung der Genauigkeit von Hochwasserprognosen durch Assimilieren von hydrologischen Daten in Echtzeit werden diskutiert: Assimilieren von Abflussdaten sowie Fernerkundungsdaten der Bodenfeuchte und Schneebedeckung.

Schlagwörter: Datenassimilation, Ensemblevorhersage, Fernerkundung, Hochwasser, Prognosen, Unsicherheit

The paper briefly reviews the hydrology of the June 2013 flood event in the catchment of the Austrian Danube and the accuracy of the operational flood forecasts. The flood forecasting system is analysed with respect to the sources of predictive uncertainty of runoff and the assessment of the probability of the ensembles. Various options for increasing the accuracy of flood forecasts through assimilating hydrological data in real time are discussed: assimilating runoff data as well as remote sensing data of soil moisture and snow cover.

Keywords: Data assimilation, ensemble forecast, floods, forecasts, remote sensing, uncertainty

1 Das Hochwasser im Juni 2013 und seine Vorhersage

Das Hochwasser Anfang Juni 2013 an Donau, Inn und vielen Zuflüssen zählt zu den extremsten Ereignissen in den letzten zwei Jahrhunderten. An der Donau bei Wien betrug der Durchfluss ca. 11.000 m³/s. Die nächstgrößten Ereignisse traten in den Jahren 2002, 1954 und 1899 auf und hatten Durchflüsse von 10.300, 9.600 und 10.500 m³/s. Abbildung 1 zeigt die Einordnung der Durchflüsse des Ereignisses im Juni 2013 im Vergleich zu den anderen Jahreshochwässern seit Beginn der systematischen Beobachtungen im Jahr 1828. Bei den kleinen Hochwässern gibt es im 20. Jahrhundert einen steigenden Trend, der teilweise auf einen Anstieg der Sommerniederschläge und teilweise auf wasserbauliche Maßnahmen zurückzuführen ist (BLÖSCHL et al. 2011). Bei den großen Hochwässern ist zwar kein Trend zu erkennen, doch fällt auf, dass zwei extreme Ereignisse (2002 und 2013) kurz hintereinander zu Beginn des 21. Jahrhunderts aufgetreten sind. Der Vergleich des Hochwassers 2013 mit den früheren Ereignissen ist auch in Hinblick auf die Entstehungsmechanismen interessant. Alle vier Hochwässer wurden durch extreme Sommerniederschläge ausgelöst. Mit Ausnahme des Hochwassers 1899 handelte es sich dabei um großräumige, stationäre Trog-Wetterlagen über Mitteleuropa mit Feuchtezufuhr vom Atlantik und zusätzlicher Feuchte aus dem Mittelmeerraum, die zu Ereignisniederschlägen von über 300 mm führten (Abb. 2). 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 Donauegebiet erzeugte exzessive Niederschläge von über 500 mm (Abb. 2). Das Hochwasser 2013 war insofern ungewöhnlich, als die Bodenfeuchte vor Beginn des Ereignisses sehr hoch war, besonders im Einzugsgebiet der bayerischen Donau (BFG 2013). Dies war eine Folge des feuchten und kalten Frühjahres. Demgegenüber trat das Ereignis 1899 im September auf und traf auf verhältnismäßig trockene Böden. Das erklärt, dass die Hoch-

wasserdurchflüsse 1899 nicht wesentlich höher waren als die im Jahr 2013. Es ist klar, dass eine Vorbefeuchtung wie im Juni 2013 in Kombination mit Niederschlägen wie im September 1899 zu deutlich größeren Durchflüssen an der Donau führen würde bei diesen beiden Ereignissen. Dies ist eine Kombination, die zwar unwahrscheinlich, aber hydrologisch möglich ist.

Für die Hochwasserprognosen sind auch die Wellenablaufgeschwindigkeiten interessant. Abbildung 3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Hochwasserscheitel von Passau bis Wildungsmauer an der österreichisch-slowakischen Grenze. Die beiden Hochwasserwellen 2002 waren die schnellsten, da die Überregnung bei den Zubringern Kamp, Traun und Enns besonders hoch war, wodurch die Wellen scheinbar beschleunigt wurden. Umgekehrt trat 1954 die langsamste Welle auf, da der Niederschlag vorwiegend in Bayern fiel und auch die Ausuferungen die Welle stark verzögerten. Hinsichtlich der Niederschlagsverteilung lag das Ereignis 2013 zwischen 1954 und 1899, also würde man Laufzeiten um 80 bis 90 Stunden erwarten. Tatsächlich betrug die Laufzeit

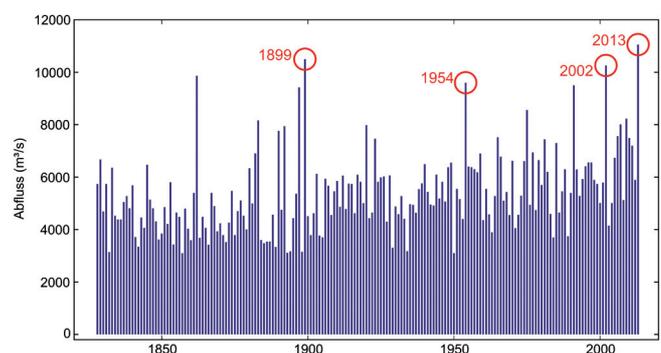


Abbildung 1
Jahreshochwässer der Donau bei Wien seit 1828; aus BLÖSCHL et al. (2013c)
Annual floods of the Danube at Vienna since 1828; from BLÖSCHL et al. (2013c)

