

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Buchholz, Oliver; Haberl, Ulrich; Frey, Simon; Smoorenburg, Marten; Becker, Bernhard; Patzke, Simone; Burkamp, Hendrik**

## **Entwicklung eines Abstautools für das Entscheidungshilfesystem der Stauraumsteuerung an der österreichischen Drau**

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/20.500.11970/107075>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Buchholz, Oliver; Haberl, Ulrich; Frey, Simon; Smoorenburg, Marten; Becker, Bernhard; Patzke, Simone; Burkamp, Hendrik (2020): Entwicklung eines Abstautools für das Entscheidungshilfesystem der Stauraumsteuerung an der österreichischen Drau. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Interdisziplinärer Wasserbau im digitalen Wandel. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 63. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 319-328.

### **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.



# Entwicklung eines Abstautools für das Entscheidungshilfesystem der Staurationsteuerung an der österreichischen Drau

Oliver Buchholz, Ulrich Haberl,  
Simon Frey, Maarten Smoorenburg,  
Bernhard Becker, Simone Patzke, Hendrik Burkamp

An der Drau in Österreich wurde von VERBUND Trading GmbH für die Staustufenkette der VERBUND Hydro Power ein vorhersagebasiertes, optimiertes Decision Support System implementiert, das Ziele der Gewässerökologie, des Hochwasserschutzes und der Energieerzeugung gleichermaßen verfolgt. Die Umsetzung erfolgte mit RTC-Tools 2 unter dem Delft-FEWS Vorhersagesystem PROVIS. Neben dem Abstau nach Wehrbetriebsordnung umfasst die Anwendung auch den Wiederaufstau nach Ereignisende.

Stichworte: RTC-Tools 2, Vorhersagebasierte Optimierung, Hochwasserschutz, Delft-FEWS

## 1 Projektgrundlagen

Die VERBUND Hydro Power GmbH (VHP) betreibt an der Drau, von Paternion bis zur Grenze zu Slowenien, eine Staustufenkette mit zehn Kraftwerken auf einer Strecke von ca. 150 km. Bei der Energieerzeugung sind Vorgaben des Hochwasserschutzes und der Gewässerökologie einzuhalten - eine Optimierungsaufgabe unter konkurrierenden Zielen.

Der Gebirgsfluss Drau besitzt ein steiles Einzugsgebiet mit schnell reagierendem Abflussverhalten und sehr geringen Reaktionszeiten bei Hochwasser.

Wesentliches Element des Hochwasserschutzes an der Drau ist die Vorabsenkung des Wasserspiegels in den Staustufen, um eine Hochwasserwelle

aufzunehmen und zu dämpfen. Der Abstau an der Drau sollte unter Beachtung aller Sicherheitsaspekte und Rahmenbedingungen möglichst spät und gleichmäßig erfolgen, um die Fischhabitats in den Speicherseen so wenig wie möglich zu beeinträchtigen. Dabei darf der Abstau an sich keine Hochwasserwelle auslösen und darf sich nicht mit der prognostizierten Hochwasserwelle überlagern.

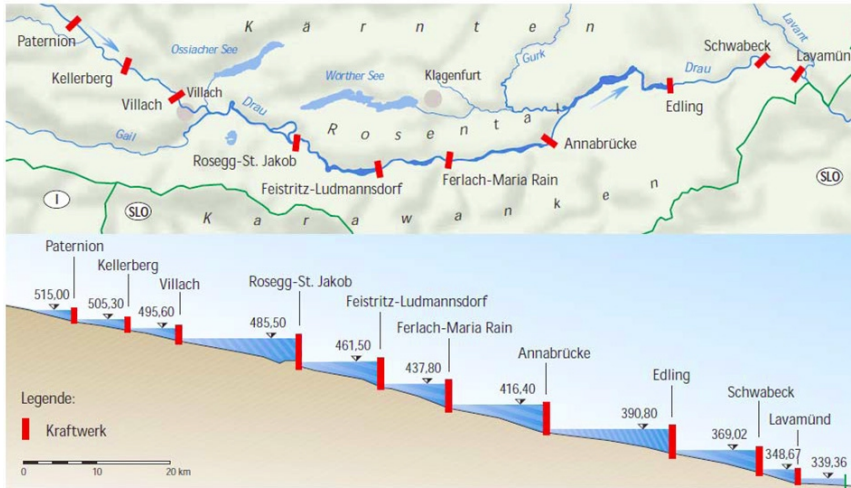


Abbildung 1: Staukette der Drau (Grafik: VERBUND)

