

Modellierung von reaktiver Steuerung und Model Predictive Control

Bernhard Becker
Tobias Schruff
Dirk Schwanenberg

Die Modellierung der Echtzeitsteuerung von wasserbaulichen Anlagen wie Wehren, Pumpen und Talsperrensystemen kann als reaktive Steuerung und als prädiktive Steuerung erfolgen. Am Beispiel des Verbandsgebietes des Wasserverbandes Friesland (Niederlande) wird die Funktionsweise der Modellierung reaktiven Steuerung gezeigt. Für das Anwendungsbeispiel der Wasserkraftanlage Salto Grande (Uruguay) wird gezeigt, wie mit prädiktiver Steuerung eine Talsperrensteuerung für konfliktierende Nutzungen optimiert werden kann. Die Bedeutung des Vorhersagezeitraums auf das Ergebnis der prädiktiven Steuerung wird anhand der Ergebnisse ebenfalls aufgezeigt.

Stichworte: Echtzeitsteuerung, real-time control, RTC-Tools, Sobek, OpenMI, model predictive control

1 Einleitung

Weltweit hat der Mensch durch den Bau von beweglichen und unbeweglichen Wasserbauwerken maßgeblich in Gewässersysteme eingegriffen, um Kontrolle über den Wasserkreislauf zu erhalten. Der Betreiber beweglicher Wasserbauwerke will mit dem Betrieb bestimmte Zielvorstellungen realisieren. Bei konkurrierenden Nutzungen ist dies eine oft sehr komplexe Aufgabenstellung. Computermodelle haben sich als nützliche Hilfsmittel für den Betrieb von Gewässersystemen bewiesen. Solche Modelle können sowohl als Planungsinstrument eingesetzt werden, um Steuerungsstrategien für ein Gewässersystem abzuleiten, aber auch im laufenden Betrieb zur Entscheidungsunterstützung herangezogen werden. Dazu muss das Modell in der Lage sein, die Strömungsvorgänge im Gewässersystem ausreichend genau abzubilden und dabei auch den menschlichen Eingriff in Form von Steuerung der Wasserbauwerke erfassen.

Die Steuerung kann reaktiv oder prädiktiv erfolgen. Reaktive Steuerung bedeutet, Entscheidungen des laufenden Betriebs auf Basis des aktuellen Systemzustands zu treffen. Eine prädiktive Steuerung dagegen wird auf Basis einer Vorhersage des Systemzustands getroffen. Ist diese Vorhersage modellbasiert,

spricht man von Model Predictive Control (MPC). Während mit der reaktiven Steuerung im Prinzip erst dann auf ein Ereignis reagiert werden kann, wenn es bereits eingetreten ist, erlaubt die prädiktive Steuerung das zukünftige Ereignis bereits im Voraus zu berücksichtigen und frühzeitig Gegenmaßnahmen einzuleiten.

2 Reaktive Steuerung

2.1 Funktionsweise der reaktiven Steuerung

Reaktive Steuerung basiert auf aktuellen Systemgrößen (Wasserstand, Durchfluss) und externen Größen (aktuelle Niederschlagsprognose). In den meisten Fällen kann eine reaktive Steuerung in Form eines Entscheidungsbaums dargestellt werden. Neben Eingangs- und Ausgangsdaten sind Trigger und Rules die wesentlichen Elemente eines solchen Entscheidungsbaums.

Ein Trigger führt im Wesentlichen die Prüfung einer Bedingung durch. Ein Trigger kann zum Beispiel die Bedingung „ist der Wasserstand größer als 152,0 m?“ auswerten. Das Ergebnis ist entweder „richtig“ oder „falsch“ (true oder false) und führt zur Anwendung unterschiedlicher Betriebsregeln (Rules) oder weiterer Trigger, die an das entsprechende Ergebnis angeschlossen sind. Ein Trigger oder mehrere Trigger bestimmen, wann eine bestimmte Betriebsregel angewendet wird. Eine Betriebsregel (Rule) gibt an, in welchen Betriebszustand ein Bauwerk gestellt wird und gibt zum Beispiel die Schützstellung eines Wehres oder die Pumpleistung eines Pumpwerks zurück.

