

## **Modellbildung und Wirkungsanalyse im Hochwasserschutz**

Karl Broich

### **Kurzfassung**

Die Verwendung numerischer Modelle zur Feststellung des vorhandenen oder geplanten Hochwasserschutzgrades ist anerkannter Stand der Technik. Die bekannten 1d- und 2d-Berechnungsverfahren -eventuell in Kombination mit weiteren parametrisierten Verfahren- erlauben eine sehr detaillierte Wiedergabe der örtlichen, hydraulischen Verhältnisse. Entsprechend groß kann der Aufwand bei der Modellbildung sein. Die Richtigkeit der Methoden wurde durch vielfältige Studien belegt. Zur Verifikation wurden abgelaufene Hochwasserereignisse herangezogen, deren Verlauf und Wirkung bekannt war. Die Bildung der entsprechenden, verifizierten mathematischen Modelle erfolgte mit diesem Wissen, d.h. es wird vorausgesetzt, dass das untersuchte Szenario repräsentativ ist. Das Wissen um die Variabilität von Hydrologie und Morphologie sowie Risiken, die aus dem etwaigen Versagen hydraulischer Strukturen wie Deichen, Wehrverschlüssen oder anderen Verschlussorganen entstehen, lassen es jedoch ratsam erscheinen diese Vorgehensweise kritisch zu hinterfragen. Insbesondere zur Feststellung des künftigen Schutzgrades ist die Verlässlichkeit der getroffenen Annahmen von entscheidender Bedeutung. Im Folgenden wird daher der Fragestellung nachgegangen wie sich die Qualität der Modellbildung prüfen und gegebenenfalls verbessern lässt. Eine wichtige Rolle spielt hierbei die Vertrauenswürdigkeit der Ergebnisse, welche in der Ingenieurpraxis häufig durch die erzielbare Modellgenauigkeit quantifiziert wird. Sie ist in diesem Zusammenhang als Unsicherheit oder Streuung des betrachteten rechnerischen Ergebnisswertes zu verstehen und beinhaltet sowohl die Ungenauigkeit der mathematischen Verfahren selbst als auch die der Eingangsgrößen. Die rechnerische Wirkung ist die Differenz zweier Ergebnisse an gleicher Stelle und zur gleichen Zeit jedoch unter verschiedenen Berechnungsannahmen. Auf die unterschiedliche Verlässlichkeit von Ergebniswerten und Wirkungen wird eingegangen. Angestrebt wird ein Modell, das mit geringstem Aufwand den Mittelwert von Ergebniswerten und Wirkungen unter Berücksichtigung der möglichen Streuung an den maßgeblichen Stellen verlässlich berechnen kann. Das Prüfverfahren zur Modellbildung und Wirkungsanalyse verwendet subjektives Expertenwissen, Sensitivitätsanalysen und Monte-Carlo-Simulation in Kombination. Die Methodik wird anhand eines Beispiels erläutert.

## 1 Einleitung

Es existieren bereits HN-Modelle (DVWK, 1999), die in der Praxis erprobt sind. Diese Methoden werden kommerziell oder an Universitäten ständig weiter entwickelt. Im Laufe der vergangenen Jahre ist eine deutliche Verfeinerung der Methoden bei gleichzeitiger vereinfachter Handhabung zu beobachten. Diese positive Entwicklung wurde in erster Linie durch die Anbindung der numerischen Modelle an GIS bzw. GIS-ähnliche Vor- und Nachbearbeitungsprogramme bewirkt. Gleichzeitig ist eine verstärkte Trennung zwischen Entwicklung und Anwendung festzustellen. Entwickler übernehmen die Verbesserung und Verifikation der HN-Methoden, während Anwender die Kalibrierung der HN-Modelle sicher stellen. Eine Validierung von HN-Modellen ist a priori d.h. vor deren Fertigstellung wegen fehlender Daten meist nicht möglich. Es stellt sich die Frage ob eine Validierung a priori überhaupt sinnvoll ist. De facto werden immer alle Daten zur Kalibrierung des Modells herangezogen. Dies gilt selbst dann, wenn eine separate Validierung vorgenommen wird. Grund hierfür ist, dass die Validierung nur dann akzeptiert werden kann, wenn sie gelingt. Anderenfalls ist das Modell solange anzupassen, bis die Übereinstimmung von Validierungsdaten und Rechnung ausreichend ist. Dieser Vorgang entspricht aber einer Modelleichung. Die Validierung a priori ist daher bei guter Kalibrierung entweder überflüssig oder ein Teil der Modellkalibrierung. Sinnvoller und für den Auftraggeber letztendlich entscheidend ist die a posteriori Validierung anhand der Fixierungen des nächsten abgelaufenen Hochwasserereignisses. Nur so ist die Unabhängigkeit der Daten und die optimale Verwendung der vorliegenden Daten gewährleistet. Anschließend kann - wenn erforderlich - eine Fehleranalyse und Korrektur im Rahmen der Fortschreibung des Modells erfolgen. Deutliche Fehler entstehen meist nicht durch fehlerhafte Verfahren, sondern durch fehlerhafte Modellbildung. Die übliche Einteilung der Arbeitsschritte in Verifikation, Kalibrierung und Validierung des Modells setzt jedoch die Vollständigkeit des Modells selbst und die Richtigkeit der Modellbildung voraus. Dies ist -insbesondere im Hochwasserschutz- nicht selbstverständlich. Es wird daher vorgeschlagen zusätzlich eine Prüfung der Modellbildung vorzunehmen. Zur Beurteilung sollten auch extreme Hochwasserereignisse untersucht werden.

