

## **Unsicherheiten in hydrologischen Modellen: Über die Notwendigkeit der Einbeziehung von Unsicherheitsquellen in der Qualitätsabschätzung von Modellergebnissen**

*Patrick Matgen & Laurent Pfister, Cellule de Recherche en Environnement et Biotechnologies, Centre de Recherche Public – Gabriel Lippmann, 162a avenue de la Faïencerie, L-1511 Luxembourg, email: matgen@crpgl.lu*

### **1 Einleitung und Problemstellung**

Während des letzten Jahrzehnts hat kaum eine wissenschaftliche Arbeit die Hydrologie so nachhaltig beeinflusst wie Beven und Binley's Aufstellung des Equifinalitäts-Prinzips (Beven & Binley, 1992). Unter diesem Terminus verbirgt sich, dass gleich mehrere Umweltmodelle zu gleichen Simulationen führen und daher in der Lage sind, die gemessenen Werte (Abflüsse, Grundwasserspiegel...etc.) ähnlich zufriedenstellend zu simulieren. Die daraus resultierende mehrdeutige Parameter- und Strukturidentifikation ist eine Folge der Equifinalität. Die Unsicherheiten der Messungen einerseits und die geringen Qualitätsunterschiede der Modellergebnisse andererseits sollten daher nicht zulassen, dass ein einziges Modell, d.h. ein Parameterset und eine Modellstruktur, zur Vorhersage zurückbehalten werden. Angesichts der vielen bekannten potentiellen Fehlerquellen, scheinen die bisher fast ausschliesslich angewandten Optimierungsmethoden obsolet zu werden, obwohl in den letzten Jahren immer leistungsfähigere Optimierungsalgorithmen entwickelt wurden (Kavetski et al., 2002).

Man kann sich gut vorstellen, dass dieses Prinzip, welches den wissenschaftlichen Ansatz eines einzigen korrekten Modells verwirft (Ostrowski, 2003), vor allem in den Kreisen der Naturwissenschaftler und Statistiker erhebliche Kontroversen ausgelöst hat. Die anlässlich der hydrologischen Konferenzen zum Teil heftig geführten Debatten haben erfreulicherweise dazu geführt, dass die offene Frage der Berücksichtigung dieser Unsicherheiten heutzutage nicht mehr aus den hydrologischen Studien wegzudenken ist. Allerdings konnte noch kein Konsens über die angemessenen statistischen Methoden zu deren Abschätzung erreicht werden. Das Spektrum der bisher angewandten Methoden reicht daher von den klassischen Konfidenzintervallen basierend auf der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Modellfehler (Montanari & Brath, 2004), über Kalman Filter (Bras & Rodriguez-Iturbe, 1985), der „Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE)“ Methode (Beven & Binley, 1992) und der Kalibrierung basierend auf mehreren Zielfunktionen und der daraus resultierenden Berücksichtigung mehrerer Parametersets, dem so genannten Pareto set (Gupta et al., 1998).

Die Aufgabe der Wissenschaftler ist es daher, auf die Modellunsicherheiten aufmerksam zu machen, statistische Methoden zu deren Abschätzung weiterzuentwickeln und sich schliesslich auf eine anerkannte Standardmethode zu einigen. Die praktische Umsetzung, zum Beispiel in der Dimensionierung von Hochwasserschutzmassnahmen und der Kartierung von potentiellen Flutflächen in den Bebauungsplänen, wäre dann die Aufgabe von Bauingenieuren, Landesplanern und Juristen.

Anhand von zwei praktischen Anwendungsbeispielen beabsichtigt diese Studie auf die Notwendigkeit der Einbeziehung von Unsicherheitsquellen zur Abschätzung von Modellergebnissen aufmerksam zu machen. Das erste Beispiel stellt die Unsicherheiten in der Errechnung von Dimensionierungsabflüssen, welche mittels Niederschlag-Abfluss-Modellen errechnet wurden, dar. Die zweite Falsstudie handelt von den Unsicherheiten in den Vorhersagen von überfluteten Flächen anhand eines einfachen Überschwemmungsmodells.

