

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Buchholz, Oliver; Schwanenberg, Dirk; Sommer, Benedikt**

## **Anforderungen an moderne Hochwasser-Vorhersagesysteme - Beispiele für die Umsetzung mit Delft-FEWS**

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103487>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Buchholz, Oliver; Schwanenberg, Dirk; Sommer, Benedikt (2013): Anforderungen an moderne Hochwasser-Vorhersagesysteme - Beispiele für die Umsetzung mit Delft-FEWS. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Technischer und organisatorischer Hochwasserschutz - Bauwerke, Anforderungen, Modelle. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 48. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 65-74.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# **Anforderungen an moderne Hochwasser- Vorhersagesysteme - Beispiele für die Umsetzung mit Delft-FEWS**

Oliver Buchholz  
Dirk Schwanenberg  
Benedikt Sommer

Hochwasservorhersagesysteme, die als operationelles Werkzeug einen wirkungsvollen Beitrag zur Verminderung von Hochwasserschäden leisten sollen, müssen bestimmte konzeptionelle Anforderungen an die Integration von Daten und Modellen sowie die Skalier- und Portierbarkeit erfüllen. Eine wesentliche Eigenschaft moderner Vorhersagesysteme ist dabei ihre modulare Architektur mit einer klaren Trennung zwischen der Datenebene (Import, Pre- und Postprocessing, Export) und der Modellebene. Dies ermöglichen offene Schnittstellenstandards, die einen breiten Modelleinsatz erlauben, ohne von der spezifischen Modellkenntnis eines Anwenders abzuhängen. Das Softwaresystem Delft-FEWS wurde in seiner Entwicklung entsprechend dieser Anforderungen ausgelegt und dient inzwischen in mehr als 50 Vorhersagezentren als operationelle Plattform. Es ist insbesondere im angelsächsischen Raum verbreitet und wird als nationales Vorhersagesystem z. B. in Großbritannien und den USA verwendet. Die Entwicklung eines Adapters für das N-A-Modell NASIM ermöglicht dessen Kopplung mit Delft-FEWS für die Erstellung von Abfluss- bzw. Hochwasservorhersagesystemen.

Stichworte: Hochwasserschutz, Hochwasservorhersage, N-A-Modell

## **1 Einführung**

Die Diversität operationeller Hochwasserfrühwarnsysteme hinsichtlich ihres konzeptionellen Aufbaus ist groß. Oft handelt es sich um spezifisch entwickelte Anwendungen, die auf die Bedürfnisse bestimmter Flussgebiete und Institutionen zugeschnitten sind. Im Einzugsgebiet des Rheins befassen sich z. B. mehr als 25 Organisationen mit der Erstellung von Vorhersagen und arbeiten teilweise mit sehr unterschiedlichen Ansätzen.

Aufbauend auf Erfahrungen bei der Implementierung verschiedener Hochwassersysteme in England, Wales, Österreich und Deutschland lässt sich eine Reihe von grundlegenden Prinzipien formulieren, denen ein modernes Hochwasservorhersagesystem genügen sollte. Die Wesentlichen sind: (i) die nachträgliche Reproduzierbarkeit von Vorhersagen, (ii) eine prozessorientierte Benutzung des