Auch bei sorgfältiger Modellbildung sind die Ergebnisse fehlerbehaftet. Ursache sind eine mangelnde Übereinstimmung der grundlegenden Gleichungen, deren numerischer Lösung, der topografischen Daten, der Rauheits-/Turbulenz-Annahmen und der Randbedingungen mit den natürlichen Gegebenheiten. Die zahlreichen Untersuchungen zum Hochwasserschutz belegen zwar, dass der rechnerische Fehler die erwartete Genauigkeit oft erreicht oder sogar unterschreitet. Die Kenntnis der Modellgenauigkeit ist dennoch zur Beurteilung der Modellgüte und etwaiger Risiken von Interesse. Richtlinien zur Bestimmung der Genauigkeit bzw. Zuverlässigkeit von HN-Modellen existieren nach Kenntnisstand des Autors

nicht. Es wird daher die sogenannte Wirkungsanalyse zu deren Quantifizierung vorgeschlagen. Der Komplexität praxisnaher Anwendung Rechnung tragend basiert sie weniger auf exakter Statistik als auf der einfachen und praktikablen Untersuchung von Grenz- und Mittelwerten.

## 2 Beschreibung der Methodik

### 2.1 Modellbildung

Die Modellbildung ist -zumindest bei größeren Projekten- ein dynamischer Vorgang (DVWK, 1999). Sie kann in Modellerzeugung und anschließendem Modellbetrieb unterteilt werden (Tab. 2.1).

Tabelle 1 Modellbildung

Modellbildung	
Modellerzeugung	Modellbetrieb
Prüfung der Modellbildung	Validierung mit Hilfe der Fixierungen des nächsten abgelaufenen Hochwasserereignisses
Verifikation des verwendeten Verfahrens	Fortschreibung des Modells
Kalibrierung	

Eine genauere Beschreibung der Vorgehensweise folgt in Kapitel 3.2.

### 2.2 Wirkungsanalyse

Die Ausführung der o.g. Schritte bei der Modellbildung werden für die Wirkungsanalyse vorausgesetzt. D.h. es liegt ein Modell vor dessen prinzipielle Richtigkeit geprüft ist. Die Wirkungsanalyse geht weiterhin davon aus, dass Modellfehler ausschließlich Folge von Datenungenauigkeiten sind. Unter diesen Annahmen besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Datengenauigkeit und Modellgenauigkeit. Durch die Vielzahl der potentiell fehlerbehafteten Eingangsdaten und als Folge ihrer oftmals geringen Datendichte ist eine Berechnung der Modellgenauigkeit selbst für einfache parametrisierte oder 1d-Modelle meist nicht möglich. Daher wird in Abhängigkeit von Datendichte und Rechenaufwand die folgende Vorgehensweise vorgeschlagen (Tab. 2.2).

Tabelle 2 Methoden der Wirkungsanalyse

<i>Wirkungsanalyse</i>		
Datendichte	Rechenaufwand	Methode
gering	Mittel bis hoch	Sensitivitätsanalyse auf Basis von Schätzwerten für den oberen/unteren Grenzwert und Mittelwert
Mittel	Mittel bis hoch	Sensitivitätsanalyse auf Basis von statistisch berechnetem oberen/unteren Grenzwert und Mittelwert
hoch	gering	Monte-Carlo-Analyse, Ermittlung der Parametersätze für statistisch berechneten oberen/unteren Grenzwert und Mittelwert des jeweiligen Zielwertes

Eine genauere Beschreibung der Arbeitsschritte wird nachfolgend anhand eines Beispiels gegeben. Wichtig ist festzustellen, dass für jede Eingangsdate bzw. jeden Parametersatz jeweils ein unterer, mittlerer und oberer Wert betrachtet wird. Hierdurch wird eine einheitliche Behandlung möglich. Dies ist insbesondere bei einer heterogenen Daten- und Methodenstruktur von Bedeutung.