2.2 Anwendungsbeispiel „Wetterskip Fryslân“

Ein Großteil der Niederlande ist sogenanntes Poldergebiet, das unter dem Meeresspiegel liegt und deshalb ständig mit Hilfe von Pumpwerken – früher mit Windmühlen, heute meistens elektrisch angetrieben – entwässert wird. Der Wasserstand wird konstant gehalten, unter anderem um die mit der Entwässerung verbundenen Setzungen zu begrenzen. Die Poldergebiete sind darum von kleinen Gräben durchzogen. Mit Hilfe der Pumpwerke wird das Wasser in höher liegende Kanäle gepumpt. Von dort kann das Wasser im freien Gefälle über einen Siel oder mit Hilfe eines weiteren Schöpfwerks in einen Fluss oder ins Meer abfließen.

Zur strategischen Maßnahmenplanung und als Unterstützung für den operativen Einsatz hält der Wasserverband „Wetterskip Fryslân“ ein Modellsystem vor. Für das Gewässersystem wird das Strömungsprogramm Sobek (*Stelling and Duinmeijer*, 2003) verwendet. Bisher wurde die Steuerung des Gewässersystems

mithilfe spezieller Features von Bauwerksknoten innerhalb Sobek oder in einem Matlab-Skript modelliert. Nachteilig an diesen Methoden ist, dass das Modell der Steuerung bei komplexen Betriebsvorschriften schnell unübersichtlich wird. Bei der Modellierung der Steuerung mit Sobek kommt hinzu, dass nicht alle benötigten Betriebsregeln und Entscheidungsvorgänge modelliert werden können.

