

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Becker, Bernhard; Domhof, Boyan; van Heeringen, Klaas-Jan; Talsma, Jan; Knot, Floris; Schenkel, Jannes**

## **Vorhersage- und modellbasierter Betrieb von küstennahen Schöpfwerken in den Niederlanden**

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/20.500.11970/107533>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Becker, Bernhard; Domhof, Boyan; van Heeringen, Klaas-Jan; Talsma, Jan; Knot, Floris; Schenkel, Jannes (2021): Vorhersage- und modellbasierter Betrieb von küstennahen Schöpfwerken in den Niederlanden. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Wasserbau zwischen Hochwasser und Wassermangel. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 65. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 67-76.

### **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.



# **Vorhersage- und modellbasierter Betrieb von küstennahen Schöpfwerken in den Niederlanden**

Bernhard Becker  
Boyan Domhof  
Klaas-Jan van Heeringen  
Jan Talsma  
Floris Knot  
Jannes Schenkel

Ein Großteil der Niederlande ist sogenanntes Poldergebiet, das mit Hilfe von Schöpfwerken entwässert wird. Bei den niederländischen Wasserverbänden haben sich operative Entscheidungsunterstützungssysteme etabliert. Nachhaltiger und klimaneutraler Wasserwirtschaft werden als strategische Ziele immer wichtiger, und die Trockenphasen der vergangenen Jahre haben gezeigt, dass ein Entwässerungssystem nicht nur zur Wasserableitung, sondern auch die Wasserzufuhr genutzt werden muss. Ursprünglich nur für den Einsatz im Hochwasserfall vorgesehen, werden die operativen Systeme mittlerweile deshalb im täglichen Betrieb eingesetzt. Am Beispiel des Wasserverbands Noorderzijlvest (Groningen) wird in diesem Beitrag ein solches System vorgestellt.

Stichworte: Operative Entscheidungsunterstützung, Schöpfwerk, Vorhersage, Decision Support System, DSS, RTC-Tools, SOBEK, Delft-FEWS

## **1 Einführung**

Ein Großteil der Niederlande ist sogenanntes Poldergebiet, das unter dem Meeresspiegel liegt und deshalb ständig mit Hilfe von Schöpfwerken – früher mit Wind, heute meistens elektrisch angetrieben – entwässert wird. Die Poldergebiete sind darum von kleinen Gräben (niederl. „sloot“) durchzogen. Mit Hilfe der Schöpfwerke wird das Wasser aus diesen Gräben in höher liegende Hauptentwässerungskanäle (niederl. „boezem“) gepumpt. Von

dort kann das Wasser im freien Gefälle in einen Fluss oder ins Meer abfließen (Abbildung 1) oder wird mit Hilfe von größeren Schöpfwerken abgeführt.