Die Wirkungsanalyse kann sowohl zur Prüfung der Zuverlässigkeit bzw. Modellgenauigkeit als auch zum Nachweis der Konsequenzen von Veränderungen im Hochwasserbett dienen.

Eine genauere Beschreibung der Vorgehensweise folgt in Kapitel 3.3.

### 3 Beispiel

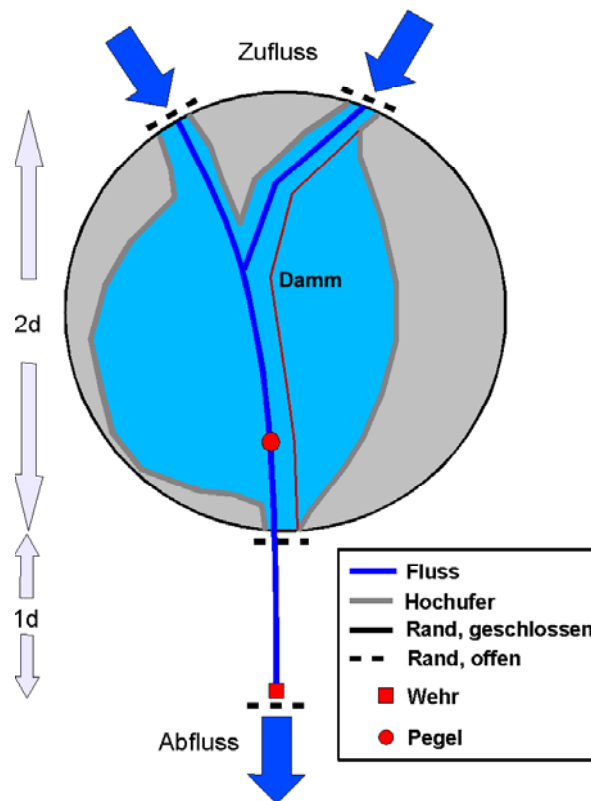
#### 3.1 Beschreibung des Demonstrationsmodells

Das in Abbildung 3.1 dargestellte Demonstrationsmodell soll zur Verdeutlichung der Vorgehensweise dienen und ist rein hypothetischer Natur. Auch die nachfolgend aufgeführten Werte dienen nur zum besseren Verständnis. Das Beispiel ist sehr einfach gehalten. In der praktischen Ausführung kann die Modellbildung und Wirkungsanalyse umfangreich werden. Im Vergleich zu genaueren Methoden (Meon, 1989) bleiben beide jedoch praktikabel.

In Tabelle 3.1 sind Art und Umfang der vorliegenden Informationen zusammengestellt.

**Tabelle 3** Eingangsdaten und deren Genauigkeit

<i>Eingangsdaten</i>	
Beschreibung der Eingangsdaten	Genauigkeit
1x DGH inkl. stauender, linienförmiger Bauwerke und natürlicher Geländeformen	+/-10 cm in der Fläche, +/-2 cm auf OK linienförmige Bauwerke
1x HW-Fixierungen (Geschwemmsel)	+/-10 cm
1x Rauheiten inkl. deren Verteilung, geschätzt gemäß Flächennutzung und Tabellenwerten	Geschätzt ca. +/-10%
2x Zuflussganglinien	+/-5% des Spitzenabflusses
1x Pegeldata	+/-1 cm



**Abbildung 1:** Beispiel

Der Spitzenabfluss zur gegebenen Hochwasserfixierung beträgt  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ . Das Gebiet hat natürliche Retentionsräume. Die Flusssohle ist durch Schwellen fixiert. Im Modellgebiet sind keine Durchlässe. Es gibt eine Pegelstelle im Modellgebiet. Ein Wehr liegt Unterstrom und weit außerhalb des Modellgebietes.

## 3.2 Modellbildung

### 3.2.1 Modellerzeugung

#### Prüfung der Modellbildung

Vor der Modellerzeugung sind zunächst einige allgemeine Entscheidungen zur Modellplanung zu klären. Diese Entscheidungen sind im Zuge der Modellbildung kritisch zu prüfen und eventuell zu korrigieren.

#### Modellplanung

- Entscheidung stationäre/instationäre Berechnung
- Entscheidung 1d-, 2d- oder hybride Berechnung
- Entscheidung Berechnung mit/ohne Berücksichtigung einer bewegliche Sohle
- Entscheidung ob das Modell weitergehende Funktionalität enthalten muss und wenn ja welche : z.B. vernetzte 1d-Topologie, Kopplung 1d/2d, Anbindung an GW-Modell, Einbindung von Bauwerken wie Wehre, Durchlässe, Brücken oder Steuerorgane
- Entscheidung ob das Modell fortgeschrieben werden soll oder nicht
- Entscheidung ob eine Modellübergabe stattfindet oder nicht. (Wenn ja Klärung bezüglich der Einweisung und über Verbleib der Nutzungsrechte)

Wenn diese Entscheidungen getroffen sind kann mit der eigentlichen Modellprüfung begonnen werden. Diese kann für Modellberandung und Gebietsinneres getrennt erfolgen.