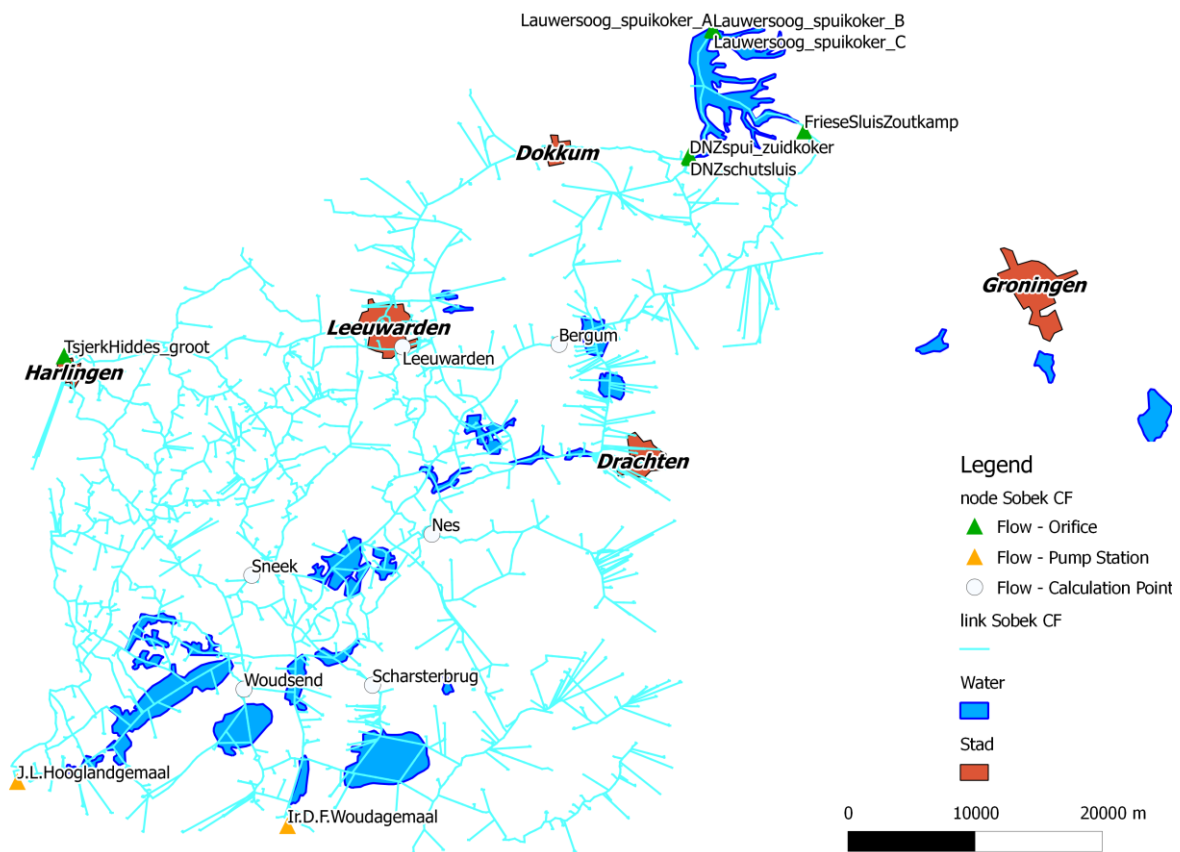


Abbildung 1: Sobek-Modell des Gewässernetzes im Verbandsgebiet der Wetterskip Fryslân mit den Sielen „Tsjerk Hiddesluis“, „Dokkumer Nieuwe Zijlen“ (DNZ), „Friese Sluis“ und den Schöpfwerken „Hooglandgemaal“ und „Woudage-maal“ (Becker, 2013)

Im Modellkonzept einer neuen Modellgeneration wird für die Strömung weiterhin Sobek verwendet, während die menschlichen Einwirkungen auf das Gewässersystem (die Steuerung) mit dem Programmpaket RTC-Tools (Deltares, 2013) modelliert werden (Becker, 2013). Beide Modelle tauschen während der Computerlaufzeit Daten nach dem OpenMI-Standard (Gregersen et al., 2007) aus. RTC-Tools erhält vom hydraulischen Modell Sobek Wasserstände für bestimmte Punkte im Modellgebiet, berechnet daraus die Steuerung und gibt an das Sobek-Modell dazu eine Schützstellung für die Siele oder den Durchfluss der Schöpfwerke zurück. Für technische Erläuterungen zu diesem gekoppelten Modellsystem wird auf Becker et al. (2013), Becker, Schwanenberg, et al. (2012) und Schwanenberg et al. (2011) verwiesen.

