
Modell zur Echtzeitbewirtschaftung des Talsperrensystems im Einzugsgebiet der Ruhr

Gerd Morgenschweis und Georg zur Strassen, Ruhrverband Essen

Sonderdruck aus:
Jahresbericht Ruhrwassermenge 2002 · Ruhrverband Essen (2003), S. 31-41

11 Modell zur Echtzeitbewirtschaftung des Talsperrensystems im Einzugsgebiet der Ruhr

11.1 Problemstellung und Veranlassung

Nach den positiven Erfahrungen mit dem Hochwasservorhersagemodell VMOD im Lenne-Einzugsgebiet (Ruhrwassermengenberichte 1993 und 1998) kam im Zusammenhang mit der außergewöhnlichen winterlichen Trockenperiode im Wasserwirtschaftsjahr 1996, in der das Ruhrtalsperrensystem an seine Leistungsgrenzen stieß, die Forderung nach einem Softwaresystem, welches Entscheidungshilfen für die tägliche Steuerung des Talsperrensystems liefert. Solche Echtzeitbewirtschaftungsmodelle zeichnen sich – im Gegensatz zu Simulationsmodellen, die die mittleren Gebietseigenschaften eines Einzugsgebietes beschreiben und in eine Langzeitbetrachtung umsetzen – dadurch aus, dass eine kontinuierliche Anpassung der Systemzustände an das gemessene Abflussverhalten möglich ist, d. h. konkret, dass die Talsperrenabgaben so gut angepasst werden, dass die gesetzlich vorgeschriebenen Mindestabflüsse an den Kontrollpegeln Villigst, Hattingen und Oeventrop jederzeit eingehalten werden.

Im Rahmen von Vorstudien von WL/Delft Hydraulics (1998) und dem Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe (IHW 1997) wurde die Steuerung der Talsperren im Einzugsgebiet der Ruhr einer eingehenden Systemanalyse unterzogen. Danach sind bei der Kurzzeitbewirtschaftung folgende Stör- und Einflussgrößen zu berücksichtigen:

- Wasserentnahmen und -entziehung:
Eine große Anzahl von Wasserwerken entnehmen zurzeit 520 Mio. m³ Flusswasser pro Jahr (Stand: 2002) und exportieren davon 248 Mio. m³/a in benachbarte Einzugsgebiete (Kapitel 6).
- Wassereinleitungen aus dem Bergbau:
Sümpfungswässer des Kohlebergbaus werden an zwei Stellen in einer Menge zwischen 0,6 und 1,3 m³/s in die Ruhr eingeleitet (Zeche Heinrich in Essen-Überruhr und Robert Müser in Bochum).
- Stauanlagen:
Nach neueren Untersuchungen [1] gibt es im Einzugsgebiet der Ruhr 1.272 Querbauwerke mit Absturzhöhen von > 20 cm; allein in der Ruhr sind 53, in der Lenne 52 Wehre installiert (Ruhrgüteberichte 1997 und 2000). Von besonderer Bedeutung sind die fünf Stauseen in der mittleren und unteren Ruhr, die diesen Flussabschnitt bis zur Mündung in den Rhein zu einem durchgängig staugegerten Fluss gemacht haben.

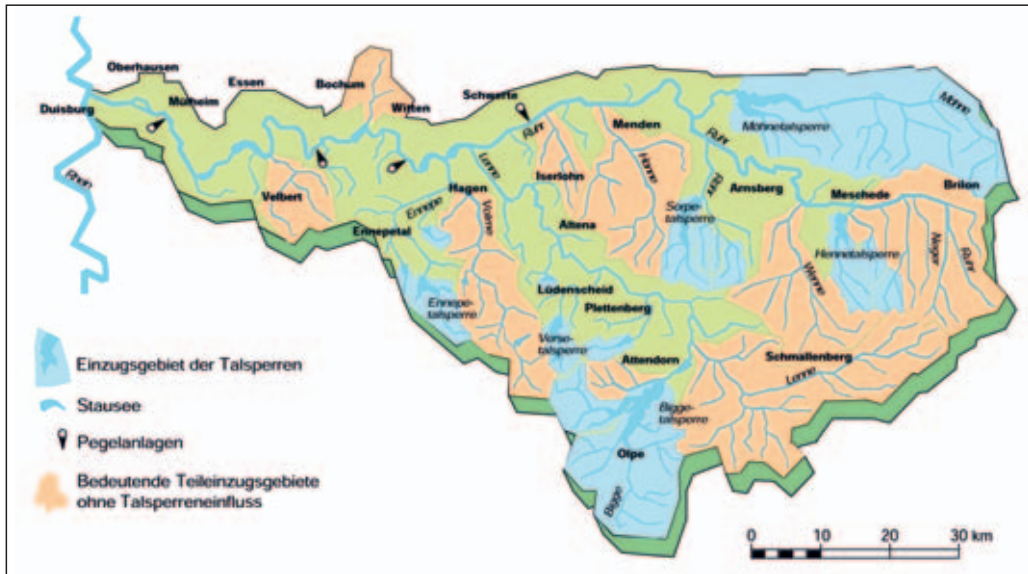


Bild 19: Teileinzugsgebiete mit und ohne Talsperreneinfluss
 Fig. 19: Catchment areas with and without influence of upstream reservoirs