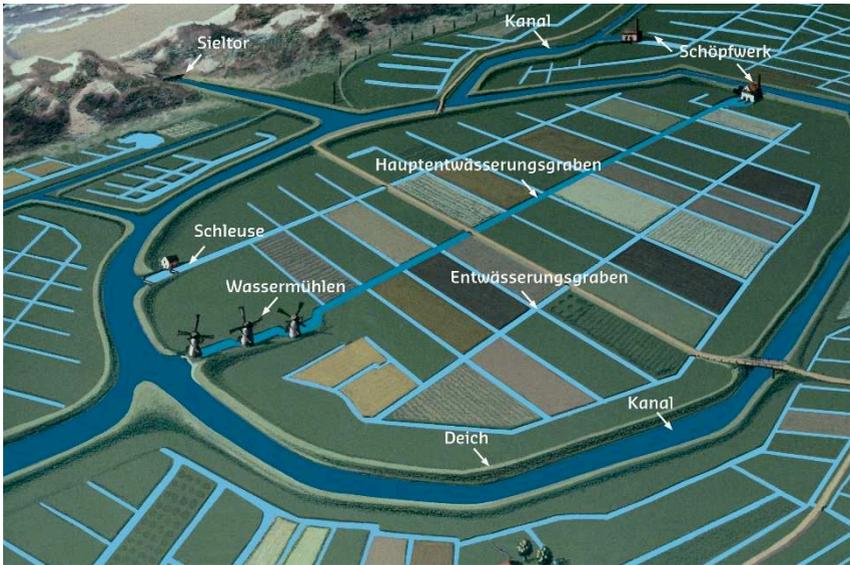


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Polderentwässerung in den Niederlanden mit primären (dunkelblau), sekundären (mittelblau) und tertiären Gewässern (hellblau).

## 2 Einsatz von operativen Systemen in der Wasserwirtschaft

Operative Entscheidungsunterstützungssysteme (engl. „decision support system“, DSS, siehe z. B. Bartussek 2008) sind in den meisten niederländischen Wasserverbänden seit längerem im Einsatz. Ursprünglich war die Aufgabe eines solchen Systems, anzuzeigen, ob und wann mit einer Hochwassersituation zu rechnen ist und den operativen Hochwasserschutz zu unterstützen. Nun werden jedoch nachhaltige und klimaneutrale Wasserwirtschaft als strategische Ziele immer wichtiger (siehe auch Reincke u. a. 2020), und auch die Trockenphasen der vergangenen Jahre haben gezeigt, dass über das Entwässerungssystem nicht nur Wasser abgeleitet, sondern auch zugeführt werden muss (Hendriks u. a. 2013). Ursprünglich nur für

den Einsatz im Hochwasserfall vorgesehen, werden die Entscheidungsunterstützungssysteme deshalb mittlerweile im täglichen Betrieb eingesetzt.

Ein operatives Entscheidungsunterstützungssystem stellt zunächst automatisch die erforderlichen Daten zusammen. In der Regel sind dies Vorhersagen der Wetterdienste für Niederschlag, Wind, Temperatur und Seewasserstand sowie Aufzeichnungen von Niederschlag, Wasserstand, Durchfluss, und Seewasserstand.

Ein Kernelement eines operativen DSS sind hydrologische und hydraulische Computermodelle. Das DSS erstellt bereitet die Vorhersagedaten und Messwerte zu Randbedingungen bzw. Anfangsbedingungen für die Modelle auf und initialisiert automatisch die Modellläufe. Berechnungsergebnisse werden automatisiert nachbearbeitet, um dem Anwender auf einem Blick anzuzeigen, welche Bewirtschaftungssituation zu erwarten ist (muss Wasser abgeführt oder zugeführt werden?). Werden Schwellenwerte über- bzw. unterschritten, gibt das System auch außerhalb der Arbeitszeiten Warnungen per SMS aus.

Das Betriebspersonal kann über das DSS Bewirtschaftungsoptionen durchspielen und die Ergebnisse verschiedener Varianten miteinander vergleichen und so geeignete Bewirtschaftungsmaßnahmen entwickeln. Derzeit werden einige operative Systeme mit Optimierungsmodellen erweitert. Ein Optimierungsmodell ermittelt mit Hilfe eines mathematischen Optimierungsalgorithmus und einem vereinfachten hydraulischen Modell ein optimales Betriebsprotokoll für die Wasserbauwerke, mit der alle Bewirtschaftungsziele unter den gegebenen Randbedingungen (Vorhersage) so gut wie möglich erreicht werden.