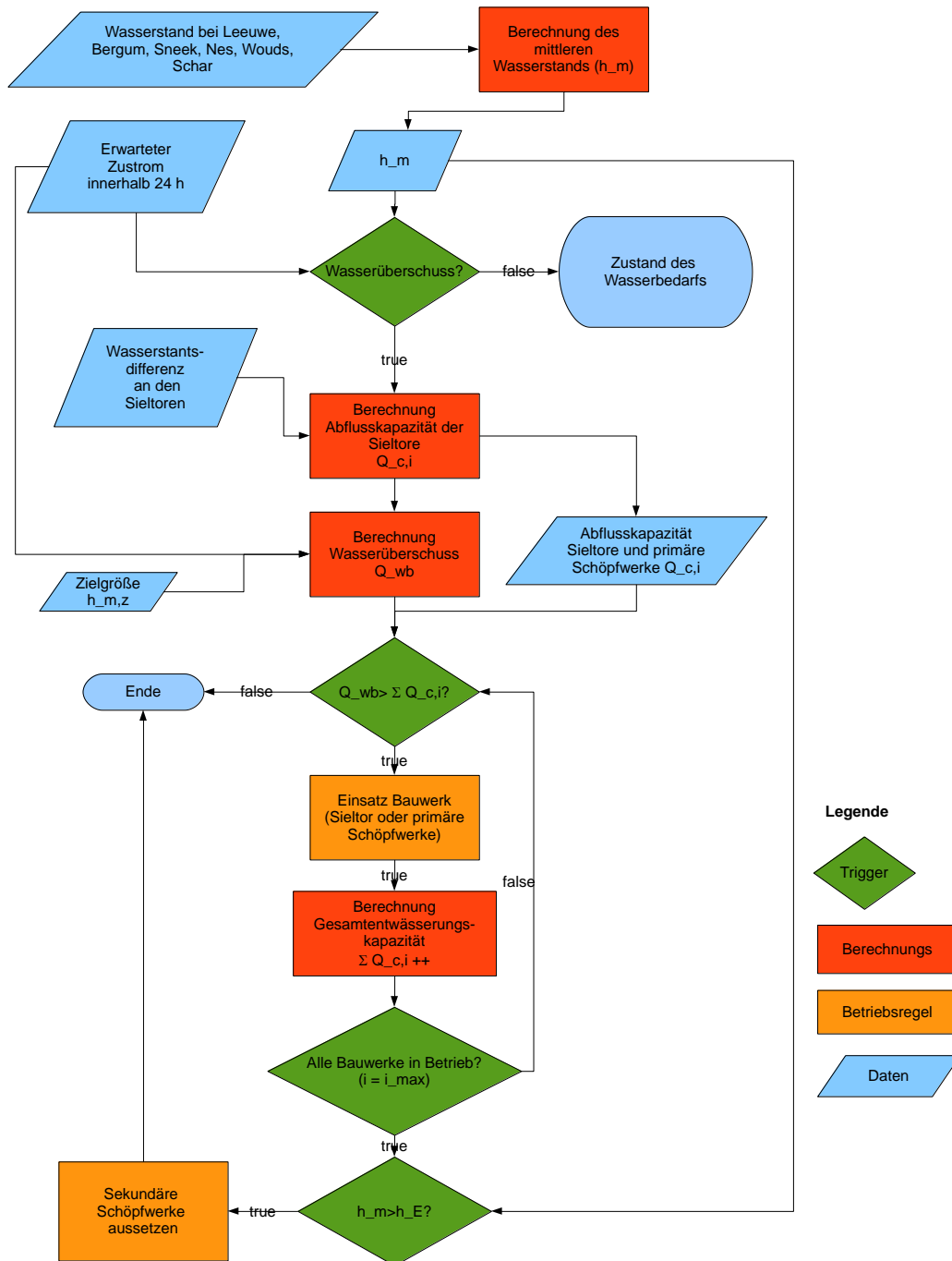


Abbildung 2: Modell der Steuerung des Gewässersystems „Friese Boezem“, dargestellt als Entscheidungsbaum (geändert nach Becker, 2013).

Abbildung 1 zeigt das Modellnetz des Sobek-Modells „Wetterskip Fryslân“. Die Entwässerung des Modellgebietes erfolgt ins Wattenmeer über die Tsjerk-Hidde-Schleuse bei Harlingen und ins IJsselmeer über die Schöpfwerke Woudagemaal bei Lemmer und Hooglandgemaal bei Stavoren. Über die Sielbauwerke Dokkumer Nieuwe Zijlen kann Wasser in das Lauwersmeer geleitet werden, das wiederum mit den Sielen bei Lauwersoog ins Wattenmeer entwässert wird. Über

die Friese Sluis kann Wasser mit dem benachbarten Poldergebiet (Waterschap Noorderzijlvest) ausgetauscht werden. Mehr als 800 sekundäre Schöpfwerke führen das Drainagewasser den Kanälen zu.

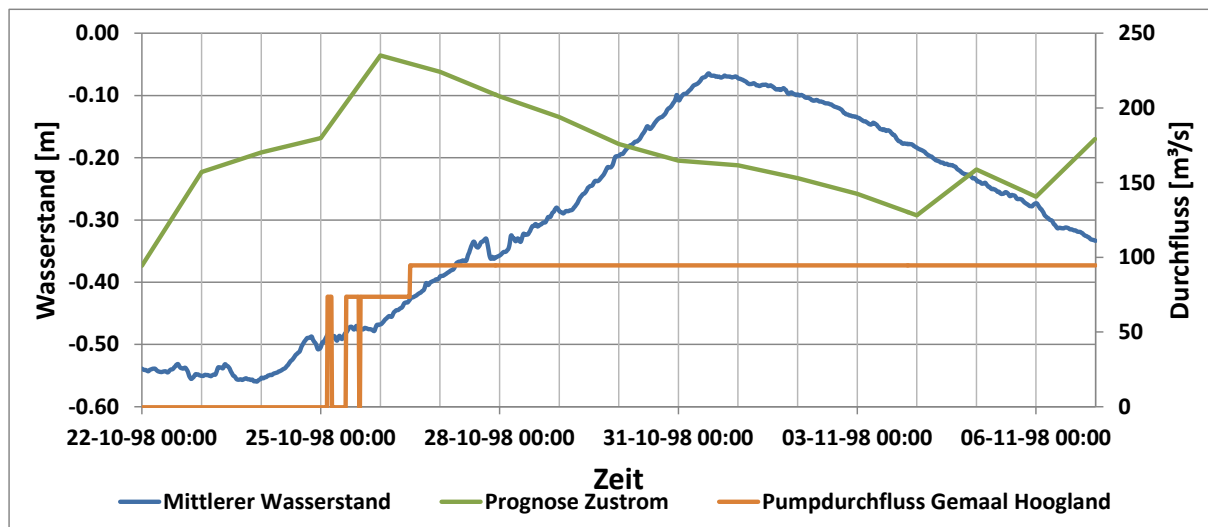


Abbildung 3: Simulationsergebnisse Pumpendurchfluss des Schöpfwerks Hooglandgemaal (RTC-Tools) und gemittelter Wasserstand (aus Sobek) der mit OpenMI gekoppelten Berechnung und Prognose des Wasserüberschusses (geändert nach Becker, 2013).