- Kläranlagenzuläufe und -abläufe:
 In derzeit 83 RV-Kläranlagen wird das Abwasser der im Einzugsgebiet der Ruhr lebenden Einwohner gereinigt und wieder in das Flusssystem eingeleitet.
- Fließ- bzw. Reaktionszeiten:
 Talsperren und Kontrollquerschnitte liegen bis zu 127 km Fließlänge voneinander entfernt; zudem verursachen die zahlreichen Stauanlagen in Ruhr und Lenne eine sehr ungleichmäßige Fließgeschwindigkeitsverteilung entlang des Gewässerlaufes. Hinzu kommt, dass Fließgeschwindigkeiten prinzipiell von den aktuellen Abflussverhältnissen abhängig sind. So benötigt der Wasserkörper als Reaktion auf Abgabenänderungen bei Niedrigwasser in Ruhr und Lenne mehrere Tage Fließzeit zwischen den Talsperren im Oberlauf und den Kontrollquerschnitten im Unterlauf des Flusssystems, bei Hochwasser dagegen nur einen Bruchteil dieser Zeit.
- Zwischeneinzugsgebiete:
 Nur ein Teil des 4.485 km² großen Ruhreinzugsgebietes wird durch die vorhandenen Talsperren mehr oder weniger stark beeinflusst. Die Teileinzugsgebiete, z. B. der Wenne, der Hönne, des Ölbaches und Deilbachs, u.a. aber auch des Ruhrabschnitts oberhalb der Henneeinmündung und der Lenne oberhalb der Biggeeinmündung sind ohne jeglichen Talsperreneinfluss. Dieser Anteil des Einzugsgebietes, auf den der Ruhrverband keine Einflussnahme hat, summiert sich auf 1.777 km² oder 40 % des Gesamteinzugsgebietes (orange Flächen in Bild 19). Die Einzugsgebiete aller RV-Talsperren (blaue Flächen in Bild 19) belaufen sich auf 998 km² oder 22 % des Gesamtgebietes. Der verbleibende Rest wird je nach Nähe zur oberhalb gelegenen Talsperre mehr oder weniger stark durch die Bewirtschaftung des Talsperrensystems beeinflusst. Bild 19 zeigt die räumliche Verteilung der verschiedenen Kategorien.

Aufbauend auf dieser Systemanalyse wurde das im folgenden Kapitel 11.2 vorgestellte Echtzeitbewirtschaftungsmodell konzipiert.

11.2 Echtzeitbewirtschaftungsmodell

11.2.1 Modellkonzept

Bild 20 zeigt die Modelle, die bei der Wassermengenbewirtschaftung berücksichtigt werden. Das Modellsystem besteht dabei aus einem System von „genesteten“ Teilmodellen.

Einen wichtigen Teil nimmt die **Datenbereitstellung** ein. Neben meteorologischen und hydrologischen Messwerten wie Niederschlag, Temperatur, Wasserstand und Durchfluss, die mit Hilfe eines einzugsgebietsweiten Monitoringsystems [2] vor Ort erhoben und mittels Langdistanz-Datenfernübertragung (DFÜ) zeitnah in der Leitzentrale in der Hauptverwaltung in Essen zur Verfügung stehen, werden Terminvorhersagen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zu Niederschlag und Lufttemperatur online als Eingangsdaten bereitgestellt. Wasserentnahmewerte des Vortags ausgewählter großer Wasserwerke werden täglich abgefragt, um sie in das vorhandene Modell zur Vorhersage der Entziehungswassermenge als Maß für den kurzfristigen Wasserbedarf einzuspeisen. Zur einfachen Handhabung und zur Modellanwendung in Echtzeit wurde dieser Bereich soweit wie möglich automatisiert, d. h. die Eingabedaten der Modelle werden nicht von Hand eingegeben, sondern durch Softwareprogramme zwischen den Modellen ausgetauscht.

Bei den Modellen wird zwischen denen unterschieden, die kontinuierliche Berechnungen auf Tagesbasis durchführen und dem Hochwasservorhersagemodell, das wegen der

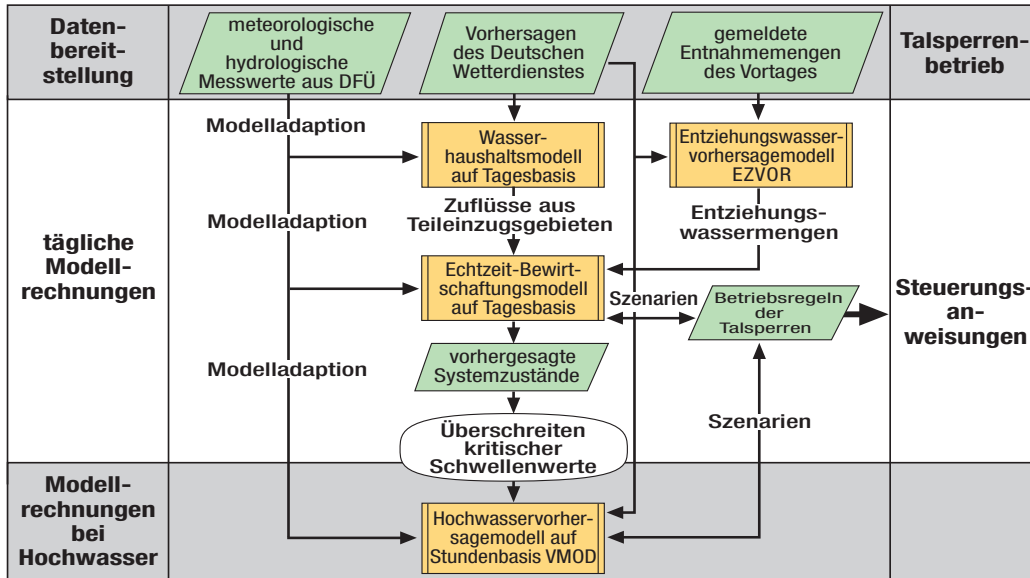


Bild 20: Modellkonzept zur Echtzeitbewirtschaftung
 Fig. 20: Model conception for real-time river management

höheren Dynamik auf Stundenbasis arbeitet und nur bei Bedarf betrieben wird. Die Notwendigkeit zum Einsatz des Hochwasservorhersagemodells wird aus den vorhergesagten Systemzuständen des Echtzeitbewirtschaftungsmodells abgeleitet. Bei Überschreiten kritischer Schwellenwerte wird automatisch das Hochwasservorhersagemodell in Betrieb genommen.