## 2 Fehlerquellen in hydrologischen und hydraulischen Modellen

Jeder, der mit Umweltmodellen zu tun hat, ist sich bewusst, dass potentielle Fehlerquellen allgegenwärtig sind und sich im allgemeinen gleich auf mehrere Etappen der Modellierung auswirken. In der Abb. 1 sind diese Unsicherheiten schematisch dargestellt. Man unterscheidet gemeinhin die Unsicherheiten, die sich auf die Messungen beziehen und solche, die aus der vorhin erwähnten Parameter- und Strukturequifinalität hervorgehen. Bei den Messungen muss man unterscheiden zwischen solchen, die als Input für das Modell gelten (z.B. Niederschlagswerte) und denjenigen, die zur Kalibrierung herangezogen werden (z.B. beobachtete Überschwemmungsflächen). Es liegt im Ermessen des Modellierers, diese Fehlerquellen im Vorfeld der eigentlichen Simulation abzuschätzen. Dies geschieht meistens durch eine *a priori* festgelegte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Fehler, kann aber auch durch flexiblere Fuzzy-Logiken erfolgen. Letztere werden in der Regel angewandt, wenn die vorliegenden Messungen es nicht zulassen, auf eine gewisse Wahrscheinlichkeitsverteilung der Fehler zu schliessen. In diesem Falle erlauben Fuzzy-Logiken dem Benutzer seine subjektiven Einschätzungen in Form von unscharfen Mengenabgrenzungen umzusetzen.

Die GLUE-Methode erkennt, dass es in Anbetracht dieser Unsicherheiten nicht möglich ist, ein Modell zu optimieren. Vielmehr befinden sich mehrere Modelle in einem Wettbewerb und die Unsicherheiten der Messungen sowie die **Parameter- und Strukturequifinalität** erlaubt es nicht, sich auf ein einziges Modell festzulegen. Bis zu einem gewissen Grad kann man lediglich zwischen plausiblen und nicht plausiblen Modellen unterscheiden und die schliesslich zurückbehaltenen Modelle unterschiedlich gewichten. Die Simulationsergebnisse aller plausiblen Modelle werden

statistisch ausgewertet und erlauben eine Abschätzung der Modellunsicherheiten. Diese Methode konnte in den letzten Jahren einen grossen Erfolg. Dies wird durch die beeindruckende Liste erfolgreicher Anwendungsbeispiele unterstrichen und hat dazu geführt, dass die GLUE Methode als „alternative Blaupause“ für Umweltmodellierungen empfohlen wurde (Beven, 2001). Es mangelt der Methode allerdings an der notwendigen statistischen Genauigkeit, um die Herausforderungen, die mit den Fehlerstrukturen aus Abb. 1 einhergehen, auch für Statistiker zufriedenstellend zu lösen.