Betriebsziel ist es, solange wie möglich einen konstanten Wasserstand von 0.52 m NAP zu halten. Dies ist nicht immer möglich. Eine Kombination aus starken Niederschlägen und Sturmflut kann wegen nicht ausreichender Entwässerungsmöglichkeiten zu Hochwasser im Poldergebiet führen (Becker, Dahm, et al., 2012). Bei Wasserknappheit wird entsprechend Wasser zugeführt (Hendriks et al., 2013).

Das Modell der Steuerung ist in Abbildung 2 als Entscheidungsbaum dargestellt. Aus den Wasserständen an sechs über das Modellgebiet verteilten Pegeln wird ein mittlerer Wasserstand berechnet. Liegt dieser Wert über dem angestrebten mittleren Wasserstand von 0,5 m, muss Wasser abgeführt werden. Abhängig vom erwarteten Zustrom werden dazu die verschiedenen Entwässerungsbauwerke in einer festgelegten Reihenfolge eingesetzt. In dieser Prioritätenliste stehen die Siele oben, weil sie ohne Energiezufuhr in freiem Gefälle entwässern, allerdings nur bei niedrigem Gezeitenstand. Schöpfwerke haben eine niedrigere Kapazität als die Siele, können aber dafür ununterbrochen pumpen.

Die Entwässerung ins IJsselmeer kann nur mit Hilfe von Schöpfwerken erfolgen, weil der Wasserstand im IJsselmeer höher liegt als im Poldergebiet. Das Schöpfwerk Woudagemaal ist eins der letzten dampfbetriebenen Schöpfwerke und hat deshalb auch eine Vorlaufzeit. Letztes Mittel ist das Aussetzen der se-

kundären Schöpfwerke, was zur Folge hat, dass das Land nicht mehr ausreichend entwässert wird und somit Hochwasser nach sich ziehen kann.

Abbildung 3 zeigt Berechnungsergebnisse der OpenMI-gekoppelten Simulation für ein kurzes Hochwasserszenario. Zu Beginn der Simulationszeit steigen der gemittelte Wasserstand und der erwartete Zustrom. Das Schöpfwerk Hoogland wird jedoch nicht sofort eingesetzt, sondern erst nachdem die Schöpfwerke ausgelastet sind. Der Einschaltzeitpunkt wird in Abhängigkeit der Zustromprognose und dem gemittelten Wasserstand berechnet. Der Pumpdurchfluss wird im Modell konstant angenommen.

3 Prädiktive Steuerung

3.1 Funktionsweise der prädiktiven Steuerung (model predictive control)

Modellierung der Steuerung mit Model Predictive Control bedeutet, dass für jeden Simulationszeitschritt eine wiederholte Prognoserechnung des zukünftigen Systemzustands erfolgt. Aus verschiedenen Steuerungsoptionen wird mithilfe mathematischer Optimierung die im Hinblick auf die vorgegebenen Steuerungsziele und vorliegenden Randbedingungen optimale Variante bestimmt. (Abbildung 4).