Den Kern des Softwaresystems bildet das **Echtzeitbewirtschaftungsmodell**. Es liefert Vorhersagen für den Abflussprozess und die Systemzustände im Einzugsgebiet über einen zu definierenden Vorhersagezeitraum. Modelltechnisch wird das komplexe wasserwirtschaftliche System des Ruhr-einzugsgebiets zu einer Abfolge von Flood-Routing-Strecken und Speicherbausteinen (Talsperren bzw. Flusstauanlagen) abstrahiert.

Die Zuflüsse in die Speicher und die Abflüsse in den Gewässerstrecken, die nicht von Talsperren beeinflusst werden (Bild 19), werden in einem gekoppelten **Wasserhaushaltsmodell** berechnet. Das Entziehungswasser-vorhersagemodell EZVOR liefert die Belastungen des Systems, die an den Gewässerstrecken bzw. Speichern als punktuelle Entnahmen angesetzt werden. Von entscheidender Bedeutung sind die Pegel an den Flood-Routing-Strecken, die im Echtzeitbetrieb genutzt werden, um eine Adaption des Modells an den gemessenen Zustand des wasserwirtschaftlichen Systems durchzuführen. Gleichzeitig werden die Abflüsse an bestimmten Kontrollpegeln als Zielgröße für die Steuerung des Gesamtsystems herangezogen. Die Berechnung von Szenarien anhand unterschiedlicher Abgaben aus den Talsperren und deren Auswertung erlauben die Ableitung objektiver und nachvollziehbarer Steuerungsanweisungen, die unmittelbar an den Talsperrenbetrieb weitergegeben werden können. Im Folgenden sollen die Grundzüge von zwei wesentlichen Einzelmodellen kurz vorgestellt werden.

11.2.2 Wasserhaushaltsmodell

Für die kontinuierliche Modellierung der Wasserhaushaltsgrößen in den Teileinzugsgebieten wurde das Modell PRMS (Precipitation Runoff Modeling System) des United States Geological Survey (USGS) als Grundlage verwendet [3]. Um den spezifischen Anforderungen des Ruhreinzugsgebiets und der vorhandenen Datengrundlage gerecht zu werden, mussten verschiedene Modifikationen am Modell durchgeführt werden. Hierzu stand die Entwicklungsumgebung MMS (Modular Modeling System) des USGS zur Verfügung, die eine anwenderfreundliche Bearbeitung der Modellkomponenten ermöglicht [4].

Das Grundkonzept des Wasserhaushaltsmodells basiert auf einer Unterteilung des Modellgebiets in hydrologisch ähnlichen Einheiten. Diese Flächeneinheiten weisen bei gleicher äußerer Belastung (Niederschlag, Lufttemperatur und Luftfeuchte) auch ähnliche Reaktionen auf. Sie werden als HRU (hydrological response unit) bezeichnet. Eigenschaften, die das hydrologische Verhalten eines Einzugsgebietes charakterisieren, sind z. B. das Relief, die Landnutzung oder die Geologie. Die Bilanzierung des Wasserhaushalts wird bei diesem Modellierungskonzept in jedem Zeitschritt für alle HRUs getrennt durchgeführt.

Eine ausführliche Modellbeschreibung geben Leavesley und Stannard [3]. Das Modell wurde in einigen Verfahrensschritten, z. B. bei der Berechnung der potentiellen Verdunstung, durch die Einführung eines Translationsterms sowie bei der Datenstruktur modifiziert, um es für den Echtzeitbetrieb zu ertüchtigen. Das Strukturdiagramm des Wasserhaushaltsmodells ist in Bild 21 dargestellt.

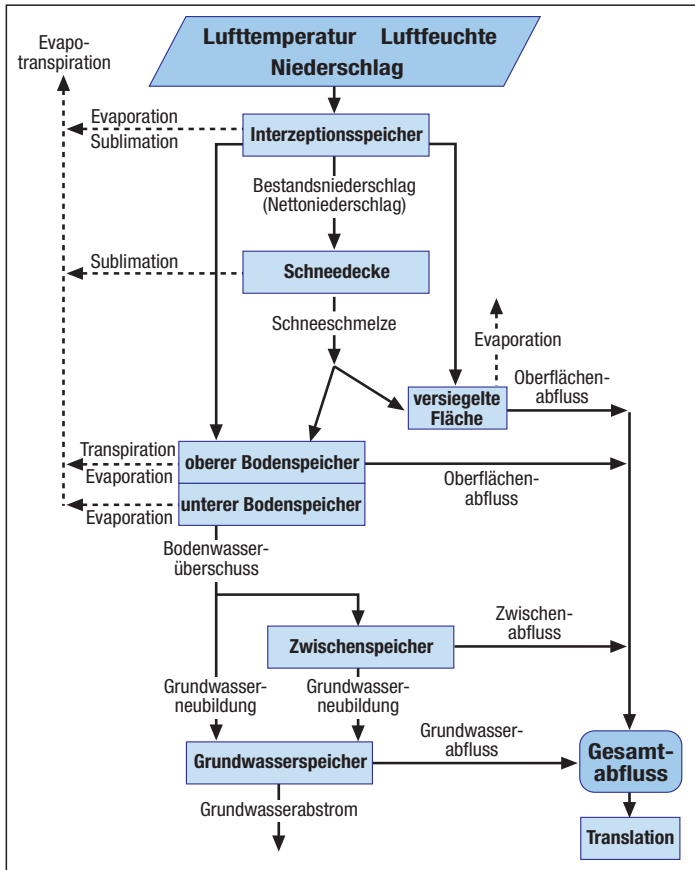


Bild 21: Schematische Darstellung des Wasserhaushaltsmodells PRMS (modifiziert nach [3])
 Fig. 21: Structural diagram of the watershed model PRMS (according to [3])