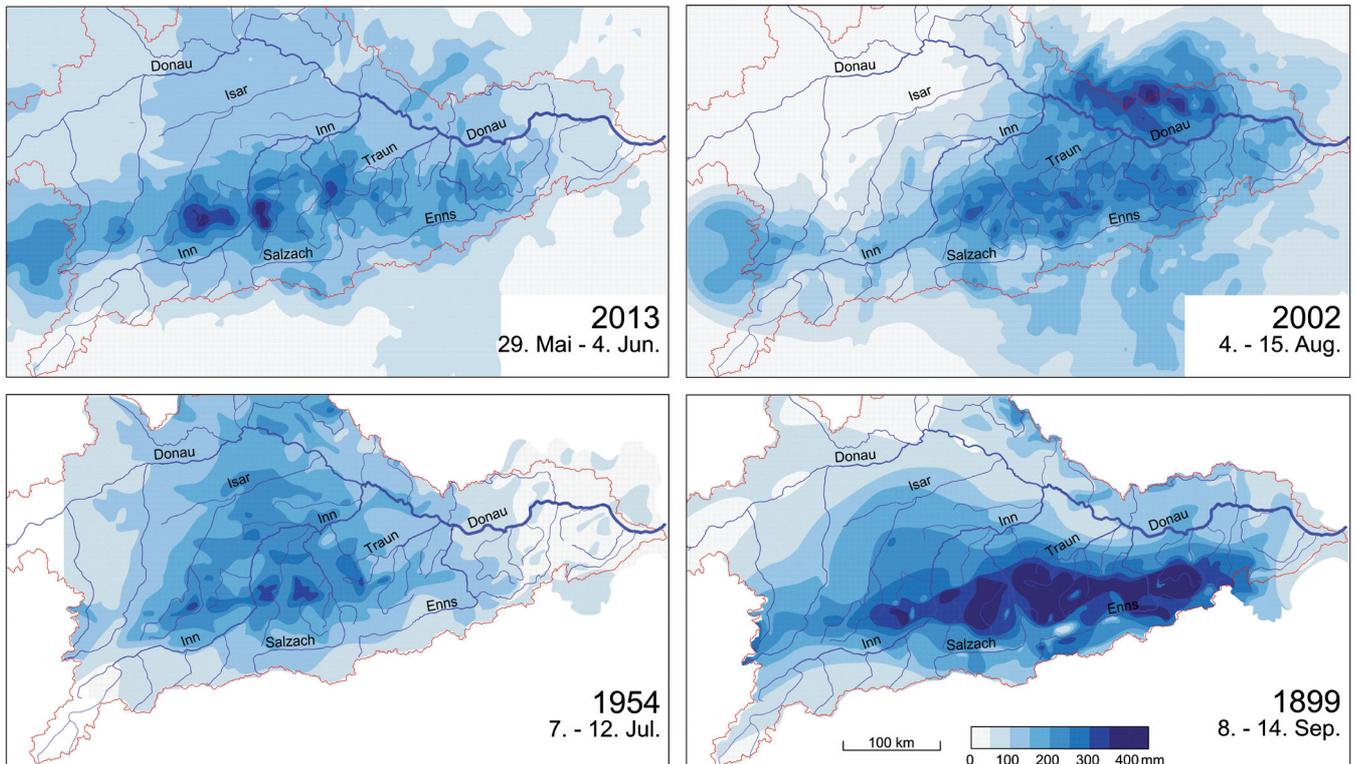


Abbildung 2

Ereignisniederschläge der vier größten Hochwässer im Donauegebiet in den letzten zwei Jahrhunderten. Interpolation der gemessenen Stationsniederschläge erfolgte mittels Radardaten (2013, 2002) bzw. manuell (1954 und 1899); aus BLÖSCHL et al. (2013b)

Event precipitation of the four largest floods in the Danube catchment in the past two centuries. Interpolation of observed station precipitation by radar data (2013, 2002) and manually (1954 und 1899); from BLÖSCHL et al. (2013b)

ten beim Hochwasser 2013 etwa 60 Stunden, was auf geringere Retention im Vorland und größere Wassertiefen in den Stauräumen zurückzuführen sein dürfte.

Abbildung 4 gibt einen Überblick, wie das Hochwasser 2013 im gesamten Einzugsgebiet der österreichischen Donau zustande gekommen ist. Salzach und Inn reagierten wie oft sehr rasch und intensiv, die bayerische Donau hingegen deutlich verzögert. Wenn auch die maximalen Durchflüsse der bayerischen Donau im Vergleich zum Inn nicht sehr hoch erscheinen, ist das Ereignis besonders in Bayern wegen der Kombination von hoher Vorbefeuchtung und hohen Niederschlägen außergewöhnlich. In Passau erreichte der Wasserstand eine ähnliche Höhe wie beim Ereignis 1501, das als das größte Ereignis im 2. Jahrtausend angesehen wird (KRESSER 1957). Zu beachten in Abbildung 4 ist auch die Verformung der Welle entlang der österreichischen Donau.

Die entsprechenden hydrologischen Dienststellen führten für mehrere Stellen im Flusseinzugsgebiet Prognosen durch. In Österreich sind das die Hydrographischen Dienste von Oberösterreich und Niederösterreich. Das Prognosemodell setzt Messungen und Prognosen des Niederschlags mittels Niederschlag-Abflussmodellen und Wellenablaufmodellen in Durchflüsse bzw. Wasserstände um (BLÖSCHL et al. 2008a, 2008b; NESTER et al. 2011, RESZLER et al. 2008). Ein Beispiel der Prognosen zeigt Abbildung 5. Dargestellt ist 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 11.400 m³/s prognostiziert. Der tatsächlich

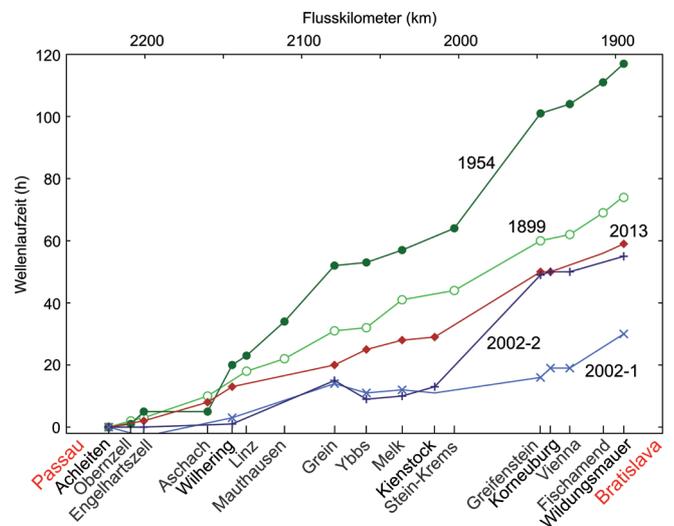


Abbildung 3

Wellenlaufzeiten der Hochwässer der Ereignisse 2013, 2002, 1954 und 1899 entlang der österreichischen Donau von Achleiten nahe Passau bis Wildungsmauer nahe der österreichischen-slowakischen Grenze. 2002-1 bzw. 2002-2 beziehen sich auf die erste bzw. zweite Welle des Hochwassers 2002; aus BLÖSCHL et al. (2013b)

Flood travel times of the events in 2013, 2002, 1954, and 1899 along the Austrian reach of the Danube from Achleiten near Passau to Wildungsmauer near the Austrian-Slovak border. 2002-1 and 2002-2 relate to the first and the second flood wave of the 2002 event, respectively; from BLÖSCHL et al. (2013b)

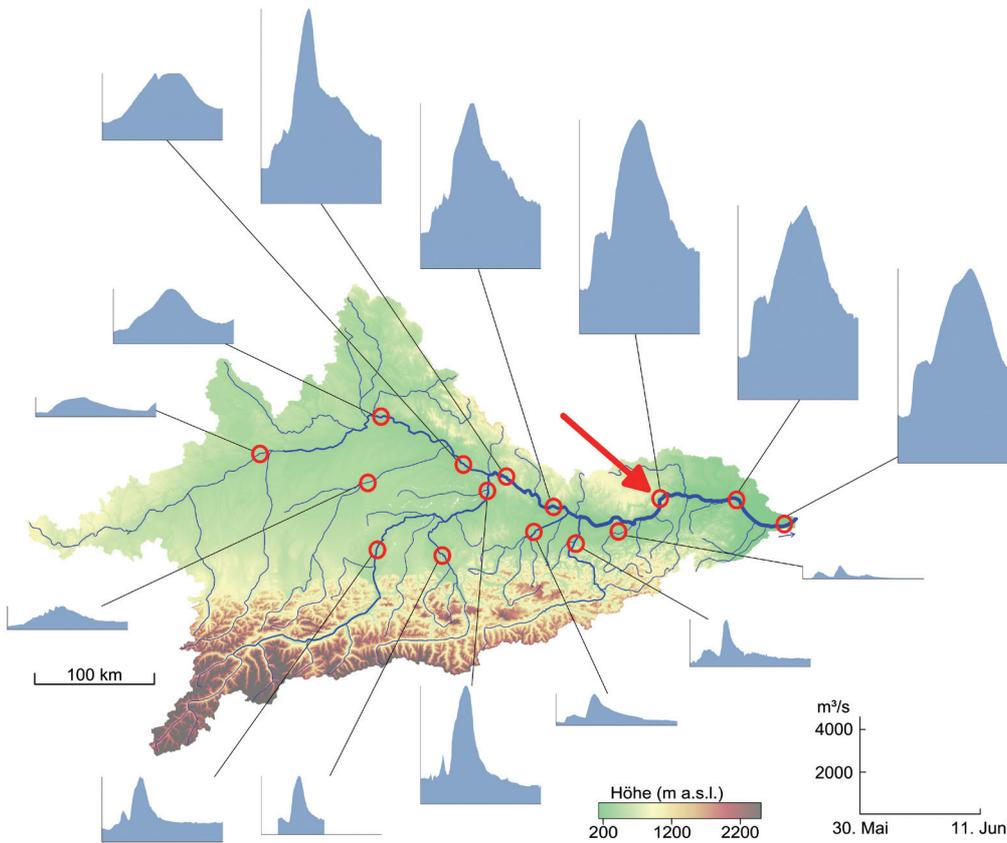


Abbildung 4
 Ablauf der Hochwasserwelle Juni 2013 im Einzugsgebiet der österreichischen Donau. Kreise stehen für Pegel, der Pfeil markiert den Pegel Kienstock, für den Abbildung 5 ein Prognosebeispiel zeigt; aus BLÖSCHL et al. (2013b)
Propagation of the June 2013 flood along the stream network of the Austrian Danube basin. Red circles indicate stream gauges. The arrow indicates the Kienstock gauge, for which Fig. 5 shows a forecast example; from BLÖSCHL et al. (2013b)