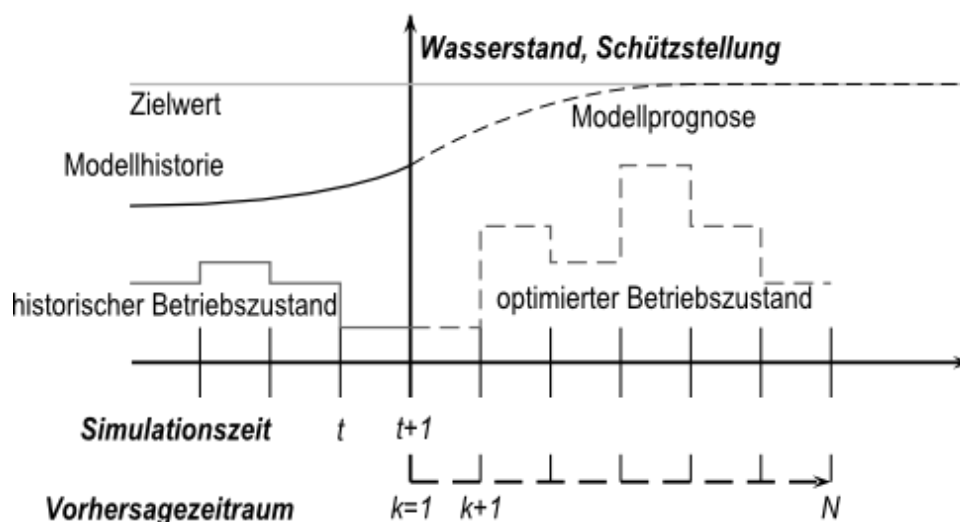


Abbildung 4: Schematische Darstellung von model predictive control für das Beispiel eines Wehres, dessen Schützstellung dahingehend optimiert wird, einen Zielwasserstand zu halten (Talsma et al., 2013).

Wesentlicher Unterschied zur konventionellen reaktiven Steuerung ist also, dass nicht die Steuerungsvorschrift, sondern die Steuerungsziele vorgegeben werden. Wie welches Bauwerk wann gesteuert wird, ergibt sich dann im Zuge der Berechnung. RTC-Tools verwendet die Adjungiertenmethode (Schwanenberg,

Sheret, et al., 2012) um die Optimierung so recheneffizient wie möglich zu gestalten. Steuerungsziele werden in Form von Strafkosten und Wichtungsfaktoren als Terme der Zielfunktion für die Optimierung vorgegeben.

Für den Wasserverband Wetterskip Fryslân ist Model Predictive Control in Planung, für den östlichen Nachbarverband bereits in einem Pilotprojekt realisiert worden (*Schwanenberg, Ochterbeck, et al.*, 2012). Die Pilotstudie zeigt, dass durch Model Predictive Control bis zu 200 000 EUR an Pumpkosten pro Jahr eingespart werden können. Deshalb wird derzeit das Entscheidungsunterstützungssystem des Wasserverbandes für den operativen Einsatz eingerichtet.

3.2 Anwendungsbeispiel „Salto Grande“

Das Wasserkraftwerk „Salto Grande“ staut zwischen der uruguayischen Stadt Salto und der argentinischen Stadt Concordia den Rio Uruguay mithilfe einer Kombination aus Gewichtsstaumauer und Erdschüttdamm den Rio Uruguay ($MQ \approx 4700 \text{ m}^3/\text{s}$) zu einem Stausee mit ca. 5000 Mio. m^3 Speichervolumen und einer Oberfläche von 783 km^2 auf. Das Einzugsgebiet des Stausees hat eine Größe von ca. 240.000 km^2 und bedeckt Teile von Argentinien, Brasilien und Uruguay. Die Anlage „Salto Grande“ umfasst unter anderem 14 Kaplannturbinen mit einer installierten Leistung von 1890 MW, die zur Energiegewinnung eingesetzt werden, sowie 19 nebeneinander liegende steuerbare Segmentschütze, die der Entlastung des Staubeckens im Hochwasserfall dienen. Die beiden vorrangigen Betriebsziele sind die Bereitstellung von elektrischem Strom aus Wasserkraft und der Hochwasserschutz im Stauseebereich sowie im Unterwasserbereich der Anlage.

Im Rahmen der Implementierung eines kompletten Delft-FEWS-Vorhersagesystems (*Werner et al.*, 2013) für die Anlage „Salto Grande“ wurden auch drei Varianten eines MPC-basierten Planungstools sowie ein reines Optimierungstool entwickelt. Das Vorhersagesystem Delft-FEWS stellt dabei alle notwendigen Komponenten wie deterministische Wetterprognosen mit unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Auflösungen, ein hydrologisches Modell sowie ein Routing-Modell für den Einsatz von MPC bereit. Die Modellierung des Speicherraums und der Betriebsanlagen erfolgt in RTC-Tools. Alle Eingangs- und Systemdaten werden in Delft-FEWS verwaltet und sind über eine Programmierschnittstelle von RTC-Tools abruf- und manipulierbar.

Die drei Planungstools dienen als Grundlage für den zukünftigen Anlagenbetrieb. Der Nutzer gibt dabei den Verlauf einer der drei Parameter Abfluss durch die Turbinen, Wasserstand im Stausee, Energieproduktion für den Planungszeitraum vor. Alle anderen Systemgrößen (z. B. Wasserstand im Staubecken, Abgabe in Unterwasser) werden in einem folgenden Modelllauf auf Grundlage der

Nutzervorgaben und einer von Delft-FEWS bereitgestellten Zuflussvorhersage bestimmt. Eine entsprechende Vorhersage für den Speicherbeckenzulauf muss für den kompletten Simulationszeitraum vorliegen.