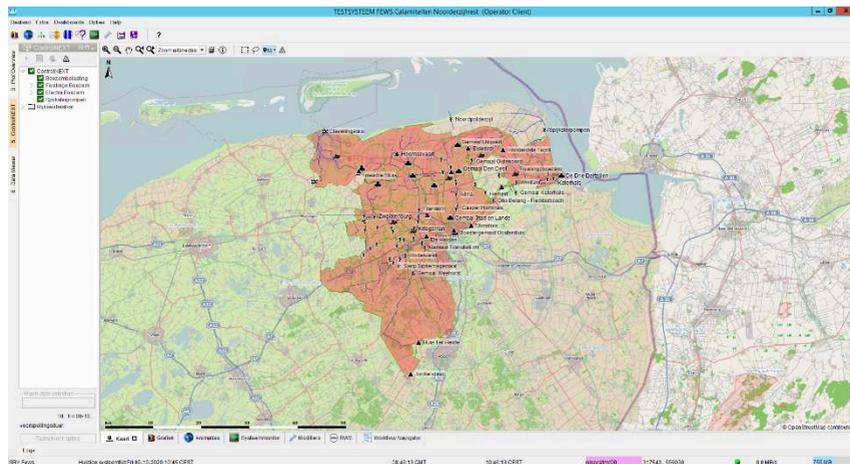
## 3 Beispiel BOS Noorderzijlvest

### 3.1 Überblick

BOS Noorderzijlvest ist der Name des operativen Systems, das vom Wasserverband (Waterschap) Noorderzijlvest betrieben und eingesetzt wird. BOS ist eine Abkürzung für „beslissingsondersteunend systeem“, die niederländische Bezeichnung für ein Entscheidungsunterstützungssystem.

Waterschap Noorderzijlvest ist für ein 144.000 ha großes Verbandsgebiet verantwortlich. Einen Überblick über die Lage des Verbandsgebiets zeigt

Abbildung 2. Primäres Bewirtschaftungsziel ist es, für verschiedene Teileinzugsgebiete den jeweils vorgegebenen Zielwasserstand einzuhalten.



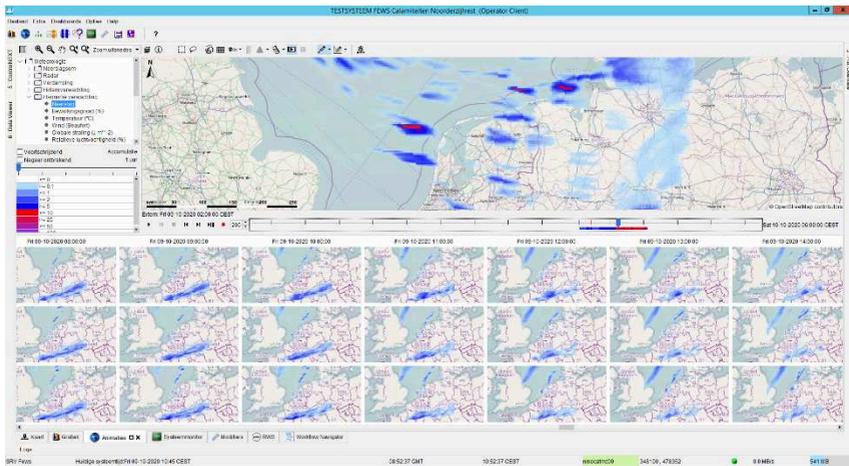
**Abbildung 2:** Gewässernetz des Verbandsgebiets der Waterschap Noorderzijlvest mit Schöpfwerken und Sielbauwerken, hier gezeigt als Bildschirmfoto der Kartenansicht im BOS Noorderzijlvest

Die größten Schöpfwerke sind „H. D. Louwes“ mit einer Kapazität von 1000 m<sup>3</sup> und „De Waterwolf“ (Kapazität 4500 m<sup>3</sup>/min, Waterschap Noorderzijlvest 2021). Gemäß DIN 1184-1 handelt es sich bei diesen um „Schöpfwerke mit Außenspeicherraum zwischen Schöpfwerk und Siel“, der Außenspeicherraum ist das Lauwersmeer. Aus diesem künstlich entstandenen See wird das Wasser bei Tidenniedrigwasser über die Sieltore der Cleveringsluis ins Meer abgeführt. „De Drie Delfzijen“ und „Spijksterpompen“ sind „Schöpfwerke im Hauptdeich, die unmittelbar dem Tidegeschehen ausgesetzt sind“ (DIN 1184-1). Darüber hinaus gibt es noch eine größere Anzahl kleinerer Schöpfwerke im tideunabhängigen Gebiet, die Wasser aus dem Polder den Hauptentwässerungskanälen zuführen.