Die für das Wasserhaushaltsmodell benötigten hydrologischen Größen wurden aus einem digitalen Geländemodell (DGM25) mit Hilfe des Programms TANALYS der ETH Zürich [5] ermittelt. Die daraus abgeleitete Gebietsunterteilung in 51 Teileinzugsgebiete zeigt Bild 22.

Nach Kalibrierung des Modells anhand historischer Daten ergab die Validierung der Kalibrierergebnisse über einen Zeitraum der beiden Wasserwirtschaftsjahre 1994 und 1995, dass das verwendete Modell gute Ergebnisse liefert und dass insbesondere im unteren und mittleren Abflussbereich bessere Anpassungen (logarithmische Bestimmtheitsmaße bis 0,9) erreicht werden als im Hochwasserbereich. Da dieser Modellbaustein vorwiegend für Niedrigwasserzeiten eingesetzt werden soll, ist dieses Ergebnis sehr zufriedenstellend und belegt zudem, dass ein einzugsgebietsbezogenes Wasserhaushaltsmodell für den vorgesehenen Echtzeitbetrieb eingesetzt werden kann.

11.2.3 Bewirtschaftungsmodell

Aufbauend auf den Ergebnissen des Wasserhaushaltsmodells soll das Echtzeitbewirtschaftungsmodell Vorhersagen des Abflusses entlang der Gewässer im gesamten Einzugsgebiet über einen Vorhersagezeitraum von bis zu 6 Tagen liefern.

Zunächst erforderte die Anpassung des Bewirtschaftungsmodells an das Ruhreinzugsgebiet die **räumliche Diskretisierung** des Gebiets in Form eines Knotenplans (Bild 23). Alle das Abflussverhalten und die Steuerung der Talsperren