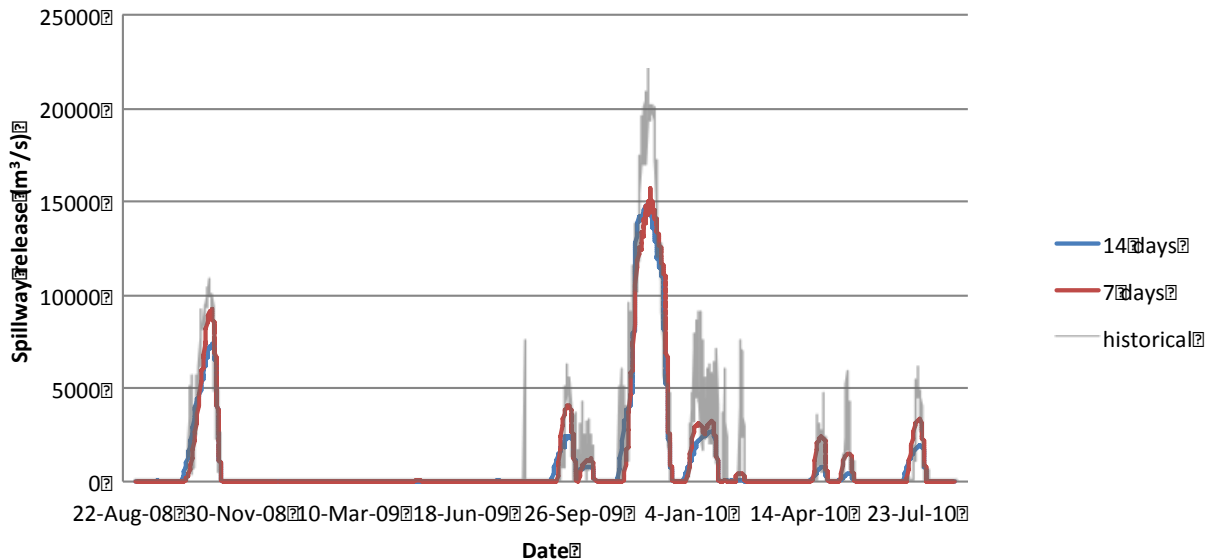


Abbildung 5: Abgabe (release) über die Hochwasserentlastung (spillway) unter Anwendung des Optimierungstools mit 7-Tage und 14-Tage Vorhersage sowie der historischen Steuerung (Schruff, 2011)

Das vierte Tool stellt ein reines Optimierungstool dar, welches nach einer einmaligen Konfiguration keine Nutzereingaben erfordert. Simulationen mit historischen Zuflussdaten zum Stausee als perfekte Vorhersage (sog. Hindcasting) zeigen dabei zum Teil deutliche Optimierungspotentiale des jetzigen Anlagenbetriebs auf. Die Kostenfunktion repräsentiert in diesem Beispiel einen Anlagenbetrieb mit den teilweise konkurrierenden Nutzungsansprüchen des Hochwasserschutzes im Ober- und Unterwasserbereich der Anlage, der Einhaltung von Mindestabgaben und der Maximierung der Energieproduktion. Für die Anwendung des Optimierungstools für einen zweijährigen Simulationszeitraum mit stark ausgeprägten Hochwasser- und Niedrigwasserereignissen ist in Abbildung 5 eine deutliche Reduktion der Abgabe über die Hochwasserentlastung zu sehen. Es lässt sich auch der Einfluss der Vorhersagelänge auf die Qualität der Anlagensteuerung erkennen. So liegen die maximalen Abgaben der 14-Tage-Vorhersage im Hochwasserfall immer unterhalb der Abgaben, die auf Grundlage der 7-Tage-Vorhersage bestimmt wurden, was sich mit einer früher einsetzenden Vorabsenkung erklären lässt.

Weitere Betriebskennzahlen für den zweijährigen Simulationszeitraum sind in Tabelle 1 dargestellt. Obwohl die gezeigten Ergebnisse aufgrund der Nutzung einer perfekten Vorhersage lediglich den oberen Grenzwert der erzielbaren Ver-

besserungen des Anlagenbetriebs darstellen, wird deutlich, der Einsatz von Model Predictive Control gegenüber der herkömmlichen Steuerung eine effizientere Nutzung vorhandener Ressourcen ermöglicht. Bei der Wahl des Vorhersagehorizonts muss eine Abwägung vor dem Hintergrund der Betriebsziele erfolgen.