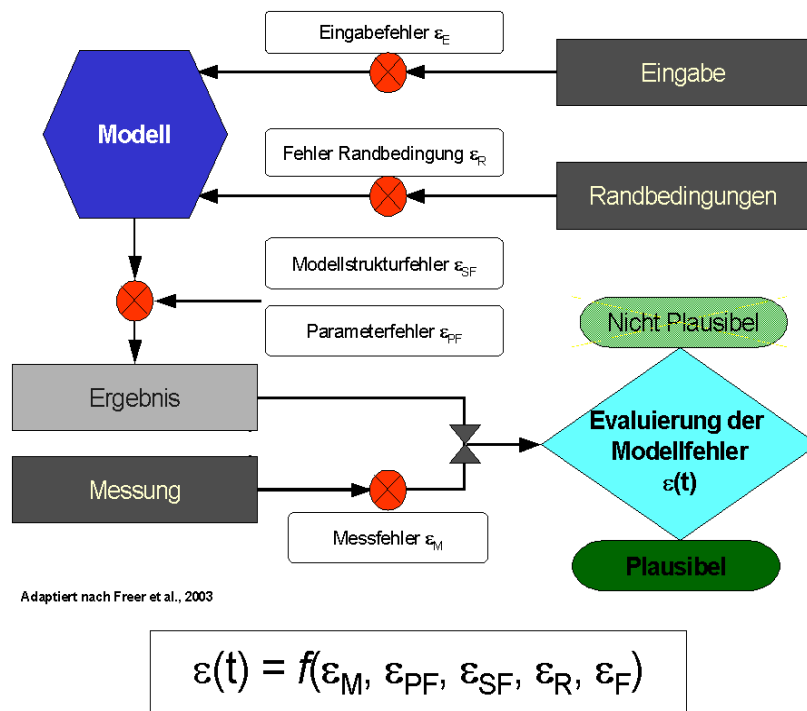


Abb. 1: Schematische Darstellung der Fehlerquellen in Umweltmodellen

Trotzdem hat sich GLUE zu einer anerkannten Methode zur Modellabschätzung entwickelt, deren Einfachheit grundlegend zu Ihrem Erfolg beigetragen hat. Ähnliche Beispiele von Methoden, die sich trotz einzelner Mängel zu Standards entwickelt haben, gibt es in der Hydrologie mehrere (Manning Gleichung, Muskingum Methode... usw.). Je nach Anwendung und je nach Modell unterscheiden sich natürlich die einzelnen Unsicherheitsquellen und deren Gewichtung. Es ist bekannt, dass die **räumliche Verteilung des Niederschlags** eine wichtige Unsicherheitsquelle in Niederschlag-Abfluss Modellen darstellt. Diese Unsicherheit ist allerdings sehr schwer abzuschätzen, vor allem bei Messnetzen von geringer Dichte. Einfacher ist es hingegen, die **Unsicherheiten der Abflusskurven** einzubeziehen. Dazu wird im allgemeinen eine Kurvenanpassung (z.B. gemäss Manninggleichung) durch die gleichzeitig erhaltenen Messpunkte von Wasserhöhe und Abfluss durchgeführt. Falls die Verteilung der Fehler es zulässt, kann daraufhin eine Wahrscheinlichkeitsverteilung aufgestellt werden und dementsprechend ein Konfidenzintervall errechnet werden. Dies ist allerdings nur in Ausnahmefällen möglich, da sich die verfügbaren Messungen zu-

meist ungleich auf der Abflusskurve verteilen und die Geometrie des Flussbetts meist unregelmässig ist. Da zudem die Messungen selbst mit Unsicherheiten belastet sind, ist es empfehlenswert, weiterführende statistische Verfahren zu verwenden. Zu den letzteren kann man zum Beispiel die Markovsche Ketten Methode oder einfachere Monte Carlo Verfahren zählen (Smith et al., 2004; Pappenberger et al, 2004). Die Unsicherheiten sind natürlich umso grösser, je weniger Messpunkte (vor allem bei Hochwasser) verfügbar sind. Abb. 2 verdeutlicht durch ein einfaches Monte Carlo Experiment von plausiblen Anpassungskurven durch die verfügbaren Messpunkte unter Einbeziehung von deren Unsicherheiten, inwiefern eine Reduzierung der Unsicherheiten möglich ist durch die Verfügbarkeit von zusätzlichen Messpunkten bei Hochwasser.