Die Abstauregelung ist in der Wehrbetriebsordnung (WBO 2014) festgelegt. Die Absenkung wird durch die Zufluss-Prognosen für das Kraftwerk (KW) Rosegg-St. Jakob sowie für das KW Edling ausgelöst. Dabei werden auch laterale Zuflüsse zur KW-Kette erfasst. Randbedingungen für eine optimierte Vorabsenkung ergeben sich aus der WBO wie folgt:

- Max. Absenkgeschwindigkeit von 0,30 m/h
- Absenkziele in Abhängigkeit der prognostizierten Durchflüsse,
- Der gesteuerte HW-Abfluss darf in Lavamünd nicht höher sein als das natürliche Hochwasserereignis in Lavamünd.

Auf Grund der Prognoseunsicherheiten werden noch folgende vom Nutzer variabel gestaltbare Ziele definiert:

- Beendigung der Absenkung 12 h vor Eintritt des maximalen Prognose-scheitels in Edling

- Beginn des Wiederaufstaus frühestens 6 Stunden nach Erreichen der maximalen Absenkung
- Möglichst Minimierung des HW-Abflusses durch Staustufensteuerung auf 1.500 m<sup>3</sup>/s in Lavamünd.

Für die Beurteilung der Hochwassersituation an der Drau-Staukette setzen die Mitarbeiter von VERBUND das System PROVIS und das darin integrierte Abstau-Werkzeug zur Entscheidungsunterstützung ein. PROVIS basiert auf einem operationellen Delft-FEWS-Vorhersagesystem (Werner et al. 2013), das als Datenintegrations- und Simulationsschale alle operationellen Prozesse automatisiert durchführt. Prognosezuflüsse auf Basis numerischer Wettervorhersagemodelle (INCA, ECMWF, ALARO, AROME, RACE, GEM und GFS) werden mit dem hydrologischen Modell COSERO kontinuierlich berechnet. Veränderliche Größen (Wasserstand  $W$ , Abfluss  $Q$ ) und Betriebszustände in den Staustufen, an den Wehranlagen und Turbinen werden kontinuierlich gemessen.

## 2 Abstau-Werkzeug

Das Abstau-Werkzeug wurde 2018 auf Basis von RTC-Tools 2 (Schwanenberg et al. 2015) entwickelt und befindet sich seitdem erfolgreich für den Abstau im Einsatz. Die vorhersagebasierte Optimierung unter RTC Tools 2 liefert simulierte  $W$ - und  $Q$ -Werte für alle sieben optimierten Speicher passend zum gewählten Abstauszenario und gibt damit eine Abstauempfehlung. Der anschließende Wiederaufstau und der dadurch erreichbare HW-Schutzes in Lavamünd ist Gegenstand der aktuellen Entwicklungen und befindet sich in der Testphase.

RTC-Tools 2 ist eine Open Source Toolbox zur vorhersagebasierten Steuerung und Optimierung von hydraulischen Systemen unter konkurrierenden Zielgrößen. Bei der mathematischen Implementierung wurde Wert auf stabile, konsistente und konvergierende Lösungen gelegt. RTC-Tools bietet verschiedene Möglichkeiten zur Berücksichtigung von nichtlinearen Zusammenhängen. Die Modellstruktur des hydraulischen Systems wird über ein Ersatzsystem in der Programmiersprache Modelica abgebildet und parametrisiert. Die Beschreibung des Optimierungsproblems selbst, also die Definition der Zielvariablen und Zielfunktion sowie die Priorisierung der

Zielvereinbarungen erfolgen in einem Python-Skript. Auch der Aufruf des RTC-Tools 2 Packages und des eigentlichen Solvers erfolgen über Python.

Die Staustufen werden im System über eine Volumen-Wasserstands-Beziehung mit minimalen und maximalen Speicherfüllständen parametrisiert.