Tabelle 1 Vergleich von Betriebskennzahlen für die Anwendung des Optimierungstools mit 7-Tage und 14-Tage Vorhersage sowie dem historischen Betrieb für den zweijährigen Simulationszeitraum (Schruff, 2011)

Kategorie	Historisch	Vorhersagehorizont	
		7 Tage	14 Tage
Energieproduktion [GWh]	17.100	18.050	17.940
Umsatzsteigerung [Mio. €]	-	114	100
Maximale Abgabe [m ³ /s]	30.000	23.000	22.000
Abgabevolumen über die HW-Entlastung [Mio. m ³]	21	17,5	16,5

4 Literatur

- Becker, B. (2013): Inzet RTC-Tools voor het boezemmodel Wetterskip Fryslân. Report No. 1205773-000. Deltares, Delft.
- Becker, B.; Dahm, R.; van Heeringen, K.-J.; Goorden, N.; Kramer, N.; Kooij, K.; Gooijer, J.; Jansen, J. (2012): Op zoek naar een optimaal ontwerp voor een groot uitwateringsgemaal in het Lauwersmeer. H2O 44 (13), 11–13.
- Becker, B. P. J.; Schwanenberg, D.; Schruff, T.; Hatz, M. (2012): Conjunctive real-time control and hydrodynamic modelling in application to Rhine River. in: Proceedings of 10th International Conference on Hydroinformatics; Hamburg, Germany: TuTech Verlag TuTech Innovation GmbH.
- Deltares (2013): RTC-Tools - a toolbox for real-time control of hydraulic structures [WWW Document]. URL <http://oss.deltares.nl/web/rtc-tools>
- Gregersen, J. B.; Gijssbers, P. J. A.; Westen, S. J. P. (2007): OpenMI: Open modelling interface. Journal of Hydroinformatics 9 (3), 175–191.
- 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 (4), 30–36.
- Schruff, T. (2011): A decision support framework for hydropower producers. Diplomarbeit. RWTH Aachen University. [Faculty of] Civil Engineering, Aachen.
- Schwanenberg, D.; Becker, B. P. J.; Schruff, T. (2011): SOBEK-Grobmodell des staugeregelten Oberrheins. Report No. 1201242-000-ZWS-0014. Deltares.
- Schwanenberg, D.; Ochterbeck, T.; Gooijer, J.; Xu, M.; van Heeringen, K.-J. (2012): Model predictive control of pumps and gates for draining Dutch polder systems. in: 10th International Conference on Hydroinformatics Hamburg, Germany / Understanding Changing Climate and Environment and Finding Solutions; : TuTech Verlag TuTech Innovation GmbH.

- Schwanenberg, D.; Sheret, I.; Rauschenbach, T.; Galleli, S.; Vieira, J. M.; Pinho, J. L. (2012): Adjoint modeling framework for water resources models. in: 10th International Conference on Hydroinformatics Hamburg, Germany / Understanding Changing Climate and Environment and Finding Solutions; : TuTech Verlag TuTech Innovation GmbH.
- Stelling, G. S.; Duinmeijer, S. P. A. (2003): A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 43 (12), 1329–1354.
- Talsma, J.; Patzke, S.; Becker, B. P.; Goorden, N.; Schwanenberg, D.; Prinsen, G. (2013): Application of model predictive control on water extractions in scarcity situations in the Netherlands. *Revista de Ingeniería Innova* (accepted for publication).
- 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* 40, 65–77.

Autoren:

Dr.-Ing. Bernhard Becker

Dipl.-Ing. Tobias Schruff

Deltares
P.O. box 177
2600MH Delft
Niederlande

RWTH Aachen
Mies-van-der-Rohe-Straße 17
52056 Aachen

Tel.: +31 6 5241 6736
Fax: +31 88 335 8582
E-Mail: Bernhard.Becker@deltares.nl

Tel.: +49 241 80-25266
Fax: +49 241 80-22348
E-Mail: schruff@iww.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Dirk Schwanenberg

Deltares
P.O. box 177
2600MH Delft
Niederlande

Tel.: +31 88 335 8447
Fax: +31 88 335 8582
E-Mail: Dirk.Schwanenberg@deltares.nl