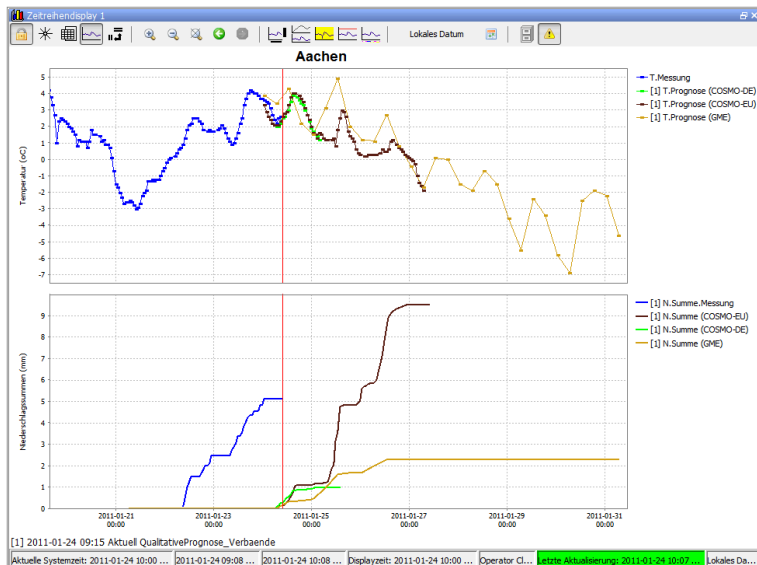
Vorhersagesystems, (iii) qualitativ hochwertige Vorhersagen mit einer konsistenten Gütekontrolle und (iv) seine generische Anwendbarkeit (*Buchholz 2011*).

## 2 Reproduzierbarkeit von Vorhersagen

Die nachträgliche Reproduzierbarkeit von Vorhersagen ist eine der zentralen Forderungen an ein professionelles Vorhersagesystem, um i) den Frühwarnprozess durch eine Optimierung organisatorisch und modelltechnisch zu verbessern (*Casper et al. 2009*) und ii) der Dokumentations- und Beweissicherungspflicht der verantwortlichen Institutionen nachzukommen. Dies ist umso wichtiger, je mehr entsprechende Hochwasserwarnungen zu Speichervorentlastungen, gesteuerten Polderflutungen oder Evakuierungen genutzt werden. Hochwasserereignisse ziehen zunehmend auch juristische Konflikte nach sich, wenn unterlassene Warnungen oder auf der Grundlage von Warnungen getroffene Entscheidungen zu erhöhten oder vermeintlich erhöhten Schäden führen.

Aus der Forderung der Reproduzierbarkeit ergeben sich die folgenden Konsequenzen für den konzeptionellen Aufbau eines Vorhersagesystems:

1. Die Datengrundlage der Vorhersageberechnungen ist zu dokumentieren. Dies impliziert Anforderungen an die Datenhaltung des Vorhersagesystems, die von einer klassischen Datenspeicherung in einer typischen hydrologischen Datenbank abweicht.
2. Der Ablauf einer Vorhersage, d. h. die Abfolge verschiedener Berechnungsschritte ist zu dokumentieren. Da operationelle Vorhersagesysteme im Laufe ihrer Anwendung angepasst und optimiert werden, sollte die Definition von Berechnungsabläufen konfigurierbar und durch eine Versionierung eindeutig identifizierbar sein.
3. Die Vorhersageergebnisse und die darauf beruhenden Warnungen müssen eindeutig den zugrunde liegenden Vorhersageprodukten zugeordnet werden können (siehe Abbildung 1).



**Abbildung 1:** Historische Zeitreihen (links der senkr. Linie) werden mit aktuellen Messwerten ergänzt, ältere Vorhersagen werden durch aktuellere ersetzt (COSMO-DE, COSMO-EU, GME).

### 3 Prozessorientierte Benutzung

In der Vergangenheit wurden Hochwasservorhersagesysteme oft auf Basis eines bestimmten Simulationsmodells entwickelt. Ausgehend von anfangs einfachen Modellen mit geringen Datenanforderungen erfolgte das Pre- und Postprocessing sowie der eigentliche Rechenlauf händisch oder teilautomatisiert. In der Regel gibt es in solchen Systemen keine eindeutige Trennung zwischen dem eigentlichen hydrologischen Rechenlauf und den hochwasservorhersagespezifischen Schritten einer Vorhersage wie beispielsweise der Aufbereitung von Daten.