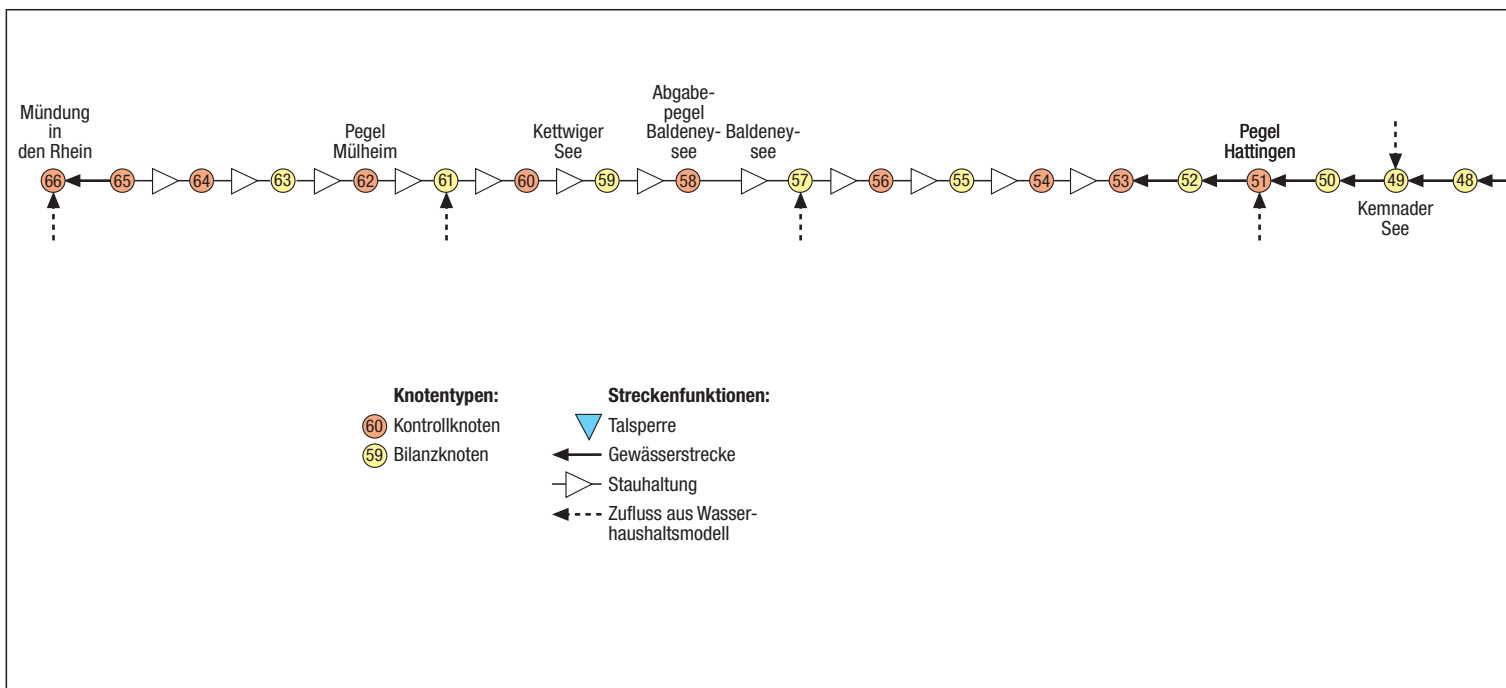


Bild 23: Systemskizze des Bewirtschaftungsmodells als Knotenplan

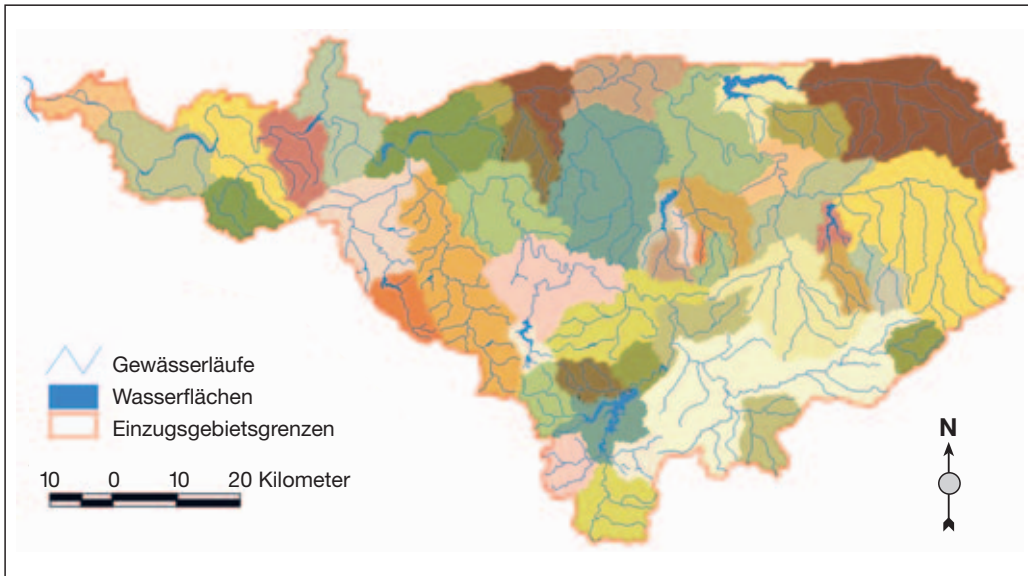


Bild 22: Teileinzugsgebiete für die Wasserhaushaltsmodellierung
 Fig. 22: Subcatchment basins derived for watershed modeling

beeinflussenden Punkte des Gewässersystems wurden hierzu erfasst und in die Modellstruktur umgesetzt. Als **Modellbausteine** stehen Knoten und diesen zugeordnete Streckenfunktionen zur Verfügung (Bild 23).

Als **Knoten** werden Bilanz- und Kontrollknoten verwendet. Kontrollknoten repräsentieren dabei im Gewässer entweder Pegelstellen oder Stellen des Systems, an denen Zuflüsse aus dem stromaufwärts gelegenen Einzugsgebiet angesetzt werden. Bei Flusstauhaltungen gilt, dass diese durch zwei Kontrollknoten begrenzt werden. An den Talsperren wird

sowohl im oberstromigen Zufluss als auch an der Abgabestelle ein Kontrollknoten angesetzt. Bilanzknoten werden dagegen verwendet, um Eingangs- bzw. Belastungsgrößen des Systems (Entnahmen bzw. Zuflüsse) zu modellieren. Entlang einer Fließgewässerstrecke oder einer Kanal- bzw. Flusstauhaltung können beliebig viele Bilanzknoten angesetzt werden, um unterschiedliche Entnahmen bzw. Zuflüsse zu realisieren.

Streckenfunktionen sind Talsperren, Gewässerstrecken, Stauhaltungen und Zuflüsse. Nähere Erläuterungen zu den