Das BOS Noorderzijlvest unterstützt das Betriebspersonal bei den täglichen Dienstabläufen. In Trockenzeiten geht es darum, die zum Einhalten der Zielwasserstände notwendige Wasserzufuhr zu realisieren, ohne dass Salzwasser aus dem Meer ins Gewässernetz eingetragen wird. Im Hochwasserfall ist das BOS ein wesentliches Element des operativen Hochwasserschutzes für die Einsatzplanung der Infrastruktur zur Entwässerung (Schöpfwerke, Sieltore).

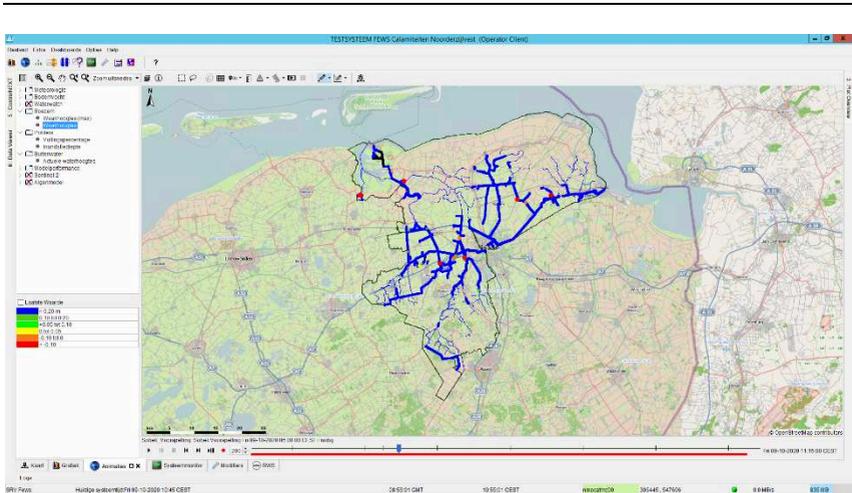
### 3.2 Daten und Modelle

Das BOS Noorderzylvest wurde mit der Software Delft-FEWS (Deltares 2021a; Werner u. a. 2013) realisiert. Es liest Niederschlagsvorhersagen des Niederländischen Wetterdienstes (KNMI), des European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) und des Global Forecast System (GFS) der United States National Centers for Environmental Prediction (Abbildung 3) sowie Messdaten von verschiedenen Messstationen für Niederschlag, Temperatur, Wasserstand und Wind automatisch ein (Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Niederschlagsvorhersage (Niederschlagsradar) für unterschiedliche Zeitpunkte (unten) Animationsfenster (oben), Bildschirmfoto BOS Noorderzylvest