Es ist daher sinnvoll, durch eine offene Schnittstelle eine Ebene einzuführen, die das Vorhersagesystem von den verwendeten Simulations-Modellen trennt. Trotz eines erhöhten Aufwands zur Implementierung bieten sich folgende Vorteile: (i) die Durchführung einer Hochwasservorhersage wird standardisiert und ist damit unabhängig von der spezifischen Modellkenntnis eines Anwenders ab. (ii) Die offene Modellschnittstelle ermöglicht den Einsatz der vollen Bandbreite der in der Wasserwirtschaft vorhandenen Modelle.

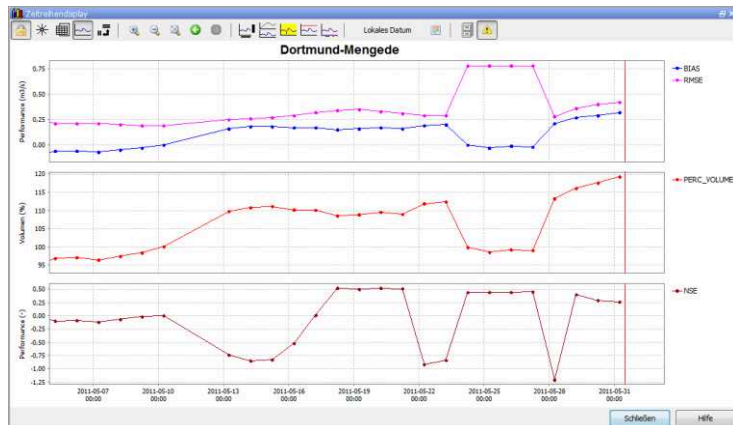
Gleichzeitig sinken dadurch die Anforderungen an die Modelle, da das Vorhersagesystem in der Lage ist, auch das Nachführen der Modelle zu verwalten und die Ensemblevorhersagen zu übernehmen

## 4 Hochwertige Prognosen mit konsistenter Gütekontrolle

Belastbare Prognosen erfordern eine Aussage über die Unsicherheit der gemachten Vorhersage und bei kontinuierlich rechnenden Modellen eine Modellnachführung zur optimalen Aktualisierung des Systemzustands.

Einen Überblick zu aktuellen Anwendungen und Modelltechniken geben *Werner (2005)*, *Maniak (2009)* und *Casper (2010)*. Unabhängig von den angewandten hydrologischen Modellen und Methoden sollte die Vorhersagegüte einer kontinuierlichen Gütekontrolle unterliegen. Dieser Prozess kann in drei Unterpunkte gegliedert werden: (i) Güte der Modellnachführung, (ii) Vorhersagegüte der externen Wettervorhersage, (iii) Vorhersagegüte der Abflussvorhersage.

Die Gütekontrolle der Modellnachführung zielt darauf ab, für den Vorhersagezeitpunkt einen Systemzustand zu berechnen, der möglichst gut mit dem realen Systemzustand übereinstimmt. Als Indikator dafür kommen Kriterien (mittlere Abweichung, Standardabweichung oder Nash-Sutcliffe-Modelleffizienz) zum Einsatz, die auch im Rahmen einer klassischen Modellkalibrierung benutzt werden. Dies setzt voraus, dass das System eine implementierte Nachführung des Dateneingangs besitzt (siehe Abbildung 2).



**Abbildung 2:** Berechnete Performanceindikatoren der historischen Modellnachrechnungen der vergangenen Tage (von oben nach unten: RMSE, BIAS, Volumenfehler, Nash-Sutcliffe-Modelleffizienz)

Bei der Evaluierung der Vorhersagegüte wird in der Regel zwischen der externen Wettervorhersage und der intern berechneten Abflussvorhersage unterschieden. Die meteorologische Vorhersage stellt typischerweise das unsicherste Glied im Vorhersageprozess dar. Es unterliegt als meist externer Input einer besonderen Evaluierung. Ihre Relevanz für die Hochwasservorhersage hängt wesentlich von den hydrologischen Charakteristika des Einzugsgebietes und der definierten Vorhersagedauer ab. In kleinen Einzugsgebieten mit kurzen Reaktionszeiten beeinflusst die Unsicherheit der Wettervorhersage die Abflussvorhersage unmit-

telbar. In den Unterläufen von großen Flusseinzugsgebieten wie dem Rhein nimmt der Einfluss der Wettervorhersagen hingegen ab. Dort basieren die Vorhersagen für einen Vorhersagezeitraum von zwei Tagen noch größtenteils auf den im Oberlauf gemessenen Wasserständen und Abflüssen.