Es wurden sechs Zielfunktionen implementiert, wobei die Reihung der Ziele ihre Priorität angibt. Sind Ziele auf einer Prioritätsstufe definiert, können zur weiteren Differenzierung Gewichte verteilt werden.

- Z1: Bis zum Zeitpunkt 6 Stunden nach „Ende Abstau“ darf der WSP nur sinken oder gehalten werden, danach darf wieder aufgestaut werden.
- Z2: Für Lavamünd gilt: Der gesteuerte Abfluss darf nicht größer als das Minimum vom natürlichen HW-Abfluss oder 1.500 m<sup>3</sup>/s sein und für den Wiederaufstau nicht geringer als die Turbinenkapazität.
- Z3: Bis zum „Ende Abstau“ darf der WSP sich zwischen dem letzten Messwert und dem Absenkziel bewegen. Bis Anfang Wiederaufstau wird das Absenkziel gehalten, danach Aufstau bis zum Stauziel.
- Z4: Begrenzung der Absenkgeschwindigkeit auf 30 cm pro Stunde für alle Speicher bis zum Ende der Simulation.
- Z5.1: Der Abstau soll möglichst spät beginnen, der Wiederaufstau soll möglichst früh starten. (25% Gewichtung)
- Z5.2: Die Turbinenkapazität soll möglichst gut ausgenutzt werden. (75% Gewichtung)

Die Ziele unterteilen den Prognosezeitraum in drei Phasen:

1. Beginn der Prognose bis zwölf Stunden vor dem Hochwasserscheitel. Zu diesem Zeitpunkt – „Ende Abstau“ genannt – muss der Zielwasserstand Absenkziel erreicht sein. Die Länge des Zeitraums bis zum „Ende Abstau“ kann vom Anwender manuell übersteuert werden.
2. „Ende Abstau“ plus sechs Stunden. So lange muss das Absenkziel mindestens gehalten werden. Die Länge des Zeitraums bis zum „Anfang Wiederaufstau“ kann vom Anwender ebenfalls manuell übersteuert werden.
3. „Anfang Wiederaufstau“ bis Ende der Prognose. Während dieses Zeitraums möglichst das maximale Stauziel zu erreichen und der Abfluss in Lavamünd unter 1.500m<sup>3</sup>/s zu halten.

Das erste Optimierungsziel gibt vor, dass die Absenkgeschwindigkeit in Phase 1 und 2 kleiner als Null sein muss. In Kombination mit Ziel 4 bedeutet das, dass vor Phase 3 nur eine Absenkung bis  $-0,3$  m/h stattfinden darf und der Wasserpegel nicht steigen kann. Danach werden auch positive Absenkgeschwindigkeiten erlaubt, der Wiederaufstau kann beginnen.

Im zweiten Optimierungsziel werden Aspekte des Hochwasserschutzes und des Naturschutzes formuliert. Hier wird zunächst der maximale Abfluss des natürlichen Hochwassers in der Drau ermittelt. Dieser Abfluss darf durch Steuereinflüsse nicht erhöht werden. Darauf folgt eine Abfrage, die das Minimum aus diesem Wert und den nicht zu überschreitenden  $1.500$  m<sup>3</sup>/s bildet und dieses als Obergrenze für die Abgabe aus dem letzten Kraftwerk Lavamünd vorgibt. Zuletzt wird für Phase 3 eine minimale Abgabe in Lavamünd definiert, die der Turbinenkapazität des Kraftwerks entspricht. Damit soll sichergestellt werden, dass ein zu schneller Wiederaufstau die Drau unterhalb der Kraftwerkskette nicht temporär trockenlegen kann.

Die Vorgabe, auf welche Wasserstände gesteuert werden, d.h. was das Abstau-Werkzeug letztendlich anstrebt, wird in den Zielen 3 und 5.1 formuliert. Für die einzelnen Phasen ergeben sich die Wasserstände wie folgt:

1. Hier wird zunächst der letzte Messwert des Oberwassers des jeweiligen Kraftwerks bis zum Zeitpunkt „Ende Abstau“ konstant extrapoliert.
2. Danach wird das Absenkziel laut Wehrbetriebsordnung vorgegeben.
3. Zuletzt wird das Stauziel für den normalen Betrieb der Kraftwerke vorgegeben.