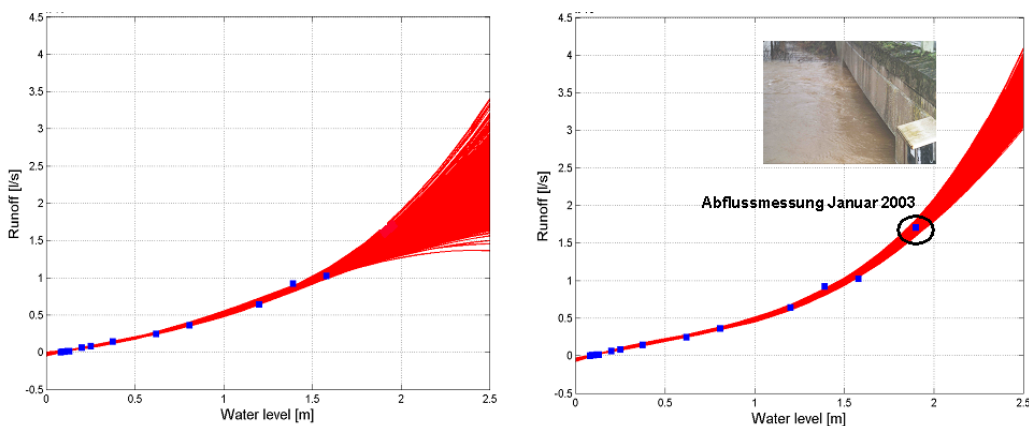


Abb. 2: Unsicherheiten in der Abflussableitung mittels Abflusskurven

Die von den Abflusskurven abgeleiteten Durchflüsse werden in N-A Simulationen zur Kalibrierung benutzt während sie in hydraulischen Überschwemmungsmodellen als Eingabe benutzt werden. Der entsprechende Effekt ist natürlich nicht derselbe. Fehlerhafte Eingaben können oftmals nicht von Modellparametern kompensiert werden während fehlerhafte Referenzdaten, die zur Kalibrierung benutzt werden oft zu einer fehlerhaften systematischen Verzerrung der Vorhersagen führen. In hydraulischen Modellen werden entweder **gemessene Wasserhöhen oder beobachtete 2D Flutausdehnungen** (Luft- oder Satellitenaufnahme) zur Kalibrierung benutzt. Die Verlässlichkeit und Präzision dieser Daten ist natürlich keineswegs vergleichbar. In den Überschwemmungsmodellen ist ausserdem das **geometrische Modell** der potentiellen Flutfläche eine häufig vorkommende Fehlerquelle. Die Mikrotopographie (Strassen, Deiche, Schutzmauern) wird oft unzureichend berücksichtigt und kann zu grossen, jedoch zumeist lokalen, Simulationsfehlern führen. Erwähnenswert sind natürlich auch **Vereinfachungen der differentialen Gleichungen**, die oftmals vorgenommen werden, um die Modellrechnungen zu beschleunigen. Vergleichsstudien haben jedoch mehrmals darauf hingewiesen, dass einfache konzeptuelle Modelle durchaus in der Lage sind, ähnlich gute Resultate wie komplizierte physikalische Modelle zu erbringen (siehe z.B. Horritt et al., 2002). Ausserdem ist oft festzustellen,

dass je nach gewählter Zielfunktion die kalibrierten Parameter variieren können. Da die Anforderungen je nach Anwendung sehr verschieden sein können, ist die Wahl einer angemessenen Zielfunktion daher von grosser Bedeutung. Leider ist die interne Konsistenz der vorhandenen Modelle unzureichend damit ein einziger Parameterset optimale Simulationsergebnisse unabhängig von der davor gewählten Zielfunktion ergibt. Je nach Anwendung sind Kompromisse in der Praxis also oft unvermeidbar. Bevor ein Modell kalibriert wird, sind also eine Menge wichtiger Vorentscheidungen und Analysen durchzuführen. Die Vorhersagen der Modelle, seien es nun Abflüsse, Wasserhöhen oder Flutausdehnungen, stehen in engem Zusammenhang zu den vorhandenen Daten einerseits und den Prioritäten des Modellierers andererseits.

### 3 Fallbeispiel 1: Vorhersage von Dimensionierungsabflüssen

Fallstudie 1 handelt von der Errechnung von Wiederkehrzeiten von Abflüssen. Letztere werden unter anderem zur Dimensionierung von Hochwasserschutzmassnahmen benötigt. Bei diesen Bauwerken überschreitet die Wiederkehrzeit der zur Dimensionierung zugrunde liegenden erwünschten Effizienz oftmals die Länge der vorhandenen hydrometrischen Datenreihen. Extreme Hochwasserereignisse sind zudem nur selten in den vorhandenen historischen Datenreihen dokumentiert worden. Extrapolationen sind deshalb in der Regel unvermeidbar, auch wenn sie von einem rein statistischen Gesichtspunkt aus gesehen unbedingt vermieden werden sollten. Nolens volens muss aber in der Praxis auf diese Techniken zurückgegriffen werden. Dies geschieht entweder durch die Frequenzanalyse simulierter langjähriger Abflusszeitreihen oder durch die Abflusssimulation mittels Entwurfsregen, welche der geschätzten Regenmenge, die dem Entwurfshochwasser zugrunde gelegt wird, entspricht. Die Anwendung der GLUE Methode zur Errechnung der Unsicherheiten, die mit der Erstellung von solchen Entwurfshochwassern einhergeht, wurden in der Vergangenheit oftmals scharf kritisiert. Vor allem das Prinzip der Equifinalität von Modellen ist anfechtbar bei Extrapolationen (Ostrowski, 2003). Modelle, die im Vergleich zu beobachteten Abflüssen ähnlich zufriedenstellend abgeschnitten haben, können nämlich je nach Struktur extreme Ereignisse sehr unterschiedlich simulieren. Die Autoren vertreten die Meinung, dass so lange die Parameterauswahl und die Modellstruktur physikalisch plausibel sind (auch bei extremen Ereignissen) und die notwendigen Beobachtungen zu einer weitergehenden Unterscheidung zwischen plausiblen und