Die Feststellung der Vorhersagegüte findet in der Regel über einen Vergleich der Vorhersagen mit den später eingetroffenen Messungen statt: Berechnung statistischer Parameter wie die mittlere Abweichung für verschiedene Vorhersagehorizonte, Evaluation des zeitlichen und quantitativen Eintretens von prognostizierten Hochwasserscheiteln, der Überschreitung von Warnschwellen sowie der Stabilität von aufeinander folgenden Vorhersagen.

## 5 Generische Anwendbarkeit

Die softwaretechnischen Anforderungen der generischen bzw. allgemeinen Anwendbarkeit eines Hochwasservorhersagesystems sollten folgenden Aspekten genügen: (i) einheitlicher Produktcode mit Konfigurationsmöglichkeiten, (ii) langfristige Verfügbarkeit (professioneller Support mit Update- und Upgrade-Strategien), (iii) Robustheit, (iv) Plattform- und Datenbankunabhängigkeit, (v) Skalierbarkeit, (vi) Stand-Alone- und Client-/Server-Server-Betrieb (Single bis Multi-User-Fähigkeit).

Die letzten drei Aspekte definieren Eigenschaften, die auf die IT-Architektur eines Vorhersagesystems abzielen. Sie sichern die möglichst breite und flexible Anwendbarkeit eines einzelnen Produktcodes bei einer Vielzahl von unterschiedlichen Anwendern, die oft eigene Standards hinsichtlich der Serverkomponenten in ihrer Organisation definiert haben. Bei plattformunabhängigen Serverkomponenten haben sich JAVA-basierte Systeme durchgesetzt, die einfach auf unterschiedlichen Betriebssystemen wie Windows, Linux oder Unix betrieben werden können.

Flexibel skalierbare Systeme sollten die Anwendung der Software sowohl für kleine, regionale Systeme als auch für große nationale Vorhersagesysteme erlauben. Robustheit und Leistungsstärke ermöglichen den Umgang mit hydrometeorologischen Massendaten unterschiedlicher Anbieter (Abruf, Integration, Prüfung, Weiterverarbeitung und Visualisierung). Durch vorkonfigurierte, wiederkehrende Hauptarbeitsschritte kann der Anwender sich auf die Erstellung belastbarer Vorhersagen konzentrieren.

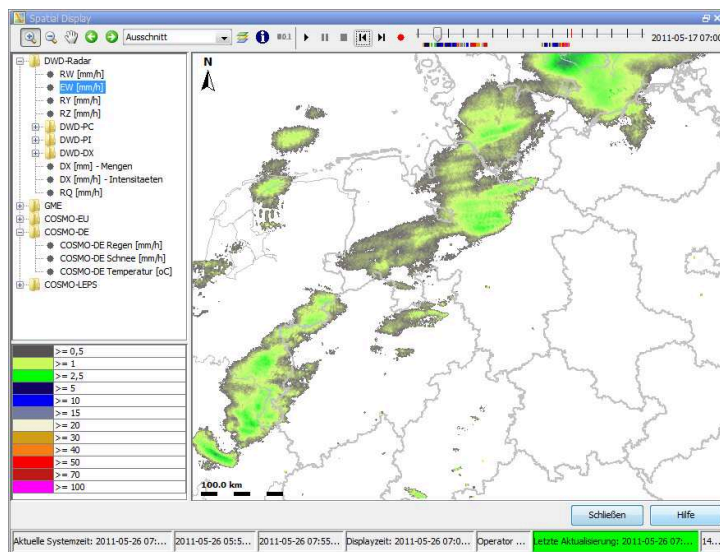
## 6 Das Hochwasservorhersagesystem Delft-FEWS

Basierend auf den oben beschriebenen Anforderungen hat das niederländische Forschungs- und Beratungsinstitut Deltares das modular aufgebaute Hochwasservorhersagesystem Delft-FEWS (Flood Early Warning System) entwickelt. Die lizenzkostenfreie, individuell konfigurierbare und plattformunabhängige Software ermöglicht es den Anwendern, ihre eigenen Modelle für die Vorhersage weiterhin zu benutzen. *Werner (2012)* beschreibt das System ausführlich.