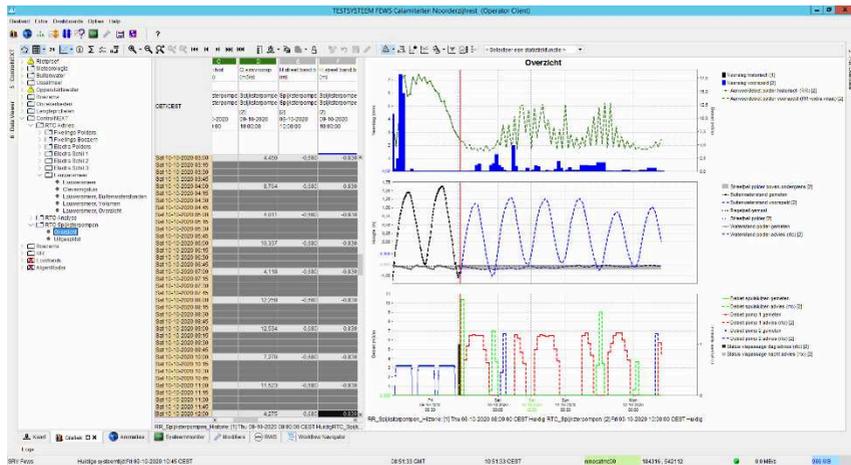
Die hydrologische und hydraulische Modellierung erfolgt mit SOBEK (Deltares 2021b). Für Niederschlag-Abfluss-Prozesse wird das Modul SOBEK-Rainfall Runoff verwendet, die Berechnung der Gerinnehydraulik erfolgt eindimensional mit dem SOBEK-Hydraulikmodul nach dem Stagge-red-Grid-Verfahren. Die SOBEK-Modelle (Abbildung 2) sind nicht nur für Hochwassersituationen, sondern auch auf Trockenzeiten und Zustände mit mittlerer Wasserführung kalibriert. Entsprechend enthält der hydraulische Modellteil Steuerungsregeln (z. B. An- und Ausschaltpegel für Schöpfwerke), die die gesamte Bandbreite zwischen Trockenheit und Hochwasser abdecken. Überflutungsflächen ermittelt das BOS über vorab berechneter Beziehungen.



**Abbildung 4:** Darstellung der mit SOBEK berechneten Wasserstände im BOS Noordzijlvest; Orte, an denen Grenzwerte überschritten werden (hier: unterer Zielwasserstand), sind farblich hervorgehoben.

Das Optimierungsmodell (Talsma u. a. 2014) wurde mit RTC-Tools (Deltares 2021c; Schwanenberg u. a. 2015) realisiert. Das Berechnungsnetz des RTC-Tools-Modells ist dem des SOBEK-Modells ähnlich, hat aber eine viel weniger feine räumliche Auflösung. Während das SOBEK-Modell primär Wasserstände unter den gegebenen Vorhersage-Randbedingungen berechnet, gibt das RTC-Tools-Modell eine Empfehlung für den Betrieb der Schöpfwerke und Sieltore unter Berücksichtigung der wasserwirtschaftlichen und der betrieblichen Zielsetzungen, die zum Teil miteinander konkurrieren. So soll der Wasserstand innerhalb der vorgegebenen Bandbreite liegen, der Betrieb der Entwässerungsinfrastruktur dabei aber unter möglichst geringen Energiekosten erfolgen. Wasser ist also vorzugsweise über Gefälleabfluss abzuführen; wenn Schöpfwerke eingesetzt werden, dann vorzugsweise während der Tidenniedrigwasserphasen. Darüber hinaus sollen Schöpfwerke wenn möglich nur während der normalen Arbeitszeiten eingesetzt werden. Das Optimierungsmodell ermittelt eine auf zukünftige Ereignisse antizipierende Steuerung (Model Predictive Control, siehe z. B. Becker u. a. 2014). Eine typische Maßnahme wäre eine Vorabsenkung des Wasserstands, wenn ein Starkniederschlagsereignis erwartet wird. Die Vorabsenkung liefert zunächst einen besseren Schutz vor Überflutungen, weil mehr Zeit für die Abfuhr des Wassers zur Verfügung steht. Da die Pumpen auch länger im Bereich ihres optimalen Betriebspunktes arbeiten können und Zeiträume mit niedrigen Außenwasserständen ausgenutzt werden (Reincke

& Laude 2017) ist die optimierte Steuerung in der Regel auch energieeffizienter und damit auch kostengünstiger.