aufgetretene Maximalabfluss betrug dann ca. 11.200 m³/s. Der Unterschied zwischen Prognose und Beobachtung war demnach nur 2 % bei einer Prognosefrist von 48 Stunden. Die Prognosen des Scheitels waren also sehr genau, und dies traf auch auf andere Donaupegel zu. Der Zeitpunkt des Scheitels wurde allerdings aus verschiedenen Gründen (u.a. wegen der Niederschlagsprog-

nosen) deutlich zu früh erwartet. Je nach Prognosepegel trat der Scheitel zwischen 6 und 18 Stunden später auf als vorhergesagt.

Während des Ereignisses im Juni 2013 funktionierten die meisten Pegelstellen ordnungsgemäß. An einigen Pegelstationen kam es allerdings zum Datenausfall (z.B. Pegel Passau-Ilzstadt, Pegel Achleiten). Derartige Datenausfälle können an einer Fehlfunktion des Pegels selbst (Einstau infolge hoher Wasserstände) oder an einer Fehlfunktion der Übertragungsleitungen liegen. Grundsätzlich ist zu erwarten, dass eine Reduktion von Datenausfällen die Prognosegüte verbessert. Deshalb ist aus praktischer Sicht dem Aspekt der Datensicherheit großes Gewicht beizumessen. Durch redundante Auslegung des Systems kann die Datensicherheit erhöht werden.

Mit Ensembleprognosen wurden zudem auch die dabei erwarteten Vorhersageunsicherheiten abgeschätzt (BLÖSCHL 2008, NESTER et al. 2011, 2012a). Damit stand für die Einsatzplanung nicht nur der wahrscheinlichste Wert, sondern auch ein "worst case" zur Verfügung.

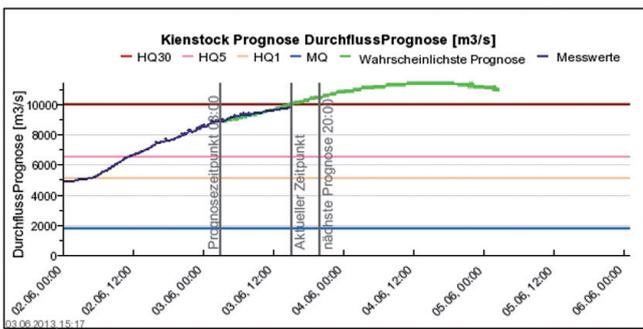


Abbildung 5
 Publiizierte Prognose des Abflusses am Pegel Kienstock erstellt am 3. Juni 2013 um 3 Uhr (grün: Prognose, blau: Messung). Eine Prognose von maximal 11.400 m³/s gegenüber dem tatsächlich aufgetretenen Wert von ca. 11.200 m³/s entspricht einem Unterschied von nur 2 % bei einer Prognosefrist von 48 Stunden; aus: www.noel.gv.at
Published runoff forecast at the gauge Kienstock on 3 June 2013 at 03:00 (green: forecast, blue: observation). The forecast of a maximum of 11,400 m³/s vis-avis the observation of about 11,200 m³/s represents a deviation of only 2 % with a forecasting lead time of 48 hours; from: www.noel.gv.at

2 Ensembleprognosen und Prognosegüte

Ensembleprognosen sind ein Thema, das die Hydrologie und die Vorhersagezentren zunehmend beschäftigt. Die Idee dabei ist, dass mittels atmosphärischer Modelle Prognosen mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen erstellt werden, die eine Anzahl möglicher Niederschlagsfelder ergeben. Diese werden als Eingangsdaten in die Abflussmodelle herangezogen und führen zur gleichen Anzahl möglicher Abflussprognosen an jeder Vor-

hersagestelle. Die Prognosen sollen die Bandbreite zukünftiger Durchflüsse für jeden Prognosezeitpunkt ausweisen. Abbildung 6 zeigt ein Beispiel der Ensemblevorhersagen für den Pegel Zwettl am Kamp. Der Anstieg wird in diesem Beispiel bis zu einer Prognosefrist von 6 Stunden gut erfasst. Das ist der Bereich, der im Wesentlichen von den beobachteten Niederschlägen beeinflusst wird. Für eine Prognosefrist größer als 6 Stunden unterschätzt die deterministische Prognose die Beobachtung in diesem Fall, einzelne Ensemblemitglieder geben aber die beobachtete Abflusswelle über die gesamte Prognosefrist gut wieder. Der Streubereich weitet sich erst ab einer Prognosefrist von 6 Stunden auf, da dann die Ensembleprognosen des Niederschlags zum Tragen kommen.

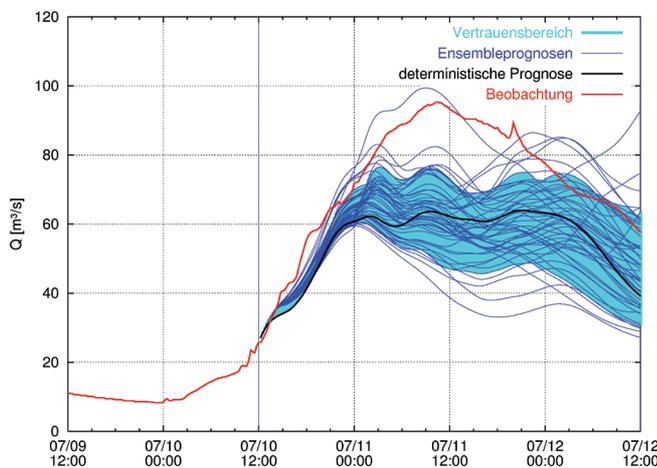


Abbildung 6
 Ensemblevorhersagen des Abflusses am 10. Juli 2005 um 12 Uhr für den Pegel Zwettl am Kamp (622 km²); aus BLÖSCHL et al. (2007)
 Ensemble forecasts of runoff on 10 July 2005 at 12:00 for the gauge Zwettl on the River Kamp (622 km²); from BLÖSCHL et al. (2007)

Ensemblevorhersagen stellen primär einen Indikator der Unsicherheit dar. Es ist aber auch von Interesse, damit die Wahrscheinlichkeit der einzelnen Ensemblerealisationen zu interpretieren. Dafür ist es notwendig, Auswertungen der Prognosefehler durchzuführen. Ein Beispiel solcher Auswertungen ist in Abbildung 7 für 43 Donauzubringer in Bayern und Österreich dargestellt. Zur Analyse der Hochwassersituationen wurden für die Auswertungen solche Prognosezeitpunkte ausgewählt, bei denen der Streubereich der Ensembles zu den größten 10 % zählte. Abbildung 7a zeigt die gesamten Prognosefehler, Abbildung 7b den Anteil des Fehlers, der auf das hydrologische Modell (unter Verwendung beobachteter Niederschläge) und Abbildung 7c den Anteil des Fehlers, der auf die Niederschlagsprognose zurückzuführen ist. Alle Fehlerkomponenten nehmen mit der Einzugsgebietsfläche ab. Während der Fehleranteil der Niederschlagsprognose stark mit der Vorhersagefrist zunimmt, ist der Fehleranteil des hydrologischen Modells fast unabhängig von der Vorhersagefrist. Generell ist zu erkennen, dass der Fehleranteil der Niederschlagsprognose deutlich größer als der des hydrologischen Modells ist. Es ist deshalb für die Hochwasserprognose nahe liegend, vor allem die Unsicherheit der Niederschlagsprognose für die Ensembleprognosen heranzuziehen, wie das auch für die Prognosen an der österreichischen Donau erfolgt. Sind allerdings Prognosen für mittlere Wasserstände und insbesondere Niedrigwasser gefordert, wird der Anteil des Fehlers des hydrologischen Modells größer. Im Extremfall einer Auslauflinie zufolge langer Trockenheit kommt ausschließlich der Fehler des hydrologischen Modells zum Tragen. Für solche Situationen muss dann die Unsicherheit der Niederschlagsprognose mit der Unsicherheit des hydrologischen Modells kombiniert werden (z.B. KRZYSZTOFOWICZ & KELLY 2000).