Damit wird dem Abstau-Werkzeug durch Ziel 3 in Phase 1 ein Spielraum vom letzten Messwert bis zum Absenkziel gesetzt, in dem es sich bewegen darf. Ziel 5.1 sorgt dabei dafür, dass der Messwert so lange wie möglich vor Erreichen des Absenkziels gehalten werden soll. In Phase 2 kann das Abstau-Werkzeug lediglich das Absenkziel einhalten, bevor es in Phase 3 wieder auf das Stauziel fahren muss.

Das letzte Ziel sorgt dafür, dass der Abstau vorrangig mit der aktuellen Turbinenkapazität erfolgt, um auch den Aspekt der Energiegewinnung nicht zu vernachlässigen. Ohne diese Vorgabe würde das Abstau-Werkzeug die Absenkabgabe deutlich höher ermitteln. Im Vergleich zum Hochwasserschutz ist die Priorisierung dieser Fragestellung allerdings nachrangig. Die

aktuelle Turbinenkapazität ist (z.B. im Falle einer Revision) für jedes Kraftwerk vom Anwender manuell einstellbar.

RTC-Tools 2 arbeitet die Optimierungsziele schrittweise in der Folge ihrer Prioritäten ab. Das Ergebnis einer Optimierung wird in der darauf folgenden Stufe als Nebenbedingung (constraint) vorgegeben. Die letzten beiden Ziele 5.1 und 5.2 werden innerhalb eines Optimierungslaufs abgehandelt. Würde man Ziel 5.2 in einem separaten Optimierungslauf auf Stufe 6 berechnen, wäre infolge der Optimierung auf Ziel 5.1 kein Spielraum mehr, um das Endergebnis noch zu beeinflussen. Ziele auf derselben Ebene werden gleichzeitig berücksichtigt und können mit Gewichten gegeneinander abgewogen werden. Hier konnte eine Berücksichtigung der Turbinenkapazität erzielt werden, indem der Zeitpunkt des Abstaubeginns geringfügig weiter nach vorne rückt.