#### Prüfung auf der Modellberandung

##### Zuflüsse

Die Zuflüsse sind eingehend auf Vollständigkeit und Richtigkeit zu prüfen. Bei der Prüfung auf Vollständigkeit sollte beachtet werden, dass auch kleine Nebengewässer in der Summe einen ganz erheblichen Teil zum Hochwasserabfluss beitragen. Falls sie zusammenfassend modelliert werden, ist die Bilanz zu prüfen. Wenn Zuflussganglinien vorgegeben sind oder aus HN-Modellen ermittelt werden, so ist ihre Richtigkeit durch Kontrolle am nächstgelegenen unterstromigen Pegel zu kontrollieren. Insbesondere die Laufzeit und die richtige Überlagerung der Zuflüsse ist zu prüfen. Wenn Ausuferungen schon unterhalb des Bemessungshochwassers auftreten, so ist es sinnvoll mit Hilfe von gestaffelter quasi-stationärer Berechnung den Abfluss in Stufen bis zum Erreichen des Bemessungsabflusses zu erhöhen. So

lässt sich flussabschnittsweise der bordvolle Abfluss bestimmen (Bechteler und Nujic, 1998). Man spricht bei dieser Vorgehensweise auch von der Berechnung so genannter Leistungsbänder. Es sollte zumindest ein Hochwasserereignis untersucht werden, das den Bemessungsabfluss deutlich überschreitet. Es kann zu diesem Zweck der PMF-Abfluss oder der so genannte freibordäquivalente Abfluss bestimmt werden. Der freibordäquivalente Abfluss ist derjenige Abfluss, der zur Überschreitung des vorhandenen Freibordes führt. Die Berechnung dieses Abflusses hat den folgenden Nutzen. Zum einen kann die "hydrologische Sicherheit" geprüft werden, die der gewählte Freibord schafft, wenn er vollständig hydraulisch genutzt werden kann (kein Wellenschlag, keine Verklausung). Zum anderen kann nicht lineares Verhalten im Wasserspiegelanstieg aufgedeckt werden.

### Randbedingungen

Die Lage der Randbedingungen ist hydraulisch sinnvoll zu wählen. Wehre, Schwellen und Engstellen bieten sich als Schnittstellen an. Es ist jedoch stets zu prüfen, ob und wie weit sich Fehler der Randbedingung in das Innere des Modellgebietes ausbreiten können. In der flussbaulichen Anwendung hat sich folgende Vorgehensweise bewährt. Für Zu- und Ablauf wird zunächst eine Schätzung des zu erwartenden Fehlers am Ort der Randbedingung gemacht. Anschließend wird eine Absenkung oder ein Aufstau am Ort der Randbedingung mit dem Betrag des geschätzten Fehler angenommen. Mit Hilfe einer einfachen Stau- bzw. Senkungslinienberechnung kann näherungsweise geprüft werden ob die Randbedingung die geforderte Genauigkeit im Gebietsinneren beeinträchtigt. Falls dies der Fall ist, so sind die Zu- bzw. Ablaufstrecken solange zu verlängern bis der Einfluss der Randbedingungen im Gebietsinneren vernachlässigbar klein ist. Selbstverständlich sind die Annahmen im Rahmen der Kalibrierung nochmals auf Richtigkeit zu prüfen.

### Modellgrenzen

Die Modellgrenzen sind für das Bemessungshochwasser zu überprüfen. Die Überflutungsgrenzen sollten den Modellrand nicht berühren. D.h. der Modellrand wird abgesehen von den definierten Zu- und Abläufen nirgends überströmt. Etwaige natürliche oder künstliche Durchlässe müssen als Randbedingung erfasst werden. Zumindest aber muss sichergestellt werden, dass die Rückstauwirkung außerhalb des Modellgebietes beim Bemessungshochwasser gefahrlos ist.

## **Prüfung im Inneren des Modellgebiets**

### Berechnungsnetzqualität

Die Berechnungsnetzstrukturqualität kann mit Hilfe von geeigneten Programmen (z.B. SMS) überprüft werden. Ob das Berechnungsnetz die vorhandenen topografischen Daten so diskretisiert, dass die Strömungsvorgänge richtig dargestellt werden können, kann durch das folgende Verfahren geprüft werden. Zunächst wird ohne Rücksicht auf die Gitternetzstruktur ein vermaschtes Gittermodell DGH erzeugt, das die Topografie bestmöglich wiedergibt. Dieses Gitternetz ist zur numerischen Berechnung nicht tauglich. Es kann jedoch zur Prüfung der Diskretisierung des Berechnungsgitters herangezogen werden. Nach Verfeinerung des Berechnungsgitters sind nach Überlagerung mit dem DGH und anschließender Subtraktion die Differenzen berechenbar. Werden nun neben den Höhendaten zusätzlich noch rechnerische Ergebnisse für die Strömungsgeschwindigkeiten auf das verfeinerte Berechnungsgitter übertragen, so lassen sich nach Produktbildung von Geländedifferenzen und Strömungsgeschwindigkeit die Orte mit mangelhafter Diskretisierung leicht feststellen.