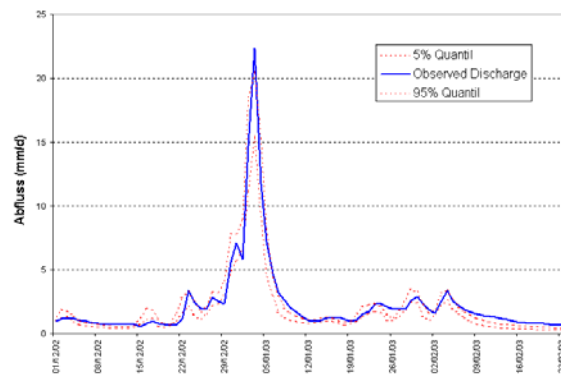


Abb. 3: Simulierte und beobachtete Abflussganglinie des Januar 2003 Hochwassers

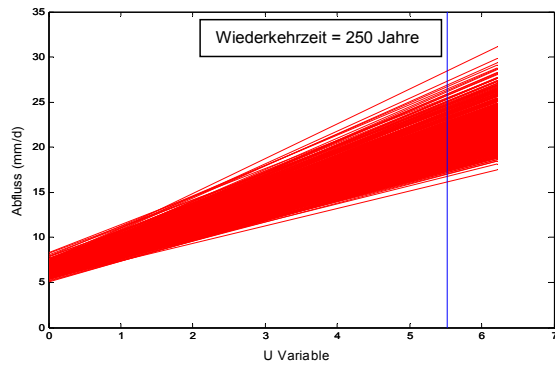


Abb. 4: Errechnung des Dimensionierungsabflusses nach Häufigkeitsanalyse aller plausiblen Modellergebnisse

nicht plausiblen Modellen fehlen, man alle Modelle berücksichtigen sollte, um anhand der GLUE Methode zumindest einen Eindruck über die Unsicherheiten bei Vorhersagen von extremen Ereignissen zu erhalten.

Dies soll in dieser Fallstudie veranschaulicht werden, indem der 250 jährige Dimensionierungsabfluss des Flusses Sauer (Grösse des Einzugsgebiets = 4280 km<sup>2</sup>) mittels NA-Simulation errechnet wird. Hierzu wurde ein konzeptuelles Modell verwendet, welches einer an das Sauer-Einzugsgebiet adaptierten Version des HBV Modells entspricht (Bergström et al., 1995). Das Modell wurde zunächst anhand von im Zeitintervall 1996-2004 gleichzeitig vorhandenen Niederschlag- und Abflussmessungen kalibriert. Die Modellsimulationen können als zufriedenstellend eingeschätzt werden, wie es das Anschauungsbeispiel des Januar 2003 Hochwassers überzeugend darstellt (Abb. 3). Die plausiblen Modelle (Nash-Kriterium > 0.8 und Bias < 100 mm) wurden anschliessend mit Niederschlagswerten von 1966-2004 gespeist. In der Praxis sind kurze Datenreihen von Abflussmessungen oft die Regel und somit Simulationen mit längeren Datenreihen von Niederschlagsmessungen die beste Methode, um Dimensionierungsabflüsse zu errechnen. Die maximalen Jahreswerte jeder Modellsimulation wurden schliesslich einer Frequenzanalyse (Gumbel-Häufigkeitsverteilung) unterzogen. Die resultierende Streuung der Resultate dieser Frequenzanalyse sind in Abb. 4 angegeben. Nimmt man nun die verschiedenen Modellresultate, die einer Wiederkehrzeit von 250 Jahren entsprechen, und erstellt die Summenhäufigkeitsverteilung (Abb. 5), erhält man die 5% und 95% Quantile des erwünschten Dimensionierungsabfluss. Nachdem der Modellierer die Unsicherheiten seiner Vorhersagen dargestellt hat, liegt es im Ermessen der Entscheidungsträger, den zur Dimensionierung zugrunde liegenden Abfluss zu bestimmen. Grössere Sicherheit wird erreicht, wenn man sich für den 95% Quantil entscheidet. Andere Faktoren, vor allem finanzielle, müssen natürlich ebenfalls berücksichtigt werden.