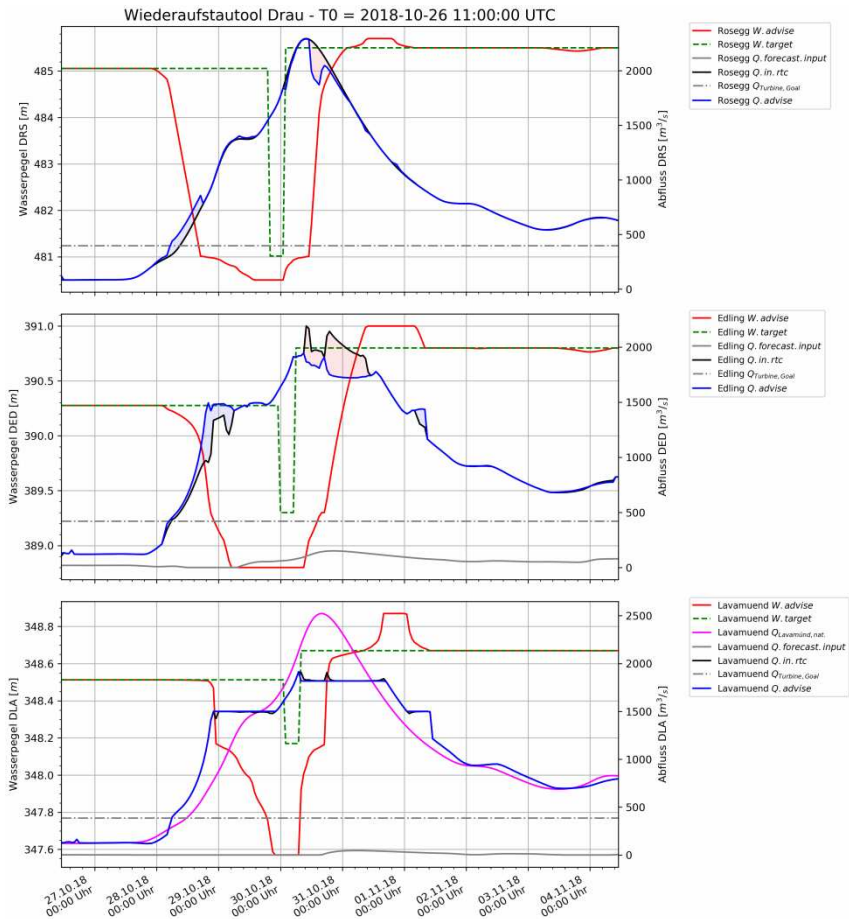
### 3 Anwendung des Abstau-Werkzeugs

#### 3.1 Das Ereignis im Oktober 2018

Ende Oktober 2018 kam es an der Drau zu einem zweigipfligen Hochwasserereignis, welches in der Größenordnung eines HQ10 bis HQ30 lag. Dieses wurde im Verlauf der Staukette auf ein HQ7 retendiert (Moser et al. 2018). Die Reduktion des Hochwasserscheitels geschah dabei von  $2.090 \text{ m}^3/\text{s}$  auf  $1.582 \text{ m}^3/\text{s}$  in Lavamünd. Anhand dieses Ereignisses soll nun das Abstau-Werkzeug vorgestellt werden.

#### 3.2 Optimierungsergebnis für das HW 2018

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse einer Optimierung für die Prognose vom 26.10.2018 um 13:00 Uhr (Angabe in MESZ, Delft-FEWS rechnet intern in UTC) für die beiden größten Staustufen Rosegg und Edling sowie Lavamünd, die letzte Staustufe der Kraftwerkskette. Die Zielwasserstände sind in grün, die Turbinenkapazität in grau gestrichelt eingetragen. Der Zufluss in die jeweilige Staustufe ist schwarz, laterale Zuflüsse werden in grau dargestellt. Das eigentliche Ergebnis der Berechnung sind die gefahrenen Wasserstände und Durchflüsse in rot bzw. blau. Sie stellen den unter allen in Kapitel 2 genannten Zielen optimalen Betriebszustand dar. Die Differenzen im Zu- und Abfluss sind blau für Abstau und rot für Wiederaufstau eingefärbt. Die magentafarbene Linie zeigt die vom COSERO-Modell errechnete natürliche Ganglinie des Hochwassers.



**Abbildung 2:** Optimierte Steuerung des HW 2018 für Staustufen Rosegg, Edling und Lavamünd

Anhand der Grafiken ist gut zu erkennen, wie das Modell der Kraftwerkskette den Abstau nutzt, um Stauraum für die Retention zu gewinnen. Die blauen Flächen zeigen dabei auf, wo der Abfluss vor dem Scheitel erhöht werden kann, um ihn später zurückzuhalten. Mit dem Erreichen des Zeitpunktes „Anfang Wiederaufstau“ werden dann die Stauräume gefüllt, wodurch eine Reduktion des Hochwasserscheitels von 2.537 m<sup>3</sup>/s bis auf 1.912 m<sup>3</sup>/s



realisiert werden kann. Langfristig sinkt der Abfluss danach sogar bis auf  $1.817 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Die Grafik zeigt allerdings auch, dass der Retentionsraum in der Speicherkette nicht ausreicht, um das prognostizierte Hochwasser auf  $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$  zu limitieren. Auch die Unterschreitung des von der Wehrbetriebsordnung vorgegebenen Absenkziels  $348,17 \text{ m}$  um  $60 \text{ cm}$ , konnte nicht genügend Rückhalteraum schaffen. Das Tool nutzt hierbei die maximal erlaubten Minimal- und Maximalwasser-pegel laut Wehrbetriebsordnung voll aus (zu sehen am 30.10. und 01.11.).

## 4 Fazit

Das Entscheidungsunterstützungssystem für die Drau wurde um ein Abstau-Tool erweitert, das mit Hilfe des Optimierungsprogramms RTC-Tools eine optimale Steuerung der Wehre bestimmt. Damit lassen sich die verschiedenen Vorgaben und Ziele aus Hochwasserschutz, Ökologie und Energieerzeugung mit ihren jeweiligen Prioritäten unter den jeweils aktuell vorliegenden hydrologischen Randbedingungen (Prognosen) in der Wehrsteuerung optimal berücksichtigen.