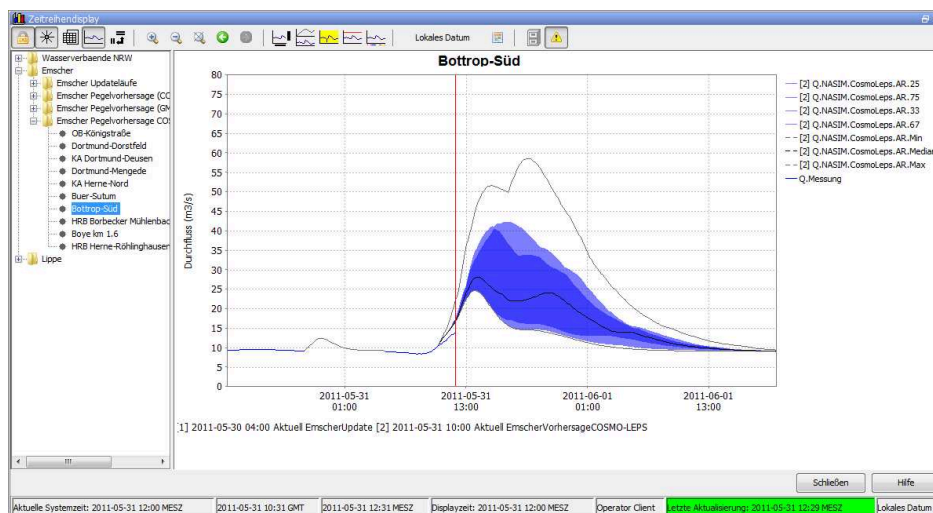
## 7 Kopplung mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell NASIM

Die oben beschriebene offene Modellschnittstelle ermöglichte die Kopplung von Delft-FEWS mit dem N-A-Modell NASIM (*Hydrotec 2012*). Der dazu entwickelte Modell-Adapter enthält den NASIM-Rechenkern. Eine separate Installation von NASIM ist nicht erforderlich. Der Adapter steuert den Modellaufruf von NASIM sowie die Übergabe der Modellinput- und Outputdaten und Anfangs- und Endzustände. Aus den prognostizierten Abflüssen werden über Wasserstands-Abfluss-Beziehungen Wasserstände berechnet und an die grafische Nutzeroberfläche übergeben. Ein gekoppeltes NASIM-Modell kann sowohl im Stand-Alone Modus als auch automatisiert auf einem Server betrieben werden.

Als kontinuierlich simulierendes Modell benötigt NASIM Startbedingungen, die von Delft-FEWS als vordefinierte Standard-Zustände (cold states) und von NASIM abgespeicherte Zustände (warm states) verwaltet. Letztere besitzen einen expliziten Zeitstempel. Eine Unterbrechung und Wiederaufnahme der Simulation zu beliebigen Zeitpunkten innerhalb des Abflussgeschehens ermöglicht einen flexiblen und kontinuierlichen Betrieb des Vorhersagemodells.