**Abbildung 5:** Mit dem Optimierungsmodell (RTC-Tools) berechnete Empfehlung zum Betrieb des Schöpfwerks „Spijksterpompen“ (unten), Außen- und Innenwasserstand (Mitte) sowie Niederschlag und die Umsetzung als Wasserandrang aus dem Polder

Die Abbildung 5 zeigt ein Ergebnis des Optimierungsmodells für den Bauwerkskomplex „Spijksterpompen“, der aus zwei Pumpeinheiten und einem Sieltor besteht. Das obere Diagramm zeigt den Niederschlag, das Diagramm in der Mitte den vorhergesagten Außenwasserstand und den mit dem Optimierungsmodell berechneten Binnenwasserstand. Letzterer ist Ergebnis des optimierten Betriebs (unteres Diagramm). Entwässerung im Gefälleabfluss über das Sieltor ist nur dann möglich, wenn der Binnenwasserstand niedriger als der Außenwasserstand ist. Dementsprechend kann das Optimierungsmodell das Sieltor nur für kleine Zeitfenster nutzen (grüne Linie). Die Pumpen (blau, rot) sind bei niedrigem Außenwasserstand in Betrieb, nicht jedoch Sonntagnacht. Der Binnenwasserstand liegt innerhalb der vorgegebenen Bandbreite (im Diagramm grau hinterlegt).

### 3.3 Benutzerführung

Über das die graphische Benutzeroberfläche des DSS können Anwender verschiedene Einstellungen für die Modellberechnungen vornehmen. Für Schöpfwerke können An- und Ausschaltpegel verändert werden, aber auch die Pumpkapazität lässt sich anpassen, um zum Beispiel Wartungsarbeiten

an einer Pumpeinheit im Modell zu berücksichtigen. Für das Optimierungsmodell können über das DSS Bewirtschaftungsziele wie Bandbreiten des Zielwasserstands gesetzt und die Prioritäten der Bewirtschaftungsziele verändert werden.

Mit dem DSS kann der Anwender die Ergebnisse verschiedener Modellkonfigurationen vergleichen und so verschiedene Bewirtschaftungsmaßnahmen gegeneinander abwägen. Um in Krisensituationen um verschiedene mögliche Szenarien durchzuspielen („Was wäre wenn?“) können auch benutzerdefinierte Niederschlagsdaten eingegeben werden.

Das DSS hat ein Datenarchiv. Archivdaten werden für Analysen, aber auch für Ausbildungszwecke herangezogen. Systemanwender, die noch keine Hochwassersituation miterlebt haben, können sich mit Hilfe des DSS mit dem Verbandsgebiet, dem Gewässersystem mit seiner Entwässerungsinfrastruktur und möglichen kritischen Situationen vertraut machen.

## 4 Ausblick

Gegenwärtig laufende Weiterentwicklungen von operativen Entscheidungsunterstützungssystemen richten sich auf die Vorhersageunsicherheit. Durch Nutzung von Ensemble-Vorhersagen kann die Unsicherheit reduziert werden. Zentrale Fragestellung sind in diesem Zusammenhang die Kommunikation der Unsicherheit und wie diese zusätzliche Information in die Entscheidungsfindung einbezogen werden kann (van Loenen u. a. 2012).

In einem Forschungsprojekt wurde bereits untersucht, inwieweit die Verfügbarkeit von Energie bei der Betriebsoptimierung einfließen kann (Deltares 2021d). Die Grundidee ist es, die Schöpfwerke vorzugsweise dann einzusetzen, wenn ein Energieüberschuss z. B. aus Wind- und Sonnenenergieproduktion zur Verfügung steht. In Zeiten, in denen weniger Energie zur Verfügung steht, dient das Gewässernetz dann quasi als Zwischenspeicher für eine Energienutzung. Neben der Vorhersage der hydrologischen Parameter (Niederschlag) sind dafür auch Vorhersagen der Energieproduktion heranzuziehen.