Es wurde gezeigt, dass das Abstau-Tool selbst bei einem extremen Ereignis, wie es die Prognose vom 26.10.2018 vorausgesagt hat, eine optimale Betriebsstrategie der Kraftwerkskette realisieren kann. Zwar wurde das Hochwasser im Modell nicht bis auf den maximal zulässigen Abfluss begrenzt, jedoch konnte der Abfluss unter Einhaltung aller relevanten Vorgaben eine deutliche Reduktion erfahren.

Zusätzlich ist festzustellen, dass das gemessene Hochwasserereignis deutlich kleiner als die für die Optimierungsrechnung verwendete Prognose war. Hier wird die Schwierigkeit der vorhersagebasierten Steuerungsoptimierung deutlich: Die Güte der Prognose bestimmt maßgeblich die Güte der Optimierung.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Absenkung in den Stauräumen Rosegg und Edling auf Basis einer behördlichen Sonderauflage  $2 \text{ m}$  bzw.  $3 \text{ m}$  tiefer ausfiel als das Absenkziel laut WBO vorsah. Die Möglichkeit der manuellen Übersteuerung des Absenkziels durch den Anwender ist eine von mehreren Weiterentwicklungen, die noch für das Abstau-Werkzeug vorgesehen sind.

Die Optimierung wird mit weiteren Hochwasserereignissen getestet. Dazu gehören zum einen zweigipflige Hochwasser, bei denen die Ermittlung der Hochwasserscheitel und damit das Verhalten der Zielermittlung im Hinblick auf verschiedene Abstauzeitpunkte analysiert wird. Zum anderen werden auch Hochwasser unterhalb der 1.500 m<sup>3</sup>/s Marke berechnet, um zu sehen, wie diese unter energiewirtschaftlichen Aspekten effektiv retendiert werden können. Mit diesen Untersuchungen soll sichergestellt werden, dass das Abstau-Werkzeug den verschiedenen Anforderungen aus Hochwasserschutz, Naturschutz und Energiewirtschaft gewachsen ist und kein Hochwasser die Kraftwerksbetreiber vor unvorhersehbare Probleme stellt.

## 5 Literatur

- Moser et al. (2018). Hydrologischer Bericht (Erstbericht), Hochwasserereignis an der Drau, Möll, Gail und Zubringern, 28. - 31.10.2018. Amt der Kärntner Landesregierung.
- Schwanenberg, D.; Becker, B. P. J.; Xu, M. (2015): The Open RTC-Tools Software framework for Modeling Real-Time Control in Water Resources Systems. *Journal of Hydroinformatics* Jg. 17 (2015) Nr. 1 S. 130–148. DOI: 10.2166/hydro.2014.046.
- WBO (2014): Kraftwerkskette Drau, Wehrbetriebsordnung, Bescheid vom 29.12.2014, nicht veröffentlicht, Verbund Hydro Power GmbH
- Werner, M.; Schellekens, J.; Gijsbers, P.; van Dijk, M.; van den Akker, O.; Heynert, K. (2013): The Delft-FEWS flow forecasting system. *Environmental Modelling & Software* Jg. 40 (2013) S. 65–77. DOI: 10.1016/j.envsoft.2012.07.010.

Autoren:

Dr. Oliver Buchholz  
Simone Patzke  
Hendrik Burkamp

Ulrich Haberl  
Dr. Simon Frey

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

VERBUND Trading GmbH  
Am Hof 6A  
A-1010 Wien

Tel.: +49 241 94689-0  
Fax: +49 241 94689-915

Tel.: +43 50313-523-0  
Fax: +43 50313-51099

E-Mail:  
oliver.buchholz@hydrotec.de  
simone.patzke@hydrotec.de  
hendrik.burkamp@hydrotec.de

E-Mail:  
ulrich.haberl@verbund.com  
simon.frey@verbund.com

Dr. Maarten Smoorenburg  
Dr. Bernhard Becker

Deltares  
Office Delft  
Boussinesqweg 1  
NL-2629 HV Delft

Tel.: +31 88 335-8137  
Fax: +31 88 335-8582

E-Mail:  
maarten.smoorenburg@deltares.nl  
bernhard.becker@deltares.nl