### Retention

Sobald eine deutliche Retentionswirkung im Modellgebiet vorliegt, ist eine stationäre Berechnung nicht mehr zulässig. Wenn die natürlichen Ausuferungen nur mehr oder weniger punktuell erfolgen oder gezielt, gesteuert entnommen wird, so ist eine 1d-Simulation ausreichend. Flächige natürliche Ausuferungen können nur 2d-numerisch berechnet werden.

### Rauheit/Turbulenz

Die Erfassung von Rauheit und Turbulenz ist immer noch mit großen Unsicherheiten behaftet. In der Praxis wird die Rauheit meist mit Hilfe der Fließformel nach Strickler berechnet. Die Verteilung wird hierbei entsprechend dem Bewuchs und der Landnutzung festgelegt. Die Stricklerwerte der jeweiligen Bewuchs- oder Nutzungszone werden entsprechend Tabellenwerken (z.B. DVWK, 1990) bestimmt. Die Turbulenz wird meist mit dem relativ einfachen k-e-Modell simuliert. Hierbei kommen Standardwerte z.B. gemäß ASCE Task Committee (1988) zur Anwendung.

### Versickerung / Austausch mit Grundwasser

Bei sehr durchlässigen Böden kann Versickerung, Durchströmung und Austausch mit dem Grundwasser von Bedeutung sein. Insbesondere an stauenden, linienförmigen Bauwerken (z. B. Dämme, Deiche, Aufschüttungen) oder natürlichen Geländeformen kann sich bei Hochwasser ein großer hydraulischer Gradient aufbauen, der



zu raschem und starkem Grundwasseranstieg führt. In einigen Fällen ist der Austausch zwischen Grund- und Oberflächenwasser bei Hochwasser so groß, dass er nicht vernachlässigt werden kann und daher eine direkte Kopplung von Grundwasser- und HN-Verfahren erforderlich ist.

Die Modellbildung für das gegebene Beispiel könnte sich wie folgt gestalten:

Modellplanung:

Der Damm im Gebietsinneren wird bei mittleren Hochwasserereignissen überströmt. Es wird hierbei ein natürlicher Rückhalt gebildet. Folglich ist 2d-instationär zu rechnen. Wegen der Schwellen darf von einer festen Sohlenlage ausgegangen werden. Wegen der angrenzenden Hochufer ist nicht mit drückendem Grundwasser im Modellgebiet zu rechnen. Wehre oder Durchlässe befinden sich keine im Modellgebiet. Der Austausch mit dem Grundwasser kann nicht geprüft werden. Folglich ist weitergehende Funktionalität zunächst nicht erforderlich. Aussagen zu Modellfortschreibung und -übergabe sind nicht genannt.

Prüfung auf der Modellberandung

Die beiden Zuflüsse können mit Hilfe des Pegels geprüft werden. Der PMF-Abfluss und der eventuell vorhandene Freibord der Hochufer ist unbekannt. Daher kann keine Prüfung eines Überschreitungsszenarios erfolgen. Die unterstromige Randbedingung könnte mit Hilfe einer genügend langen freien Fließstrecke ausreichend genau modelliert werden. Hier wird eine etwas aufwändigere aber genauere Vorgehensweise verwendet. Die Fließstrecke bis zum unterstromigen Wehr wird 1d modelliert. Folglich ist eine gekoppelte 1d/2d-Berechnung erforderlich (weitergehende Funktionalität). Der geschlossene Modellrand wird voraussichtlich nicht benetzt (Hochufer). Die Prüfung im Inneren des Modellgebiets wird nicht weiter ausgeführt.

### **Verifikation des verwendeten Verfahrens**

Zur Verifikation des verwendeten Verfahrens sind vom Entwickler für die Hochwassersimulation die folgenden Modelleigenschaften nachzuweisen :

- Benetzung und Trockenfallen
- Übergang strömen-schiessen-strömen
- Kompatibilität (d.h. die numerische Behandlung der Quellterme erzeugt in stehendem Wasser keine künstliche Strömung)
- Volumentreue
- weitergehende Funktionalität

## Kalibrierung

Nach der Modellbildung liegen alle erforderlichen Informationen geprüft vor. Auch über Defizite des Modells besteht nach Prüfung der Überschreitungsszenarios Klarheit. Auf dieser Basis kann mit der Kalibrierung begonnen werden. Sie muss mit aller Sorgfalt unter Verwendung sämtlicher bekannter Messdaten ausgeführt werden.