Für die gleichen Auswertungen wie in Abbildung 7 wurden in Abbildung 8 der gesamte Prognosefehler sowie der Fehler zufolge der Niederschlagsprognose dem prognostizierten Streubereich der Ensembleprognose gegenübergestellt. Die Punkte liegen nahe der 1:1 Linie. Das bedeutet, dass für alle Einzugsgebiete der gesamte Prognosefehler in etwa der Streubreite des Ensembles entspricht. Für kleine Gebiete überschätzt die Streubreite des Ensembles die Fehler. Die Fehler infolge der Niederschlagsprognose alleine (Abb. 8b) liegen tendenziell etwas niedriger, obwohl der Unterschied nicht groß ist. Derartige Auswertungen können verwendet werden, um den Ensembleprognosen Wahrscheinlichkeiten zuzuweisen.

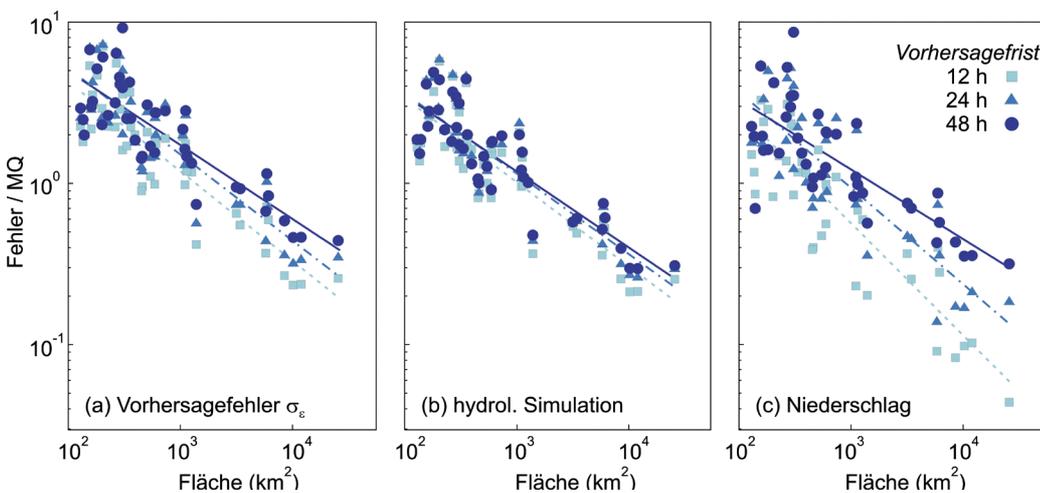


Abbildung 7
 Komponenten der Prognosefehler des Abflusses für 43 Donauzubringer in Bayern und Österreich, Zeitraum 2003–2009. (a) Gesamter Prognosefehler, (b) Fehler zufolge der hydrologischen Simulationen (einschließlich Niederschlagsmessung und Interpolation), (c) Fehler zufolge der Niederschlagsprognose. Fehlerstandardabweichung skaliert mit dem mittleren Abfluss MQ für Prognosezeitpunkte, bei denen der Streubereich der Ensembles zu den größten 10 % zählte (potenzielle Hochwassersituationen); aus NESTER et al. (2012a)
 Components of the runoff forecast errors of 43 tributaries to the Danube in Bavaria and Austria, period 2003–2009. (a) Total forecast errors, (b) hydrological simulation errors (including precipitation measurements and interpolation), (c) precipitation forecast errors. Error standard deviations scaled by mean runoff MQ for those points in time when the ensemble spread was among the top 10 % values (potential flood situations); from NESTER et al. (2012a)

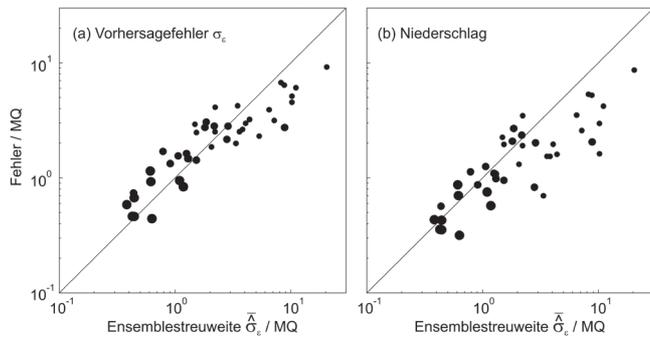


Abbildung 8

Prognosefehler des Abflusses für 43 Donauzubringer in Bayern und Österreich wie in Abbildung 7 aufgetragen gegen den prognostizierten Streubereich der Ensembleprognosen, skaliert mit dem mittleren Abfluss MQ. Prognosefrist ist 48 h. Größe der Kreise gibt die Einzugsgebietsfläche an; aus NESTER et al. (2012a)
Runoff forecast errors of 43 tributaries to the Danube in Bavaria and Austria as in Fig. 7 plotted against predicted ensemble spread, scaled by mean runoff MQ. Forecast lead time is 48 hrs. The size of the circles indicates the catchment size; from NESTER et al. (2012a)

3 Assimilation von hydrologischen Daten in die Modelle

Zur Verbesserung der Hochwasserprognosen an der österreichischen Donau gegenüber reinen Simulationen werden beobachtete Abflussdaten in Echtzeit zur Nachführung des Modells herangezogen, d.h. die Abflussdaten werden in das Modellsystem assimiliert. Der wahre Gebietsniederschlag ist immer unbekannt, und deshalb verbleibt durch die räumliche Interpolation in Verbindung mit der Nichtlinearität in der Abflussbildung eine gewisse unvermeidbare Unschärfe (KOMMA et al. 2007), die mit dem Assimilieren von Abflussdaten reduziert werden soll. Dabei wird der Bodenfeuchtezustand des Gebietes aus dem aktuell beobachteten Abfluss mit Hilfe eines Ensemble Kalman Filters (EnKF) geschätzt. Der EnKF ist auch für nicht-lineare Systeme wie für das hier verwendete Abfluss-Modell (Soil Moisture Accounting Scheme, RESZLER et al. 2006, 2008), geeignet. Zur Implementierung des EnKF für Hochwasserprognosen an der österreichischen Donau wurde die Varianz der Modellfehler konstant angenommen und die Varianz der Beobachtungsfehler proportional zum Quadrat des Abflusses. Zusätzlich wird ein Datenfilter verwendet, um grobe Datenfehler auszuschneiden.