## 5 Literatur

- Bartussek, S. M. (2008): Ein regelbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem für Maßnahmen zur Gewässerstrukturverbesserung. RWTH Aachen, Fakultät für Bauingenieurwesen, Dissertation. URL: [https://publications.rwth-aachen.de/record/50658/files/Bartussek\\_Sabine.pdf](https://publications.rwth-aachen.de/record/50658/files/Bartussek_Sabine.pdf)
- Becker, B.; Schruoff, T.; Schwanenberg, D. (2014): Modellierung von reaktiver Steuerung und Model Predictive Control (Modelling of reactive control and Model Predictive Control). Dresdner Wasserbaukolloquium 2014, 2014 in Dresden
- Deltares (2021a): Flood forecasting system (Delft-FEWS). URL: <https://www.deltares.nl/en/software/flood-forecasting-system-delft-fews-2/> (Aufruf: 08.01.2021)
- Deltares (2021b): SOBEK Suite. URL: <https://www.deltares.nl/en/software/sobek/> (Aufruf: 08.01.2021)
- Deltares (2021c): RTC-Tools. URL: <https://www.deltares.nl/en/software/rtc-tools/> (Aufruf: 08.01.2021)
- Deltares (2021d): Saving energy with smart pumping. URL: <https://www.deltares.nl/en/news/saving-energy-with-smart-pumping/> (Aufruf: 15.01.2021)
- DIN 1184-1:1992-03: Schöpfwerke/Pumpwerke / Planung, Bau und Betrieb - Teil 1
- Hendriks, D.; Broers, H. P.; van Ek, R.; Hoogewoud, J.; Becker, B. (2013): Spatial and Temporal Distribution of Surface-Subsurface Water Interaction in the Netherlands. *Wasserwirtschaft* 2013 Nr. 4 S. 30–36
- van Loenen, A.; de Jong, M.; Verkade, J.; de Kleermaeker, S. (2012): Operationeel besluiten onder onzekerheid. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA) STOWA 2012-16. URL: <https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PROJECTEN/Projecten%202016/STOWA%202012%2016%20LR.pdf>
- Reincke, H.; Laude, I. (2017): Schöpfwerksbetrieb im Zeichen der Energiewende. *Wasser und Abfall* 2017 Nr. 01–02 S. 16–19
- Reincke, H.; Nicolai, R.; Smidt, H.-J.; Majehrke, G. (2020): Wie wird ein Unterhaltungsverband klimaneutral? *Wasser und Abfall* 2020 Nr. 10 S. 45–51
- 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
- Talsma, J.; Schwanenberg, D.; Gooijer, J.; Heeringen, K.-J.; Becker, B. (2014): Model predictive control for real time operation of hydraulic structures for draining the operational area of the Dutch water authority

Noorderzijvest. HIC 2014 - 11th International Conference on Hydroinformatics, 2014 in New York

Waterschap Noorderzijvest (2021): Gemaal De Waterwolf. URL: <https://www.noorderzijvest.nl/ons-werk/beheer-onderhoud/beheer-bouwwerken/gemalen/gemaal-waterwolf/> (Aufruf: 08.01.2021)

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.-Ing. Bernhard Peter Josef Becker  
ir. Boyan Domhof, MSc.  
ir. Klaas-Jan van Heeringen  
ir. Jan Talsma, MSc.

Deltares  
Boussinesqweg 1  
2629 HV Delft  
Niederlande

Tel.: +31 6 52416736 (B. Becker)  
E-Mail:  
Bernhard.Becker@deltares.nl  
Boyan.Domhof@deltares.nl  
KlaasJan.vanHeeringen@deltares.nl  
Jan.Talsma@deltares.nl

ing. Floris Knot  
ing. Jannes Schenkel

Waterschap Noorderzijvest  
Stedumermaar 1  
9735 AC Groningen  
Niederlande

Tel.: +31503048919 (F. Knot)  
E-Mail:  
f.knot@noorderzijvest.nl  
j.schenkel@noorderzijvest.nl

Dr.-Ing. Bernhard Peter Josef Becker

RWTH Aachen  
Institut für Wasserbau und Wasser-  
wirtschaft  
Mies-van-der-Rohe-Str. 17  
52074 Aachen