In der Regel werden zur Kalibrierung mindestens eine Hochwasserfixierung verwendet. Wenn auf mehrere deutlich unterschiedliche Hochwasserabflüsse geeicht wird, muss bei Verwendung der Stricklerrauheit deren Tiefenabhängigkeit beachtet werden. Es ergibt sich hieraus eine abflussabhängige Verteilung der Gerinnerauheit. Die Genauigkeit der Kalibrierung kann als ausreichend gelten, wenn die Abweichung zwischen Fixierung und berechnetem Wasserspiegel im Mittel der halben Wellenschlaghöhe entspricht. Bei der Bewertung ist die Art wie die Fixierung aufgenommen wurde zu beachten. Fixierungen, die anhand von Geschwemmsel festgestellt wurden beinhalten den Wellenschlag. Bei unmittelbar gemessenem Wasserspiegel ist der Messzeitpunkt zu kontrollieren, um sicherzustellen, dass zum Zeitpunkt des Abflussmaximums gemessen wurde.

Hochwasserschutz ist oft an Gewässern 2. und 3. Ordnung erforderlich. Hier ist die Datenlage häufig unzureichend, so dass eine eingehende Kalibrierung nicht möglich ist. Die nachfolgend beschriebene Wirkungsanalyse ist für diese Fälle von besonderer Bedeutung, da sie zumindest Anhaltswerte für die zu erwartende Variabilität der Ergebnisse liefert.

Eine weitere Prüfung der Eichung ermöglicht der Vergleich gemessener und rechnerischer Schubspannungskräfte. Wenn die Dichte der Fixierungen es zulässt, können lokal Wasserspiegelneigungen berechnet werden. Diese können unter Verwendung gemessener Wasserstände in Sohlenschubspannungen bzw. Sohlenschubspannungskräfte für den betrachteten Abschnitt umgerechnet werden. Diese sollten in guter Übereinstimmung mit den rechnerisch ermittelten Werten im betrachteten Abschnitt sein.

Die Kalibrierung des gegebenen Beispiel kann mit Hilfe nur einer einzigen Hochwasserfixierung nicht in ausreichendem Umfang durchgeführt werden, da zur Untersuchung der natürlichen Retentionswirkung verschiedene Abflussganglinien instationär berechnet werden müssen und die Variabilität der Grundrauheit ohne eine zweite Fixierung nicht geprüft werden kann.

### 3.2.2 Modellbetrieb

Die Validierung mit Hilfe der Fixierungen des nächsten abgelaufenen Hochwasserereignisses belegt entweder eine ausreichende Modellgüte oder macht eine er-

neute Prüfung und Kalibrierung des Modells notwendig. Die Arbeitsabläufe bei der Fortschreibung des Modells entsprechen im wesentlichen denen der Modellbildung. Da nur Änderungen eingearbeitet werden müssen, ist der Arbeitsumfang jedoch deutlich reduziert.

### **3.3 Wirkungsanalyse**

#### **3.3.1 Prüfung der Zuverlässigkeit**

Theoretisch kann die Wirkungsanalyse auf der Basis jeder beliebigen Modellvariable erstellt werden. Da in der Praxis bei Hochwasser jedoch nur Wasserspiegellagen direkt gemessen werden können, macht es in diesem Zusammenhang keinen Sinn Geschwindigkeiten oder Abflüsse auszuwerten. Zielgröße der Wirkungsanalyse ist daher stets die Wasserspiegellage. D.h. der Veränderung der jeweiligen Eingangsgröße im Vergleich zur Kalibrierung wird die Veränderung der Wasserspiegellage im Vergleich zur Kalibrierung zugeordnet. Bei instationärer Berechnung ist die maximal erreichte Wasserspiegellage Zielgröße.

Die Wirkungsanalyse gilt nur solange der genannte Zusammenhang zwischen Eingangsgröße und Wasserstand besteht. Dies gilt nicht immer. Funktionsstörungen an Wehren oder Fehlsteuerungen infolge Bedienungsfehlern können unmittelbaren Einfluss auf das Abflussgeschehen haben ohne von ihm verursacht zu sein. Diese seltenen Ereignisse müssen falls erforderlich separat behandelt werden. Sprunghafte Änderungen der Wasserspiegellage bei kleinen Änderungen der Eingangsgröße sind zulässig, solange das Ursache-Wirkungs-Prinzip erhalten bleibt (z.B. Damm- oder Deichbruch).