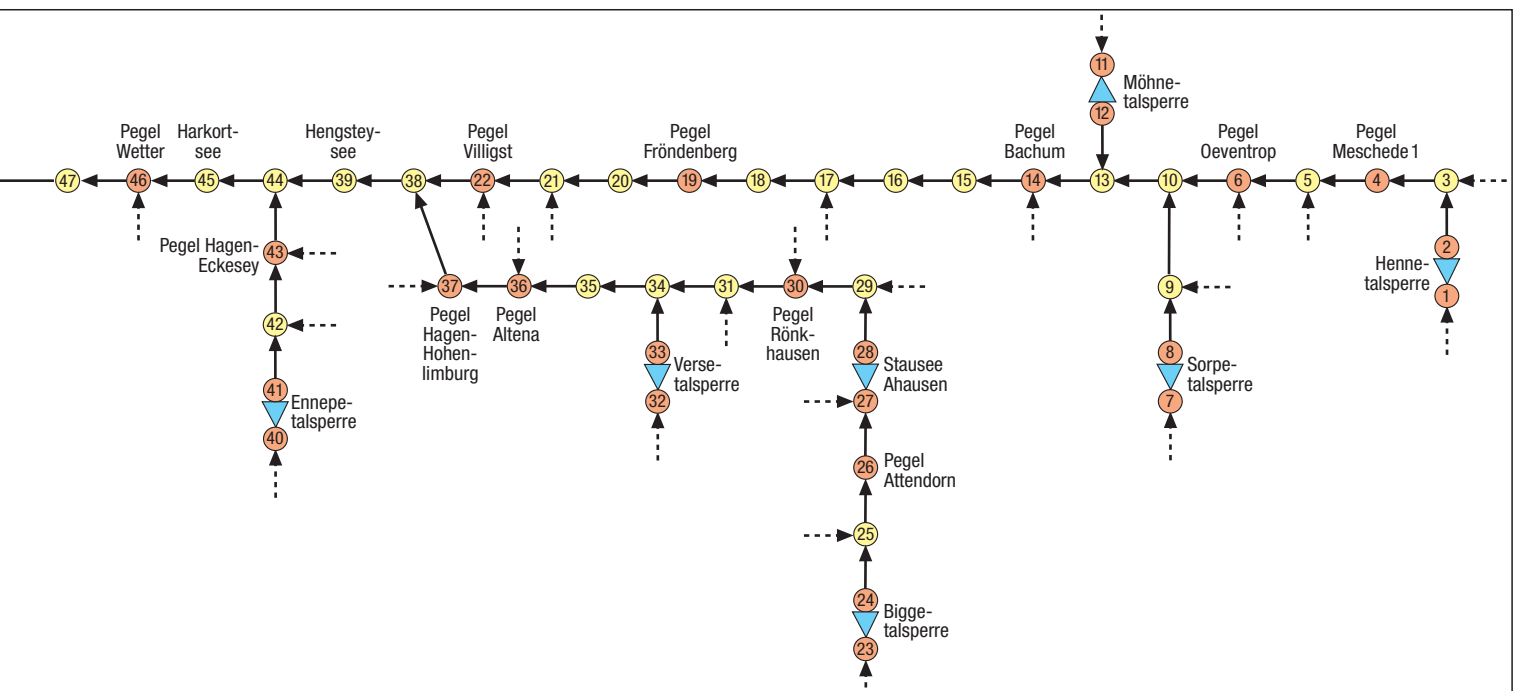


Fig. 23: System outlet of the real-time river management model

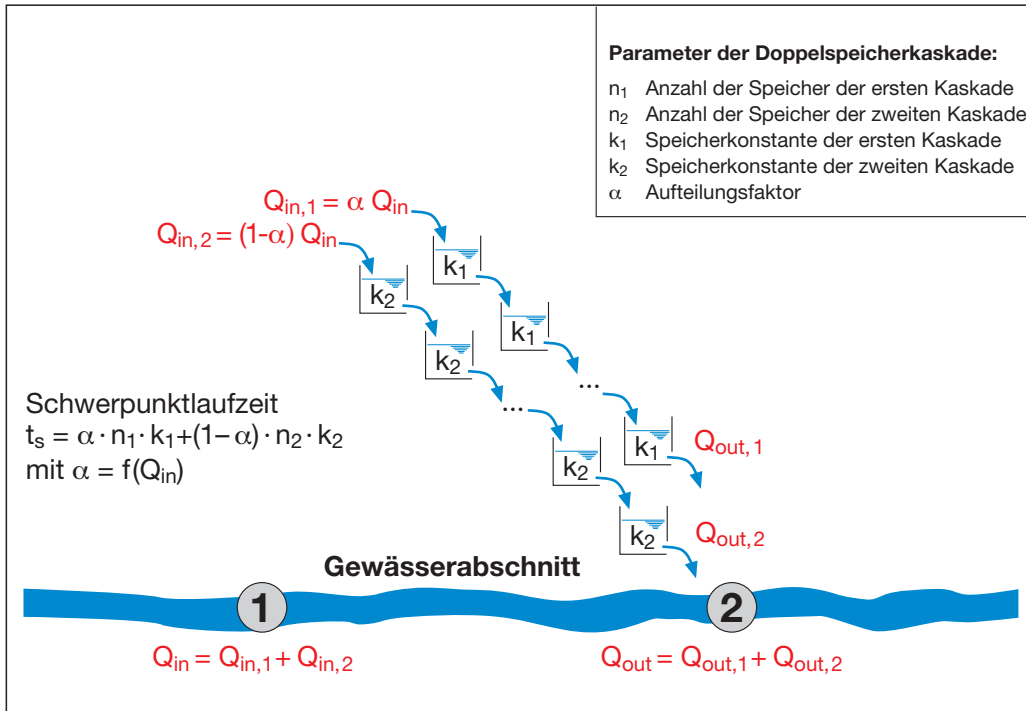


Bild 24: Modellbaustein „Fließgewässer“ zur Wellenverformung im Gewässer

Fig. 24: Model component “flowing water” for flood routing in the river

Funktionen dieser Modellbausteine und den hydrologischen Berechnungsverfahren, die diesen Modellbausteinen zugrunde liegen, können [6] entnommen werden.

Folgende Systemelemente im Einzugsgebiet werden als Streckenfunktion berücksichtigt:

- die sechs großen Talsperren (Bigge, Möhne, Sorpe, Henne, Verse, Ennepe) sowie der Stausee Ahausen;
- die Gewässerläufe von den Talsperren bis zur Mündung in das jeweilige Hauptgewässer;
- die Flusstauanlagen im vollständig rückgestauten Unterlauf der Ruhr (Flusskilometer 47 bis zur Mündung in den Rhein).

Die Zufluss- und Abgabequerschnitte der Talsperren werden als Kontrollknoten vorgegeben. Im Wasserhaushaltsmodell werden die Zuflüsse zu den Talsperren berechnet und an das Talsperrenmodul übergeben. Die Abgabensteuerung kann im Bewirtschaftungsmodell vorgegeben werden. Der Stausee Ahausen, der vom Ruhrverband bewirtschaftet wird, soll ebenfalls als Talsperre modelliert werden, um ihn in den Steuerungsstrategien für das Verbundsystem der Biggetalsperre berücksichtigen zu können.