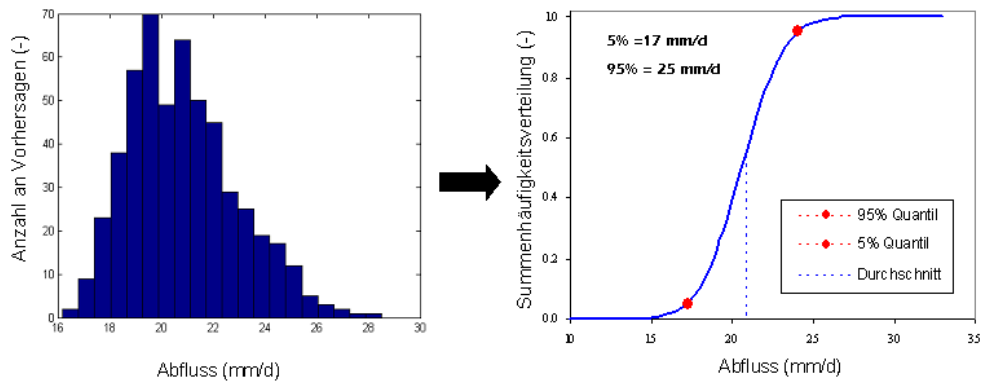


Abb. 5: Statistische Abschätzung der Unsicherheiten von Dimensionierungsabflüssen

#### 4 Fallbeispiel 2: Vorhersage von Überschwemmungsflächen

Die Kartierung von Überschwemmungsflächen in verbindlichen Bebauungsplänen kann für die Anlieger mitunter erhebliche ökonomische Folgen haben. Da jedoch kein hydraulisches Modell in der Lage sein wird, die maximale Ausdehnung der Flut überall metergenau zu simulieren, muss darauf geachtet werden, dass diese Unsicherheiten auf den Gefahrenkarten berücksichtigt werden. Dies ist allerdings bisher nur sehr selten der Fall. In der vorliegenden Fallstudie einer Hochwassersimulation im Einzugsgebiet des Flusses Alzette in Luxemburg wurde der Versuch unternommen, die Unsicherheiten der Modellsimulation anhand der GLUE Methode statistisch auszuwerten. Diese werden auf dem Endprodukt, d.h. der Überschwemmungskarte, explizit angegeben. Für dieses Fallbeispiel wurde ein Streckenabschnitt der Alzette gewählt, in welchem es während des letzten Jahrzehnts gleich mehrmals zu grossflächigen Überschwemmungen gekommen ist. Die Länge des Abschnitts beträgt 10 Kilometer und die Grösse des Einzugsgebietes zu Beginn des Modellabschnitts beläuft sich auf etwa 390 km<sup>2</sup>. Die Nähe zur Hauptstadt Luxemburg hat zudem dazu geführt, dass die Siedlungsfläche im Laufe des letzten Jahrhunderts rasant zugenommen hat. Um das Risiko durch Flutkatastrophen nicht weiter zu steigern, wurde die weitere Besiedlung der überschwemmungsgefährdeten Zone bis auf weiteres gestoppt. Die Delimitation der Gefahrenzone basierte auf Luftaufnahmen, die während der Naturkatastrophe gemacht wurden. Der Nachteil dieser Methode besteht in der Annahme, dass Fluten, die über das bisher Dagewesene hinausgehen, unmöglich sind. Seither wurde der Versuch unternommen, durch Simulationen von Abflüssen und Flutausdehnungen die bestehenden Karten zu aktualisieren und weiterzuentwickeln. Da die neuen Karten auf den Ergebnissen eines einzigen optimierten Modells beruhen, ist die daraus resultierende binäre Klassifikation in gefährdete und nicht gefährdete Gebiete nur mit grosser Vorsicht zu betrachten. Ein neuer Versuch wurde deshalb unternommen, um diese Karten auf den neuesten Stand der Wissenschaft zu bringen, indem die Modellunsicherheiten berücksichtigt wurden.

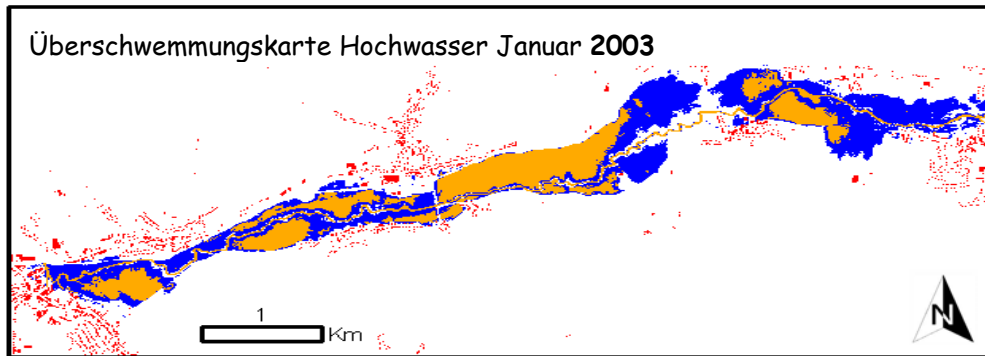


Abb. 6: 5% und 95% Quantile der Simulation der Flutflächen im Modellgebiet für das Januar 2003 Hochwasserereignis.