Die Fehlerauswertungen zeigen, dass das Assimilieren von Abflussdaten die mittleren Prognosefehler für alle Gebiete wesentlich reduziert. Für Hochwasserprognosen sind jedoch vor allem Einzelereignisse von Interesse, es kommt also darauf an, ob die Ereignisse selbst verbessert werden. Eine Auswertung für einen nördlichen Donauzubringer in Österreich ist in Abbildung 9 dargestellt. Dabei wurden einerseits sechs große Ereignisse ausgewertet (links), andererseits nur die Anstiege dieser Ereignisse (rechts). Auch für Einzelereignisse reduziert die Nachführung die Fehler, wie aus der Abbildung zu erkennen ist. Für eine Vorhersagefrist von z.B. 3 Stunden werden die Fehler von 20 auf 12 % reduziert (Gesamtereignisse) bzw. von 33 auf 15 % (Anstiege). Der Gewinn der Nachführung nimmt allerdings mit zunehmender Vorhersagefrist ab. Zum Zeitpunkt der Vorhersage erfasst der zu diesem Zeitpunkt beobachtete Abfluss einen Teil der Pro-

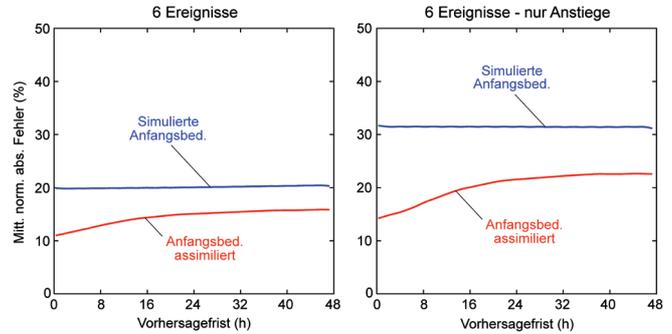


Abbildung 9

Assimilieren von Abflussdaten mit dem EnKF: Vorhersagefehler (mittlere normierte absolute Fehler) des Abflusses für die sechs größten Ereignisse im Zeitraum 2002 bis 2006 unter der Annahme, dass die zukünftigen Niederschläge aus Stationsmessungen bekannt sind. Pegel Zwettl am Kamp (622 km²). Links: Gesamtereignisse, Rechts: nur Anstiege; aus KOMMA et al. (2008)
Assimilating runoff data with the Ensemble Kalman Filter (EnKF): Runoff forecast errors (mean normalised absolute error) of the six largest flood events in the period 2002–2006, assuming future precipitation is known from station data. Gauge Zwettl on the River Kamp (622 km²). Left: the entire events; Right: rising limbs only; from KOMMA et al. (2008)

zessdynamik, die sich über die folgenden Stunden fortsetzt. Die Prozessdynamik verändert sich mit der Zeit, und deshalb verringert sich der Einfluss der Nachführung, ein gewisser Effekt bleibt aber auch über 48 Stunden bestehen. Es sind demnach nicht nur die schnellen Komponenten, die zur Vorhersagegüte beitragen. Zu erkennen ist in Abbildung 9 auch, dass die Fehler im Anstieg deutlich größer sind als die des Gesamtereignisses, was vor allem mit den Niederschlagsfehlern zusammenhängt. Das entspricht der grundsätzlichen Beobachtung, dass Anstiege der Ereignisse schwieriger vorherzusagen sind als der Auslauf, die ersteren sind jedoch aus der Sicht des Katastrophenmanagements wichtiger.

Das operationelle Prognosesystem an der österreichischen Donau assimiliert derzeit nur Abflussdaten. Zur zusätzlichen Verbesserung der Hochwasserprognosen derartiger Systeme könnten weitere Daten in das Prognosesystem assimiliert werden, insbesondere Bodenfeuchte und Schneebedeckungsdaten. Im Folgenden wird das Potenzial dieser zusätzlichen Datentypen ausgelotet.

Wegen der Größe des Einzugsgebietes kommen für die Bodenfeuchte vor allem Satellitendaten in Frage. Sensoren sind z.B. das ERS-Scatterometer und ASCAT (HASENAUER et al. 2009, PARAJKA et al. 2006, WAGNER et al. 2007, 2013). PARAJKA et al. (2009b) verwendeten ERS-Scatterometerdaten zur Bestimmung von Parametern eines hydrologischen Modells, das, ähnlich wie das Niederschlag-Abflussmodell der Donauprognosen, die Bodenfeuchte bilanziert. Sie erweiterten das Modell, um die Bodenfeuchte in der dünnen, obersten Bodenschicht abzubilden und führten die Bodenfeuchtedaten, zusätzlich zu den Abflussdaten, in die Zielfunktion zur Optimierung der Parameter ein. Ein Beispiel für Abflusssimulationen mit dem Modell für die zwei Fälle mit und ohne Verwendung der Bodenfeuchtedaten zeigt Abbildung 10. In diesem Fall verändern die Bodenfeuchtedaten die Simulation nur geringfügig. Der Wert der Bodenfeuchtedaten für die Abflusssimulationen hängt mit der "Signal-to-noise ratio" dieser Daten zusammen, d.h. wie viel Information in ihnen steckt im Vergleich zum zufälligen Fehleranteil (noise). Gerade in den Alpen kann wegen der ausgeprägten Topographie und der Wald-

bedeckung der Fehleranteil groß sein. In Abbildung 11 sind Auswertungen für 148 Gebiete in Österreich für die beiden Fälle mit und ohne Verwendung der Bodenfeuchtedaten dargestellt. Die Korrelationen von simulierter Bodenfeuchte und Scatterometer-Bodenfeuchte in der oberen Bodenschicht (im Validierungszeitraum) (Abb. 11 unten) werden durch die Bodenfeuchtedaten deutlich verbessert, die Güte der Abflusssimulationen ändert sich jedoch kaum (Abb. 11 oben). Es ist zu erwarten, dass das Modell insgesamt die hydrologischen Prozesse realistischer abbildet. Für die operationellen Prognosen ist der Gewinn aber nicht so klar, da das Modell selbst offensichtlich die Bodenfeuchtedynamik bereits gut beschreibt und kaum Verbesserungen darüber hinaus von den Satellitendaten erzielt werden. Diese Aussage gilt für die gute hydrologische Datenlage in Österreich. Bei schlechter Datenlage ist eine Verbesserung durch Satellitendaten zu erwarten (BLÖSCHL 2013a). Für operationelle Hochwasservorhersagen wäre es vermutlich günstiger, den Bodenfeuchtezustand selbst nachzuführen statt die Bodenfeuchtedaten zur Parameterschätzung zu verwenden wie in Abbildung 11. Zu erwähnen ist auch das neue ASCAT (WAGNER et al. 2013), das eine verbesserte "Signal-to-noise ratio" gegenüber den Scatterometerdaten aufweist und deshalb ein besseres Potenzial für die Assimilierung in Hochwasserprognosemodelle besitzt.