Den einzelnen Eingangsgrößen müssen statistisch berechnete oder geschätzte Genauigkeiten zugeordnet sein. Ihr Mittelwert entspricht dem Kalibrierungswert. Der obere/untere Grenzwert kann entweder mit Hilfe der Standardabweichung oder der 5%-Fraktile festgelegt werden. Die Grenzwerte sollten innerhalb einer Wirkungsanalyse einheitlich berechnet werden.

Die Berechnungen sind im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse für oberen und unteren Grenzwert der jeweiligen Eingangsgröße zu wiederholen. Referenzzustand ist die Kalibrierung. Die Auswertung erfolgt anschließend sowohl für die Eingangsgrößen als auch für die resultierenden Wasserspiegellagen in Form von Differenzen bezogen auf den Referenzzustand.

Der Übersichtlichkeit halber sollten diese Differenzen nur an wenigen maßgeblichen Stellen bestimmt werden. Ein Vergleich der Wirkungen erschließt rasch welche Eingangsgrößen die größte Streuung der Ergebnisdaten erzeugen. In der Praxis haben meist Zufluss und Rauheit/Turbulenz den größten Einfluss.

Die Festlegung der Grenzwerte kann sich bei komplizierten Zusammenhängen an Teilstrukturen (z.B. Steuerorgane oder Deichbruch) schwierig gestalten. In diesen Fällen kann eine Monte-Carlo-Simulation hilfreich sein (Pohl, 1997; Loucks et al., 2002), wenn der entstehende Rechenaufwand gering bleibt. Weitere Voraussetzung hierfür ist eine sehr gute Datenlage, die die Ermittlung der Dichtefunktionen der Eingangsgrößen erlaubt. Die Verteilung der maßgeblichen Zielgröße kann anschließend ermittelt werden. Da diese Berechnung mit der oben beschriebenen nicht kompatibel ist, wird vorgeschlagen für den oberen und unteren Grenzwert der maßgeblichen Zielgröße (z.B. Ausfluss beim Deichbruch) repräsentative Parametersätze zu ermitteln und diese wie eine einzelne Eingangsdate zu behandeln. Dieser Ansatz ist noch Forschungsgegenstand.

Im vorliegenden Beispiel könnten die folgenden Wirkungen (Tab. 3.2) gelten.

**Tabelle 4** Beispiel, Wirkungsanalyse an einem Kontrollpunkt nahe der Pegelstelle

<i>Wirkungsanalyse</i>		
<i>Beschreibung der Eingangsdaten</i>	<i>Standardabweichung der Eingangsdaten</i>	<i>Wirkung</i>
Zuflüsse (gesamt)	+ - 25 m <sup>3</sup> /s	12 cm
Gelände	+ - 10 cm	3 cm
OK OK linienförmige Bauwerke (Damm)	+ - 2 cm	< Modellgenauigkeit
Rauheit, Gerinne	+ - 3 m <sup>0.333</sup> /s	15 cm

In diesem Beispiel wäre es sinnvoll, die Wirkung von Kombinationen aus Rauheits- und Geländeänderungen zu untersuchen. Die Schwankung des Zuflusses sollte in einer hydrologischen Studie zunächst separat untersucht werden und erst dann im Rahmen der Wirkungsanalyse weiter behandelt werden.

### 3.3.2 Nachweis der Konsequenzen von Veränderungen im Hochwasserbett

Für die Bewertung der Maßnahmen ist oft die Analyse der Wirkung, d.h. der Veränderung gegenüber dem Bestand entscheidend. Diese Veränderung ist im wesentlichen abhängig von der jeweiligen Topografie. Eigenschaften, die sowohl im Bestand als auch im Planungszustand konstant bleiben, wie zum Beispiel der Zufluss oder die Rauheit, gleichen sich in ihrer Wirkung aus. Durch diese Vorgehensweise wird die Sensitivität der Aussagen bezüglich der Rechenannahmen abgemindert und umgekehrt bezüglich der Wirkung der Veränderungen im Hochwasserbett erhöht.

Daher können Aussagen, die sich aus einer Wirkungsanalyse ableiten als sicher gelten, wenn Kalibrierung und Verifikation geprüft sind.

### **Zusammenfassung**

Die übliche Vorgehensweise bei der Modellierung im Hochwasserschutz setzt die Richtigkeit des gewählten Modells voraus. Die unvollständige Erfassung der Gegebenheiten kann aber zu deutlichen Berechnungsfehlern führen. Es wird daher vorgeschlagen zusätzlich eine Prüfung der Modellbildung vorzunehmen. Hierbei sollten auch Abflüsse untersucht werden, die den Bemessungsabfluss überschreiten. Es wurden verschiedene bekannte und neue Verfahren zur Überprüfung der Modellgüte, zur Bestimmung der erforderlichen Zu- und Ablauflängen, zur Fehleraufdeckung und zur Feststellung des Ausuferungsbeginns beschrieben.