**Abbildung 3:** Visualisierung der Radar-Daten im Grid-Format im Spatial Display von Delft FEWS



**Abbildung 4:** Statistische Auswertung der Berechnungsergebnisse mit der Ensemble Vorhersage Cosmo-Leps.

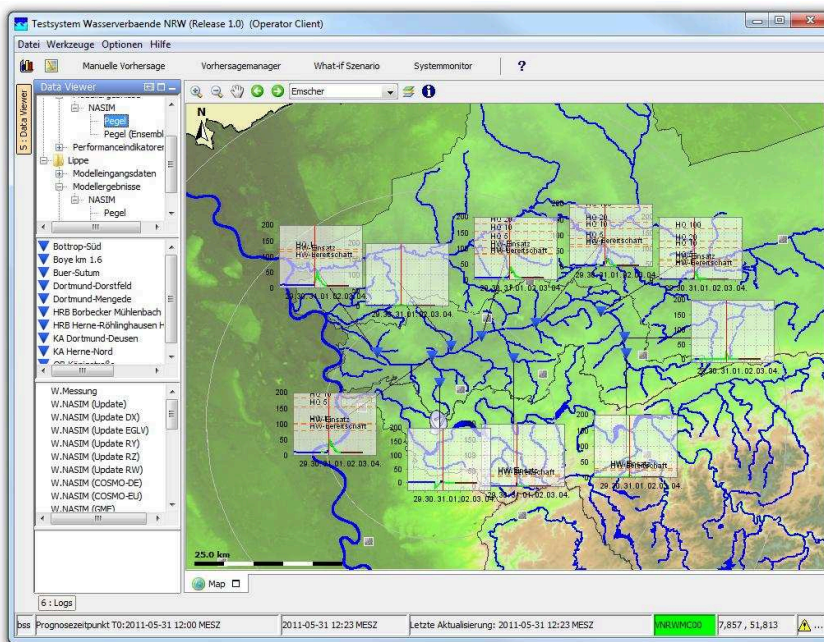
Damit ist eine tägliche Modellprüfung und -anpassung an aktuelle Abflussbedingungen im Gebiet sowie eine optimale Modellnachführung möglich. Die konfigurierten Workflows zur kontinuierlichen Abflussvorhersage lassen sich zusätzlich anhand von What-if-Szenarien modifizieren. Eine effiziente Verbesserung der aktuellen Vorhersagegüte kann prinzipiell über die Manipulation von Anfangsbedingungen erreicht werden. Dies ist zurzeit über die NASIM-GUI möglich. In weiteren Entwicklungsschritten soll diese Funktionalität über den Modelladapter Delft-FEWS/NASIM unter Nutzung von OpenDA verfügbar gemacht werden. Die Anwender können alle Ein- und Ausgangsdaten darstellen, vergleichen und mithilfe integrierter Berechnungen Fehlerkorrekturen durchführen (Abbildung 4). Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Daten



sind so auf einen Blick erkennbar. Die Modellgüte wird wie oben beschrieben mit Hilfe verschiedener Parameter dargestellt.

## 8 Projektbeispiele

In Kooperation zwischen Hydrotec und Deltares sind eine Reihe von Delft-FEWS/NASIM-Anwendungen entstanden: (i) Vorhersagesystem für die Stepenitz in Brandenburg, im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, Brandenburg, (ii) Vorhersagesystem für die obere Lippe, im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, NRW, (iii) Vorhersageplattform der Wasserverbände in NRW. Weitere Systeme unter Einsatz von Modellen Dritter sind (iv) Vorhersagesystem zur Abflussvorhersage, im Auftrag von Verbund Österreich und (v) System zur Niedrigwasservorhersage an der Donau in Österreich, in Auftrag der Via Donau.



**Abbildung 5:** Darstellung der Pegel an der Emscher mit integrierten Zeitreihen-Grafiken

Für die fünf Wasserverbände Emschergenossenschaft/Lippeverband (EG/LV), Ruhrverband (RV), Wupperverband (WV) und Wasserverband Eifel-Rur (WVER) haben Deltares und Hydrotec eine Delft-FEWS entwickelt. Neben der Analyse und Auswertung gemeinschaftlich genutzter wasserwirtschaftlicher und meteorologischer Daten (DWD) wird die Plattform von EG/LV zur Abflussvorhersage im Verbandsgebiet genutzt (Abbildung 5). Die Plattform ist als Client-Server-System realisiert. Das Produktiv-System wird zentral von EG/LV betrieben. Ein identisches System zum Testen von Software- und Konfigurationsupda-