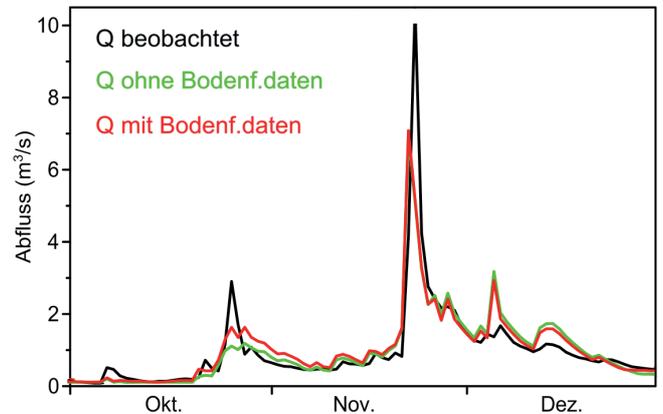


Abbildung 10
Assimilieren von Bodenfeuchtedaten (ERS Scatterometer) für die Bestimmung der Modellparameter im off-line Modus. Pesenbach (69 km²), drei Monate des Jahres 1992. In diesem Beispiel verändern die Bodenfeuchtedaten die Simulation nur geringfügig; nach PARAJKA et al. (2009b) *Assimilating soil moisture data (ERS Scatterometer) for estimating the model parameters in off-line mode. River Pesenbach (69 km²), three months in 1992. In this example, the use of soil moisture data changes the runoff simulation only slightly; after PARAJKA et al. (2009b)*

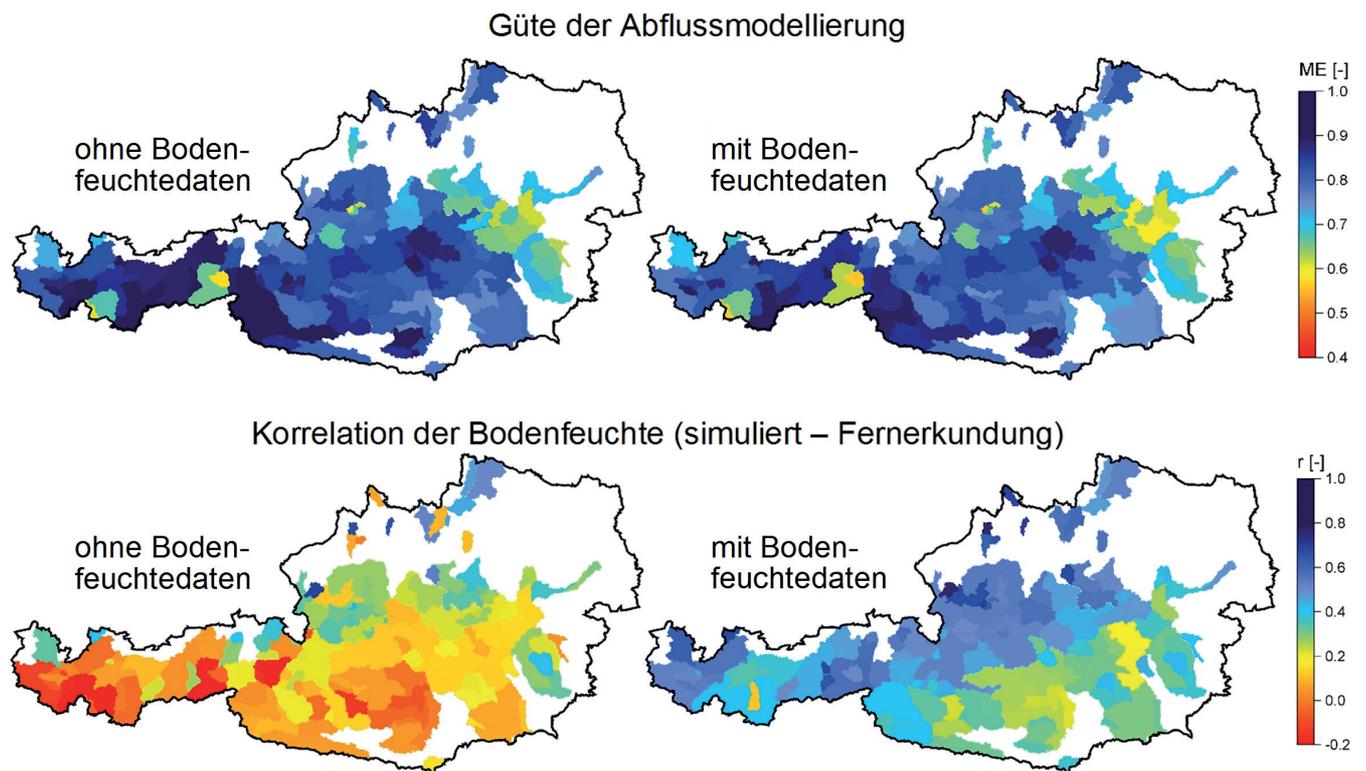


Abbildung 11
Assimilieren von Bodenfeuchtedaten (ERS Scatterometer) für die Bestimmung der Modellparameter im off-line Modus: Oben: Güte des Abflussmodells (Nash-Sutcliffe Effizienz). Unten: Korrelation der simulierten Bodenfeuchte und der Fernerkundungsdaten im Validierungszeitraum 1991–2000. Links: Modellparameter wurden aus Abflussdaten bestimmt. Rechts: Modellparameter wurden aus Abflussdaten und Bodenfeuchtedaten bestimmt; aus PARAJKA et al. (2009b) *Assimilating soil moisture data (ERS Scatterometer) for estimating the parameters in off-line mode: Top: accuracy of the runoff model (Nash-Sutcliffe efficiency). Bottom: correlation between simulated soil moisture and remote sensing data in the validation period 1991–2000. Left: model parameters were estimated from runoff data. Right: model parameters were estimated from runoff data and soil moisture data; from PARAJKA et al. (2009b)*

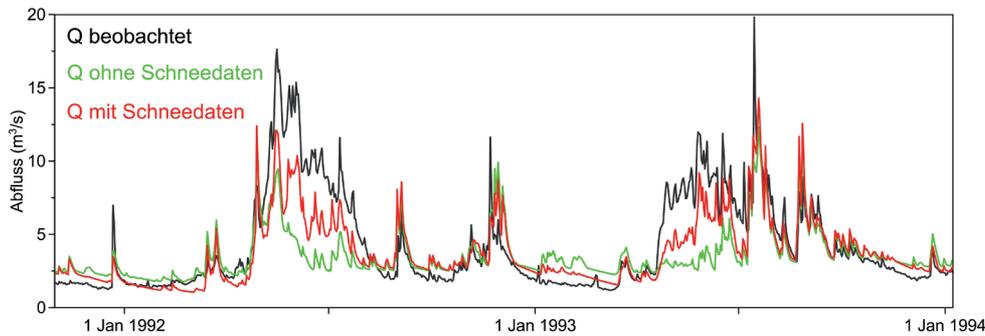


Abbildung 12

Assimilieren von Schneedaten (MODIS) für die Bestimmung der Modellparameter im off-line Modus. Schruns (102 km²), 1992–1993. In diesem Beispiel verbessert die Berücksichtigung von Schneedaten die Abflusssimulation; aus PARAJKA et al. (2009a)

Assimilating snow data (MODIS) for estimating the model parameters in off-line mode. Schruns (102 km²), 1992–1993. In this example, the use of snow cover data improves the runoff simulations; from PARAJKA et al. (2009a)

Auch für Schneesimulationen bieten sich Satellitendaten wegen der Größe des Einzugsgebietes an. Das Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) ist ein besonders attraktiver Sensor für hydrologische Zwecke (PARAJKA & BLÖSCHL 2012). NESTER et al. (2012b) verglichen die Schneesimulationen der operationellen Hochwasserprognosemodelle für die österreichische Donau mit MODIS Daten. Sie zeigten, dass das hydrologische Modell, das nur auf Basis von Niederschlag, Temperatur und Abflussdaten erstellt wurde, insgesamt gute Schneesimulationen im Vergleich zu den MODIS Daten liefert, es aber z.B. in den Waldgebieten des Voralpenraums zu einer Unterschätzung der Schneebedeckung kommen kann. Dementsprechend könnten MODIS Schneedaten die Hochwasserprognosen verbessern. Ein Beispiel für Abflusssimulationen mit dem Modell für die zwei Fälle mit und ohne Verwendung der Schneedaten zeigt Abbildung 12. In diesem Fall liegt die simulierte Abflussganglinie mit Schneebedeckungsdaten näher bei der Beobachtung. Ähnliche Auswertungen wie in Abbildung 11 für den Schnee (PARAJKA et al. 2007, PARAJKA & BLÖSCHL 2008b) zeigen für die gleichen Einzugsgebiete im Mittel zwar auch kaum Verbesserungen, doch ist – zumindest in Mitteleuropa – die Situation bei Schnee aus verschiedenen Gründen anders als bei der Bodenfeuchte:

- Eine große Schwierigkeit bei der operationellen Schneesimulation sind die (on-line übertragenen) Niederschlagsmessungen, die für Schnee i.A. wesentlich ungenauer als für Regen sind und deshalb zu großen Abweichungen im simulierten Wasseräquivalent führen können. Dementsprechend ist die größte Verbesserung durch Fernerkundungsdaten bei der Modellierung in Gebieten mit geringer Stationsdichte zu erwarten (BLÖSCHL et al. 2013).
- Oft kommt es bei Schnee auf Einzelsituationen und nicht auf das mittlere Verhalten an. Beim Hochwasser 2006 an der March trat unerwartet hohe Schneeschmelze wegen einer Regen-auf-Schnee Situation auf.
- Schließlich ist für die Schneebedeckung eine deutlich bessere "Signal-to-noise ratio" als für die Bodenfeuchte zu erwarten (DOUBKOVÁ et al. 2012, PARAJKA et al. 2012, PARAJKA & BLÖSCHL 2006, 2008a).