Das hydraulische Modell, das zu diesem Zweck benutzt wurde, ist das 1D HEC-RAS Modell. Die zu kalibrierenden Modellparameter sind die räumlich variierende Rauigkeiten des Flussbettes und der Flussebene und die Randbedingungen an beiden Enden des Modellabschnittes (Durchfluss, Wasserhöhe, Gefälle). Das Modell wurde anhand mehrerer Referenzdaten kalibriert. Dazu zählen die Vermessungen von beobachteten Wasserhöhen, Flutflächen die anhand von Luft- und Satellitenaufnahmen kartographiert wurden sowie GPS Messungen der maximalen Flutausdehnung. Die Kalibrierung des Modells sowie die Wahl der Zielfunktionen sind detailliert in einer vorherigen Studie beschrieben (Matgen et al., 2004). Die Equifinalität der Modellparameter wurde in dieser Arbeit nachgewiesen. Die Unsicherheiten, die aus der Ableitung des Durchflusses mittels aufgestellter Abflusskurve hervorgehen, wurden in separaten Arbeiten analysiert (Smith et al., 2004, Pappenberger et al., 2004). Daraus ging hervor, dass die Parameter, welche die Abflusskurve mathematisch beschreiben, die Qualität der Modellergebnisse entscheidend beeinflussen. Alle vorher erwähnten Unsicherheitsquellen mit Ausnahme der geometrischen Beschreibung der Flussebene wurden analysiert und haben dazu geführt, dass die Vorhersagen des Modells mittels mehrerer plausibler Parametersets durchgeführt werden. Diese sind natürlich unterschiedlich gewichtet je nach Übereinstimmung zwischen Modellergebnissen und Referenzdaten. Die aus allen berücksichtigten Modellen resultierenden 5% und 95% Quantile der Summenhäufigkeitsverteilung der simulierten Wasserhöhen ergeben für jedes Hochwasser zwei Flutausdehnungen (Abb. 6). Die Validation anhand eines detailliert dokumentierten Hochwasserereignisses im Januar 2003 hat gezeigt, dass fast überall die reale maximale Flutausdehnung sich innerhalb des resultierenden Konfidenzintervalls befindet. Es kommt vor, dass zumeist lokal kein einziges der zurückbehaltenen Modelle die beobachteten Wasserhöhen und/oder Flutausdehnungen zufriedenstellend simuliert und sich daher an dieser Stelle die reale Ausdehnungslinie ausserhalb des Konfidenzintervalls befindet. Es ist zumeist eine falsch dargestellte Mikrotopographie (Consuegra et al., 1999), die solchen Fehlern zugrunde liegt. Falls diese Fehler lokal begrenzt sind und nicht ohne grossen Auf-



wand behoben werden können, kann das Modell dennoch benutzt werden, unter der Voraussetzung natürlich, dass diese Fehlerquellen auf dem Endprodukt, d.h. der Überschwemmungskarte oder Gefahrenkarte, berücksichtigt werden. In dieser Fallstudie wäre es falsch gewesen, die Überschwemmungskarten anhand eines einzigen Modells zu produzieren. Die Parameterequifinalität sowie die Aufstellung der Abflusskurven erwiesen sich in dieser Studie als die bedeutendsten Unsicherheitsquellen. Einzelne Modelle hätten also in der Tat zu einer deutlichen Über- bzw. Unterschätzung der Flutausdehnung geführt.