Auch bei sorgfältiger Modellbildung sind die Ergebnisse fehlerbehaftet. Ursache sind eine mangelnde Übereinstimmung der grundlegenden Gleichungen, deren numerischer Lösung, der topografischen Daten, der Rauheits-/Turbulenz-Annahmen und der Randbedingungen mit den natürlichen Gegebenheiten. Die zahlreichen Untersuchungen zum Hochwasserschutz belegen zwar, dass der rechnerische Fehler die erwartete Genauigkeit oft erreicht oder sogar unterschreitet. Die Kenntnis der Modellgenauigkeit ist dennoch zur Beurteilung der Modellgüte und etwaiger Risiken von Interesse. Richtlinien zur Bestimmung der Genauigkeit bzw. Zuverlässigkeit von HN-Modellen existieren nach Kenntnisstand des Autors nicht. Es wird daher die sogenannte Wirkungsanalyse zu deren Quantifizierung vorgeschlagen. Der Komplexität praxisnaher Anwendung Rechnung tragend basiert sie weniger auf exakter Statistik als auf der einfachen und praktikablen Untersuchung von Grenz- und Mittelwerten. Eine Abschätzung der Variabilität der Ergebnisse auch in heterogenen Daten- und Verfahrensstrukturen mit relativ geringem Aufwand möglich. Mit Hilfe der Wirkungsanalyse lassen sich auch Konsequenzen von Veränderungen im Hochwasserbett sicher nachweisen.

### **Danksagung**

Diese Arbeit wurde vom Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrologie der Bundeswehruniversität München gefördert. Besonderer Dank für Unterstützung und Beratung gilt Prof.-Ing. em. Wilhelm Bechteler und Dr.-Ing. Sven Hartmann.

Aus dem EC-Projekt IMPACT ([www.impact-project.net](http://www.impact-project.net)) wurden Ideen und Mittel beigesteuert. Der Autor bedankt sich für die finanzielle Unterstützung durch das IMPACT-Projekt ( 5th framework programme (1998-2002), Environment and Sustainable Development thematic programme), für das Karin Fabbri die verantwortliche EC-Kommissarin ist. Weiterhin möchte er sich bei Mark Morris von HR Wallingford für seine Leistungen in Organisation und Leitung des Projekts sowie die aufschlussreiche Konfrontation mit dem Thema "Risk&Uncertainty" bedanken.

## Literatur

- ASCE, 1988: "Turbulence Modeling of Surface Water Flow and Transport", ASCE Task Committee on Turbulence Modeling in Hydraulic Computations, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 114, No. 9
- MEON, G., 1989: "Sicherheitsanalyse einer Talsperre für den Hochwasserfall" Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Heft Nr. 35, Univ. Karlsruhe, 1989
- POHL, R., 1997: "Überflutungssicherheit von Talsperren", Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und technische Hydromechanik der Technischen Universität Dresden 11
- BECHTELER UND NUJIC, 1998: "Isarplan - Hydraulische Berechnung", Bericht, Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrologie, Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München
- DVWK, 1999: "Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern", DVWK, Heft 127
- HABLE, O., 2001: "Multidimensional probabilistic design concept for the estimation of the overtopping probability of dams", Phd thesis, Technische Universität Graz, 2001
- LALL, U. ; PHILLIPS, D.L. ; RECKHOW, K.H. AND LOUCKS, D.P. (Chair), 2002 : "Quantifying and Communicating Model Uncertainty for Decision Making in the Everglades"
- USACE-report of the Comprehensive Everglades Restoration Plan's Model Uncertainty Workshop, US. Army Corps of Engineers, South Florida Water Management District, West Palm Beach, FL, January 15-17, 2002

## Begriffsdefinition

Modell	: numerisches HN-Modell; Synonym (datentechnisch) für Objekt = Programm + Daten
Methode	: Synonym für Verfahren; Synonym (datentechnisch) für Programm
Modellbildung	: Modellerzeugung + Modellbetrieb
Verifikation	: Nachweis der Richtigkeit des verwendeten Verfahrens
Kalibrierung	: Synonym für Modelleichung
Validierung	: Unabhängige Kontrolle des Modells
Genauigkeit	: praktisch erzielbare Gesamtgenauigkeit; Synonym Zuverlässigkeit
Wirkung	: Differenz der Wasserspiegellage im Vergleich zum Referenzzustand
Parametrisiertes Modell	: vereinfachtes Modell, z.B. zur Berechnung von Wehren, Durchlässen, Pumpen oder Polderrückhalt

Dr.-Ing. Karl Broich  
 Universität der Bundeswehr München  
 Institut für Wasserwesen  
 Lehrstuhl für Hydromechanik  
 Werner-Heisenberg-Weg 39  
 85577 Neubiberg  
 E-mail : b61bro@B6AXS1.bauv.unibw-muenchen.de