Für den Alpenraum wurden MODIS Daten in mehreren Studien mit Bodenmessungen der Schneehöhe verglichen (z.B. PARAJKA & BLÖSCHL 2006, 2008a). Die Genauigkeit wurde definiert als Verhältnis der korrekt identifizierten Stationstage zur Gesamtanzahl

der Stationstage für Tage ohne Wolken. Eine Genauigkeit von 90 % bedeutet beispielsweise, dass im Durchschnitt in Österreich an 90 % der Tage die Schneebedeckung (schneebedeckt bzw. aper) durch MODIS korrekt identifiziert wurde. Die Auswertungen in Abbildung 13 zeigen insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung. Im Januar ist die Genauigkeit der beiden Satelliten Aqua bzw. Terra 89 % bzw. 87 %. Im Oktober liegt die Genauigkeit bei 98 %. Ein Teil der Daten von MODIS ist durch Wolken verdeckt, und es wurden verschiedene Algorithmen zur Reduktion

der Wolkenverdeckung entwickelt (PARAJKA et al. 2008a). Für das Assimilieren in Hochwasserprognosemodelle ist aber eine Reduktion der Wolkenverdeckung nicht erforderlich, da auch unvollständige Daten, d.h. nur die Pixel, die nicht bewölkt sind, für die Assimilation herangezogen werden können.

Schneefinformationen aus Satellitendaten lassen deshalb eine deutliche Verbesserung von Hochwasserprognosen für solche Situationen erwarten, bei denen Schnee eine wesentliche Rolle spielt. MODIS Daten sind für die operationellen Anwendungen attraktiv wegen der geeigneten Auflösung (0,5 km Pixelgröße; 1–2 Bilder pro Tag), guter Genauigkeit, Verfügbarkeit innerhalb von 2 Tagen und der geringen Kosten (PARAJKA et al. 2009a).

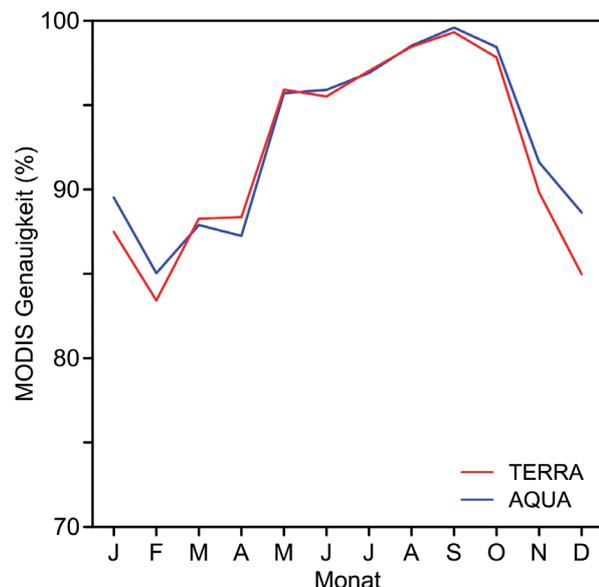


Abbildung 13

Genauigkeit der MODIS Schneeklassifizierung (schneebedeckt bzw. aper) im Vergleich zu Messungen der Schneehöhe an 754 Stationen in Österreich für Tage ohne Wolken. Rote Linien stellen die Terra Daten dar, blaue Linien die Aqua Daten; nach PARAJKA & BLÖSCHL (2008a) *Accuracy of the MODIS snow classification (snow covered or snow free) compared with measurements of snow depths at 754 stations in Austria on days without clouds. The red line shows Terra data, blue line Aqua data; after PARAJKA & BLÖSCHL (2008a)*

4 Fazit

Das Hochwasser im Juni 2013 war an der österreichischen Donau ein außergewöhnlich großes Ereignis, bei dem die hohe Vorbefeuuchtung eine wichtige Rolle spielte. Die operationellen Hochwasserprognosen der maximalen Wasserstände waren i.A. genau, der Scheitel wurde allerdings deutlich zu früh erwartet. Aus praktischer Sicht ist der Datensicherheit ein großes Gewicht beizumessen, die durch eine redundante Auslegung des Systems erhöht werden kann. Ensembleprognosen werden erstellt und liefern eine wichtige Zusatzinformation über die Prognoseunsicherheiten, die bei der Einsatzplanung helfen kann. Zur Einschätzung der Wahrscheinlichkeiten der Ensemblerealisationen der Vorhersagen ist es erforderlich, diese mit Auswertungen der Prognosefehler des Abflusses zu vergleichen. Zumindest für die Analyse ist zu empfehlen, dass die Prognoseunsicherheiten getrennt nach ihren Ursachen ausgewiesen werden (hydrologisches Modell, Niederschlagsprognose).

Verschiedene Möglichkeiten der Verbesserung der Hochwasserprognosen durch Assimilieren von hydrologischen Daten in Echtzeit wurden diskutiert. Assimilieren von Abflussdaten wird an der österreichischen Donau wie auch in vielen anderen operationellen Prognosemodellen durchgeführt und hat sich bewährt. Bezüglich Assimilieren von Bodenfeuchte aus Fernerkundungsdaten besteht noch Forschungsbedarf. Das Assimilieren der Schneebedeckung aus Fernerkundungsdaten hingegen wird für Vorhersagesituationen wie im österreichischen Donauebiet als attraktive Möglichkeit gesehen, die Prognosen in Zukunft weiter zu verbessern.

Conclusions

The June 2013 flood on the Austrian Danube was an extraordinary event in which the high antecedent soil moisture played an important role. The operational flood forecasts of the maximum water levels were generally accurate, but the peaks were predicted to occur too early. From a practical perspective, great importance needs to be attached to data reliability which can be enhanced by redundant system design. Ensemble forecasts are conducted by a number of forecast centres, and they may provide important information about forecast uncertainties to assist in flood management planning. For assessing the probabilities of the ensemble relations of the forecasts, analyses of the forecast errors are essential. It is suggested to identify the error sources of the forecast uncertainties (hydrological model, precipitation forecasts) when analysing the forecast errors.

Several options for improving flood forecasts through assimilating hydrological data in real time are discussed. Runoff-data assimilation has already been practiced on the Austrian Danube like in many other operational forecast models, and the benefits have been proven. Regarding assimilating soil moisture information from remote sensing data, more research is needed. The assimilation of snow cover data from remote sensing data in regions like the Austrian Danube catchment is considered an attractive way of further improving the forecasts.

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. Die Untersuchung wurde durch das ERC (Advanced Grant on Flood Change) und den FWF (P 23723-N21) gefördert. Die Abflussdaten des Hochwassers 2013 sind vorläufig.