Die räumliche Untergliederung der Fließgewässer durch Knoten in einzelne Gewässerstrecken bzw. Flood-Routing-Abschnitte macht es möglich, die Entnahmestellen und die Sumpfungswassereinleitungen zu berücksichtigen, wichtige Zuflüsse aus Seitengewässern in das Modell einzuleiten und die zur Modelladaption und -anpassung wichtigen Pegelstellen entlang den Gewässerstrecken als Kontrollknoten zu definieren.

Neben der Einführung der räumlichen und einer geeigneten zeitlichen Diskretisierung sind die Modellbausteine „Talsperren“ und „Stauhaltungen“, in denen die Wassermengenbilanz mittels der allgemeinen Speichergleichung modelliert wird, und insbesondere der Modellbaustein „Fließgewässer“, in dem die Wellenverformung im Gewässer durch eine modifizierte Doppelspeicherkaskade formuliert wird, für die vorliegende Fragestellung wichtig. Aufgrund der starken anthropogenen Beeinflussung der Flüsse durch Stauhaltungen und der teilweise langen Reaktionszeiten (Kapitel 11.1) kommt dem Flood-Routing im Modul „Fließgewässer“ (Bild 24) besondere Bedeutung zu.

Durch die Darstellung des Gewässerabflusses im Zustandsraum gelingt eine für den Echtzeitbetrieb notwendige rekursive Modellformulierung und die Abbildung variabler Fließgeschwindigkeiten (Bild 24). Mehr Details hierzu können [7] und [8] entnommen werden.

Zur **Kalibrierung** und zum Test des Modellsystems wurden Simulationsrechnungen mit dem Bewirtschaftungsmodell und dem gekoppelten Wasserhaushaltsmodell mit den

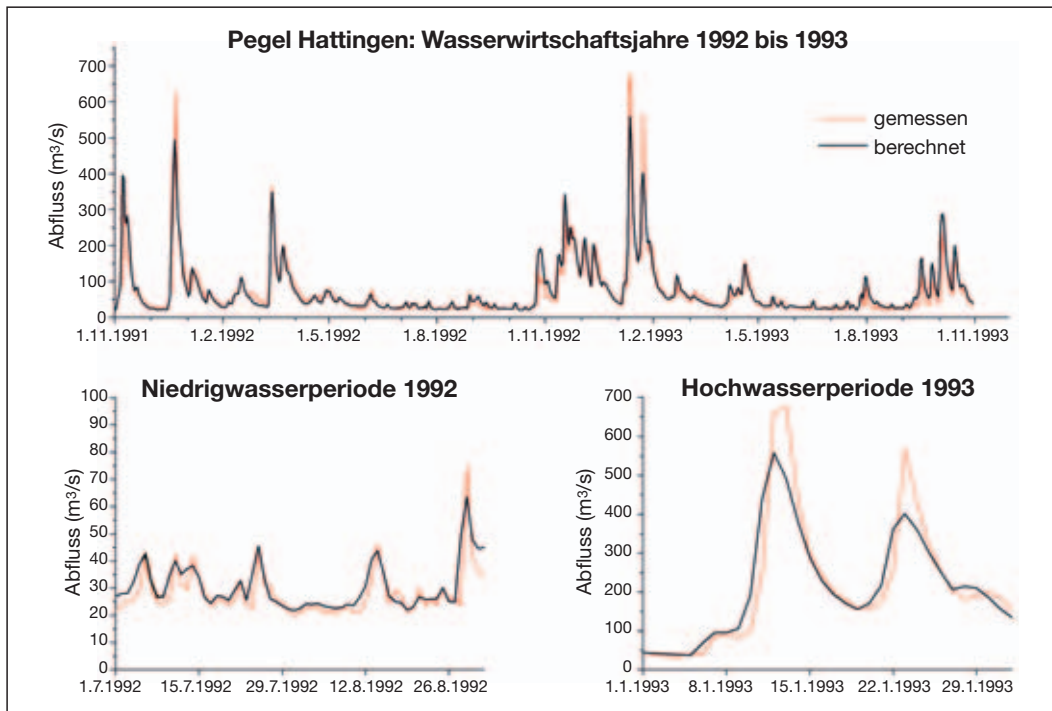


Bild 25: Modellkalibrierung mit historischen Daten
 Fig. 25: Model calibration using historical input data

historischen Daten der Wasserwirtschaftsjahre 1992 und 1993 durchgeführt. Zur Modellkalibrierung wurde das Abflussgeschehen mit dem gesamten verfügbaren Datenbestand von 69 Niederschlagsstationen simuliert. Anschließend wurde zu Vergleichszwecken das Abflussgeschehen derselben Wasserwirtschaftsjahre mit dem deutlich weniger dichten Messnetz der Niederschlagsstationen mit Datenfernübertragung (12 Stationen) berechnet. Für die Eingangsgrößen der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte wurden für beide Simulationsvarianten die gemessenen Daten der Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet.

Die in Bild 25 dargestellten Modellergebnisse der Simulationsrechnungen für das Abflussgeschehen der Wasserwirtschaftsjahre 1992 und 1993 sind als gut zu beurteilen. Als Bewertungskriterium der Simulationsergebnisse wird das Bestimmtheitsmaß R^2 zwischen den gemessenen und den berechneten Abflussganglinien an allen Pegeln des Systems herangezogen. Es sind 31 Pegelstellen im Modellgebiet vorhanden, die zur Auswertung benutzt werden können. Sowohl die linearen als auch die logarithmischen Bestimmtheitsmaße liegen größtenteils in einem Bereich zwischen 0,80 und 0,92. An den durchgängig etwas höheren logarithmischen Bestimmtheitsmaßen kann man erkennen, dass bei der Modellanpassung der Schwerpunkt im Niedrig- und Mittelwasserbereich liegt.