## **5 Zusammenfassung**

Die Resultate der hier gezeigten Fallstudien belegen, dass die Einbeziehung von Unsicherheiten in der Qualitätsabschätzung von Modellergebnissen von grosser Bedeutung ist. Die Weiterentwicklung von Modellen und Messmethoden sollte in den kommenden Jahren dazu führen, dass diese Unsicherheiten verringert werden. Es ist allerdings nicht davon auszugehen, dass in Zukunft Umweltmodelle entwickelt werden, deren Vorhersagen frei von Fehlern und Unsicherheiten sein werden. Das Vertrauen, das der Modellierer in die von ihm errechneten Ergebnisse setzt, sollte sich also auch in den an den End-Benutzer abgelieferten Resultaten widerspiegeln. Auch wenn es für letzteren schwieriger sein wird, Resultate in Form von Konfidenzintervallen in der Praxis umzusetzen, so sollte doch diese Form der Kommunikation von Modellergebnissen schliesslich dazu führen, dass der End-Benutzer gesteigertes Vertrauen in die an ihn abgelieferten Resultate setzen wird. In der Vergangenheit hat das Abweichen von Modellergebnissen und Beobachtungen in der Tat dazu geführt, dass Umweltmodellen allgemein mit grosser Skepsis entgegengetreten wird. Methoden wie GLUE oder ähnliche, ermöglichen zumindest einen ehrlicheren Umgang mit Modellergebnissen. Sollten sich, wie es zu erwarten ist, in den kommenden Jahren Standardmethoden zur Evaluierung von Modellergebnissen durchsetzen, bleibt es an den End-Benutzern (Landesplaner, Bauingenieure, Juristen, Politiker), für die praktische Umsetzung dieser Erkenntnisse in alltäglichen Problemfällen zu sorgen. In den letzten Jahren hat die Forschung dazu beigetragen, die Unsicherheiten über Unsicherheiten etwas zu reduzieren. Hoffentlich führt das so gewonnene theoretische Wissen in den kommenden Jahren zur Weiterentwicklung von praxisnahen Methoden, die es den Entscheidungsträgern erlauben, mit verbesserter Kenntnis der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Extremereignissen ihre Entscheidungen zu treffen. Die Bedeutung eines derart veränderten Umgangs mit Modellergebnissen geht weit über die hier aufgeführten Beispiele hinaus (Klimawandel, Biotechnologien...usw.).

## 6 Literatur

- Bergström, S. (1995): The HBV model. In Singh, V. P. (editor). *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, 443-476.
- Beven, K. J., Binley, A. (1992): The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6, 279-298.
- Beven, K. J. (2001): How far can we go in distributed hydrological modelling? *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 1-12.
- Bras, R. L., Rodriguez-Iturbe, I. (1985): *Random Functions in Hydrology*. Addison-Wesley Publishing Co.
- Consuegra, D., Schenk, F., Metzger, R., Musy, A. (1999): Cartes d'inondation et exigences en matière de précision altimétrique. *Mensuration, Photogrammétrie, Génie Rural*, 7.
- Freer, J., Beven, K. J., Choi H. T. (2003): The meaning of measurement error in parameter estimation. EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France, April 6-11.
- Gupta. H. V., Sorooshian, S., Yapo, P. O. (1998): Toward improved calibration of hydrological models: Multiple and noncommensurable measure of information. *Water Resources Research*, 34, 751-763.
- Horritt, M. S., Bates, P. D. (2002): Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, 268, 87-99.
- Kavetski, D., Franks, S. W., Kuczera, G. (2002): Confronting input uncertainty in environmental modeling. In Duan, Q., Gupta, H.V., Sorooshian, S., Rousseau, A. N. and Turcotte, R. (editors). *Calibration of Watershed Models*, AGU Water Science and Applications Series, 6, 49-68.
- Matgen, P., Henry J.-B., Pappenberger, F., Pfister, L., de Fraipont, P., Hoffmann, L. (2004): Uncertainty in calibrating distributed roughness coefficients in a flood propagation model with Earth observation data. 20th Congress of ISPRS, Istanbul, Turkey, July 12-23.
- Montanari, A., Brath, A. (2004): A stochastic approach for assessing the uncertainty of rainfall-runoff simulations. *Water Resources Research*, 40, W01106.
- Ostrowski, M. W. (2003): Linearity of hydrological models and related uncertainty. Proceedings of the ESF LESC Exploratory Workshop, Bologna, Italy, October 24-25.
- Pappenberger, F., Matgen, P., Beven, K.J., Henry, J.-B., Pfister, L., de Fraipont, P. (2004): The influence of rating curve uncertainty on flood inundation predictions. 1<sup>st</sup> International Conference on Flood Risk Assessment, Bath, United Kingdom, September 7-8.
- Smith, P., Beven, K. J., Tawn, J., Matgen, P. (2004): Latent Variables in Rainfall-Runoff modelling. EGU 1<sup>st</sup> General Assembly, Nice, France, April 25-30.