Anschrift der Verfasser:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. G. Blöschl
Dipl.-Ing. Dr. T. Nester
Mag. Dr. J. Parajka
Dipl.-Ing. Dr. J. Komma
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13, 1040 Wien
bloeschl@hydro.tuwien.ac.at

Literaturverzeichnis

- BFG (2013): Das Juni-Hochwasser des Jahres 2013 in Deutschland. – BfG Bericht Nr. 1793, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- BLÖSCHL, G. (2008): Flood warning – on the value of local information. – *International Journal of River Basin Management* 6 (1), 41–50
- BLÖSCHL, G., A. VIGLIONE, R. MERZ, J. PARAJKA, J. SALINAS & W. SCHÖNER (2011): Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasser und Niederwasser. – *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 63 (1–2), 21–30
- BLÖSCHL, G., C. RESZLER & J. KOMMA (2008a): A spatially distributed flash flood forecasting model. – *Environmental Modelling & Software* 23 (4), 464–478
- BLÖSCHL, G., C. RESZLER & J. KOMMA (2007): Operationelle Hochwasservorhersage im Kampgebiet. – *Wasserwirtschaft* 5, 10–15
- BLÖSCHL, G., C. RESZLER & J. KOMMA (2008b): Hydrologische Hochwasservorhersage für den Kamp – Erfahrungen mit den Ereignissen 2006 und 2007. – *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 60 (3–4), a13–a18
- BLÖSCHL, G., M. SIVAPALAN, T. WAGENER, A. VIGLIONE & H.H.G. SAVENIJE (Eds.) (2013a): *Runoff Prediction in Ungauged Basins – Synthesis across Processes, Places and Scales.* – Cambridge University Press, Cambridge, UK, 465 pp.
- BLÖSCHL, G., T. NESTER, J. KOMMA, J. PARAJKA & R.A.P. PERDIGÃO (2013b): The June 2013 flood in the Upper Danube basin, and comparisons with the 2002, 1954 and 1899 floods. – *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 5197–5212
- BLÖSCHL, G., Th. NESTER, J. KOMMA, J. PARAJKA & R.A.P. PERDIGÃO (2013c): Das Juni-Hochwasser 2013 – Analyse und Konsequenzen für das Hochwasserrisikomanagement. – *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift* 158
- DOUBKOVÁ, M., A.I.J.M. VAN DIJK, D. SABEL, W. WAGNER & G. BLÖSCHL (2012): Evaluation of the predicted error of the soil moisture retrieval from C-band SAR by comparison against modelled soil moisture estimates over Australia. – *Remote Sensing of Environment* 120, 188–196; DOI:10.1016/j.rse.2011.09.031
- HASENAUER, S., J. KOMMA, J. PARAJKA, W. WAGNER & G. BLÖSCHL (2009): Bodenfeuchtedaten aus Fernerkundung für hydrologische Anwendungen. – *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 61 (7–8), 117–123

- KOMMA, J., C. RESZLER, G. BLÖSCHL & T. HAIDEN (2007): Ensemble prediction of floods – catchment non-linearity and forecast probabilities. – *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7, 431–444
- KOMMA, J., G. BLÖSCHL & C. RESZLER (2008): Soil moisture updating by Ensemble Kalman Filtering in real-time flood forecasting. – *Journal of Hydrology* 357, 228–242
- KRESSER, W. (1957): Die Hochwässer der Donau. – *Schriftenreihe des österreichischen Wasserwirtschaftsverbandes*, 32/33. – Springer, Wien, 95 S.
- KRZYSZTOFOWICZ, R. & K.S. KELLY (2000): Hydrologic uncertainty processor for probabilistic river stage forecasting. – *Water Resour. Res.* 36, 3265–3277
- NESTER, T., J. KOMMA, A. VIGLIONE & G. BLÖSCHL (2012a): Flood forecast errors and ensemble spread – a case study. – *Water Resources Research* 48, W10502, 19 pp; DOI:10.1029/2011WR011649
- NESTER, T., R. KIRNBAUER, D. GUTKNECHT & G. BLÖSCHL (2011): Climate and catchment controls on the performance of regional flood simulations. – *Journal of Hydrology* 402, 340–356
- NESTER, T., R. KIRNBAUER, J. PARAJKA & G. BLÖSCHL (2012b): Evaluating the snow component of a flood forecasting model. – *Hydrology Research* 43, 762–779
- PARAJKA, J. & G. BLÖSCHL (2008a): Spatio-temporal combination of MODIS images – potential for snow cover mapping. – *Water Resources Research* 44; DOI: 10.1029/2007WR006204
- PARAJKA, J. & G. BLÖSCHL (2008b): The value of MODIS snow cover data in validating and calibrating conceptual hydrologic models. – *Journal of Hydrology* 358 (3–4), 240–258
- PARAJKA, J. & G. BLÖSCHL (2006): Validation of MODIS snow cover images over Austria. – *Hydrology and Earth System Sciences* 10, 679–689
- PARAJKA, J. & G. BLÖSCHL (2012): MODIS-based snow cover products, validation, and hydrologic applications. – In: *Multi-scale Hydrological Remote Sensing: Perspectives and Applications*. – Ed. By N.B. Chang and Y. Hong. – CRC Press, Boca Raton, 185–212
- PARAJKA, J., J. JANSKA & G. BLÖSCHL (2009a): Bestimmung des Schneevorrates in Einzugsgebieten mittels Fernerkundungsmethoden. – *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 61 (7–8), 125–131
- PARAJKA, J., L. HOLKO, Z. KOSTKA & G. BLÖSCHL (2012): MODIS snow cover mapping accuracy in a small mountain catchment – comparison between open and forest sites. – *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 2365–2377
- PARAJKA, J., R. MERZ & G. BLÖSCHL (2007): Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modeling – Case study in 320 Austrian catchments. – *Hydrological Processes* 21, 435–446
- PARAJKA, J., V. NAEIMI, G. BLÖSCHL & J. KOMMA (2009b): Matching ERS scatterometer based soil moisture patterns with simulations of a conceptual dual layer hydrologic model over Austria. – *Hydrology and Earth System Sciences* 13, 259–271
- PARAJKA, J., V. NAEIMI, G. BLÖSCHL, W. WAGNER, R. MERZ & K. SCIPAL (2006): Assimilating scatterometer soil moisture data into conceptual hydrologic models at the regional scale. – *Hydrology and Earth Systems Sciences* 10, 353–368
- RESZLER, C., J. KOMMA, G. BLÖSCHL & D. GUTKNECHT (2006): Ein Ansatz zur Identifikation flächendetaillierter Abflussmodelle für die Hochwasservorhersage. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 50 (5), 220–232
- RESZLER, C., J. KOMMA, G. BLÖSCHL & D. GUTKNECHT (2008): Dominante Prozesse und Ereignistypen zur Plausibilisierung flächendetaillierter Niederschlag-Abflussmodelle. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 52 (3), 120–131
- WAGNER, W., S. HAHN, R. KIDD, T. MELZER, Z. BARTALIS, S. HASENAUER, J. FIGA-SALDANA, P. DE ROSNAY, A. JANN, S. SCHNEIDER, J. KOMMA, G. KUBU, K. BRUGGER, C. AUBRECHT, J. ZUGER, U. GANGKOFNER, S. KIENBERGER, L. BROCCA, Y. WANG, G. BLÖSCHL, J. EITZINGER, K. STEINNOCHER, P. ZEIL & F. RUBEL (2013): The ASCAT soil moisture product: A review of its specifications, validation results, and emerging applications. – *Meteorologische Zeitschrift* 22, 5–33; DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0399
- WAGNER, W., G. BLÖSCHL, P. PAMPALONI, J.-C. CALVET, B. BIZZARRI, J.-P. WIGNERON & Y. KERR (2007): Operational readiness of microwave remote sensing of soil moisture for hydrologic applications. – *Nordic Hydrology* 38 (1), 1–20