tes ist bei Hydrotec installiert. Die Anwender können mit Ihren Clients (Delft-FEWS-Installationen auf Arbeitsplatzrechnern) zur Steigerung der Ausfallsicherheit auf beide Server-Systeme über das Internet zugreifen. Ein spezielles User-Management lenkt den Zugriff jedes Verbandes auf bestimmte Systembereiche und weist Nutzern innerhalb eines Verbandes verschiedene Funktionsebenen mit unterschiedlichen Rechten, angepassten Funktionsleisten und Datenansichten zu.

In diesem Projekt sind enorme Datenmengen vom Delft-FEWS-Server zu verarbeiten. Durch Komprimierung und inkrementelle Übertragung werden die Daten der über zehn integrierten, zeitlich und räumlich hochaufgelösten Radardatenprodukte des DWD stark reduziert. Das System führt automatisierte, tägliche Routine- und Vorhersagesimulationen mit unterschiedlichen Produkten durch. Es bereitet kontinuierlich ausgewählte Informationen automatisch auf und stellt sie im Intranet und auf Internetseiten der Verbände zur Verfügung.

## 9 Literatur

- Buchholz, O.; Schwanenberg, D.; Sommer, B. (2011): Anforderungen an Hochwasservorhersagesysteme. Erfahrungen mit dem Softwaresystem DELFT-FEWS. In: Korrespondenz Wasserwirtschaft, Nr. 10, S. 564 - 568
- Casper, M.; Herbst, M.; Grundmann, J.; Buchholz, O.; Bliedernicht, J. (2009): Einfluss der Niederschlagsvariabilität auf die Simulation extremer Abflüsse in kleinen Einzugsgebieten, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 53. Jahrgang Heft 3 Juni 2009.
- Casper, M.; DWA-Arbeitsgruppe HW-4.2 (2010): Abflüsse aus extremen Niederschlägen. Ergebnisse einer Bestandsaufnahme: Hochwasserereignisse und Modellansätze zu ihrer Abbildung, DWA-Themen, Juli 2010, Hennef.
- Hydrotec (2012): Niederschlag-Abfluss-Modell NASIM, Dokumentation, Version. 4.1, Aachen, [<http://www2.hydrotec.de/vertrieb/nasim/>].
- Maniak, U.; DWA-Arbeitsgruppe HW-4.1 (2009): Modelle zur operationellen Hochwasservorhersage, DWA-Themen, Juli 2009, Hennef
- Werner, M.; Schwanenberg, D. (2005): Operational Flood Forecasting - Examples from current projects in the Netherlands and England. Niederschlag-Abfluss-Modellierung zur Verlängerung des Vorhersagezeitraumes operationeller Wasserstands- und Abflussvorhersagen, BfG Kolloquium, 27. September 2005, Koblenz.
- Werner, M.; J. Schellenkens; P. Gijbers; M. van Dijk, O. van den Akker, K. Heynert (2012): The Delft-FEWS flow forecasting system, Environmental Modelling & Software, in Press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.07.010>

Autoren:

Dr. Ing. Oliver Buchholz  
Dipl.-Ing. Benedikt Sommer

Dr.-Ing. Dirk Schwanenberg

Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser  
und Umwelt mbH  
Bachstraße 62-64  
52066 Aachen

Deltares,  
Abt. Operational Water Management  
2600 MH Delft  
The Netherlands

Tel.: +49 241 94689-0  
Fax: +49 241 506889  
E-Mail: [o.buchholz@hydrotec.de](mailto:o.buchholz@hydrotec.de)  
[b.sommer@hydrotec.de](mailto:b.sommer@hydrotec.de)

Tel.: +31 88 3358447  
Fax: +31 88 3358582  
E-Mail: [dirk.schwanenberg@deltares.nl](mailto:dirk.schwanenberg@deltares.nl)