Bild 25 verdeutlicht anhand von Ganglinien des simulierten und des gemessenen Abflusses am Kontrollpegel Hattingen, dass das Modell die Abflussdynamik im Niedrigwasserbereich gut zu beschreiben vermag. Es ist anzumerken, dass

der Pegel Hattingen 60 km oberhalb der Mündung der Ruhr in den Rhein liegt und sich dort erhebliche anthropogene Einflüsse auf das Abflussgeschehen, wie in Kapitel 11.1 dargestellt, subsumieren.

Allerdings zeigt sich auch, dass das Modellkonzept und die Zielvorgabe bei der Modellanpassung nicht zu einem Modell führen, das die Ansprüche einer Hochwasservorhersage erfüllen kann. Die Abflussscheitel werden vom Modell häufig unterschätzt, was hauptsächlich in der für Hochwasserbetrachtungen zu groben zeitlichen Auflösung beruht (Bild 25). Dies verdeutlicht, dass für die integrative Bewirtschaftung eines Einzugsgebiets die Anwendung eines Modells für die Vorhersage der Abflüsse in allen Abflussbereichen nicht sinnvoll ist.

Um die **Sensitivität des Modells** bei der Erstellung von Vorhersagen zu untersuchen, wurden verschiedene Vorhersagevarianten mit den Daten der Wasserwirtschaftsjahre 1992 und 1993 berechnet. Dabei zeigte sich, dass z. B. bei Verwendung des weitmaschigeren Niederschlagsmessnetzes mit Fernübertragungseinrichtungen keine gravierenden Änderungen des Gütemaßes auftraten [7].

11.3 Praktischer Einsatz des Modells und erste Ergebnisse

Das Modellsystem wurde am 2.7.2002 in der Leitzentrale des Ruhrverbands implementiert und wird seither täglich für Vorhersagen im Niedrig- und Mittelwasserbereich eingesetzt.

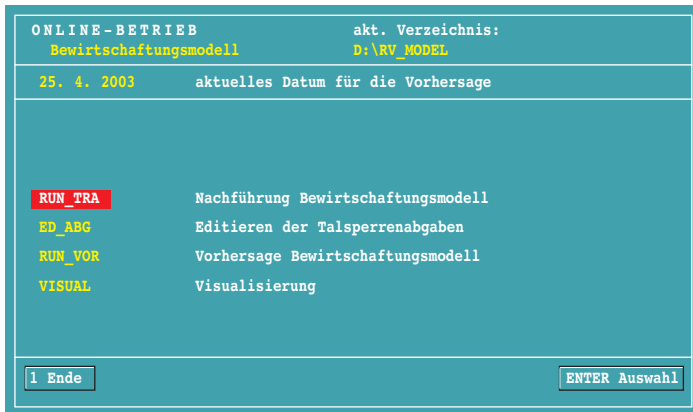
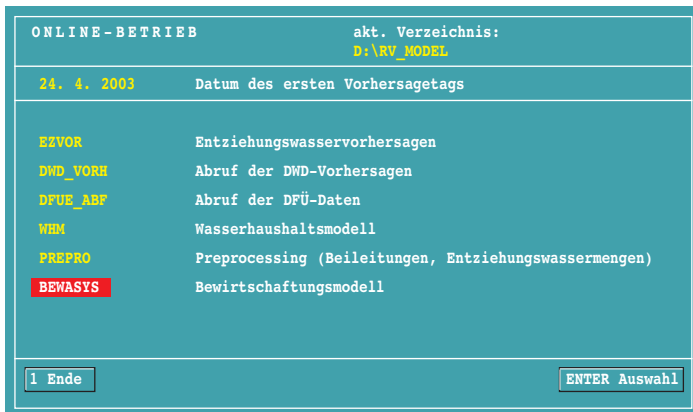


Bild 26: Programmoberflächen des Bewirtschaftungsmodells
Fig. 26: Graphical user interfaces of the modul for real-time river management

Talsperre	30. 9.	1.10.	2.10.	3.10.	4.10.	5.10.
Henne	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Möhne	8.500	8.500	8.500	8.500	8.500	8.500
Sorpe	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
Verse	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
Ennepe	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170
Ahausen	4.500	4.500	4.500	4.500	4.500	4.500

Bild 27: Maske zur Eingabe von Talsperrenabgaben
Fig. 27: Table for editing the discharges of the reservoirs

Es wurde schon bei der Entwicklung besonderer Wert darauf gelegt, ein robustes und leicht handhabbares System zu erhalten. Die Bilder 26 zeigen einen Ausschnitt aus der Benutzeroberfläche des Bewirtschaftungsmodells. Die Masken sind selbsterklärend und müssen vom Benutzer sukzessiv von oben nach unten abgearbeitet werden.

Besondere Bedeutung kommt dabei der Eingabe unterschiedlicher Talsperrenabgaben zu, um über Variantenrechnungen die Auswirkungen einzelner Abgaben auf die Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte zu simulieren und so die jeweils optimale Lösung zu finden. Bild 27 zeigt die entsprechende Eingabemaske.

In den Bildern 28 a und b werden zwei Beispiele von **Modell-ergebnissen** aus dem bisher einjährigen Testzeitraum dargestellt. Einmal handelt es sich um einen Zeitraum von Mitte Dezember 2002 bis Anfang Januar 2003 (Bild 28 a), in dem sich an den Gewässern im Einzugsgebiet der Ruhr ausgehend vom Niedrig- und Mittelwasserbereich ein Hochwasser entwickelte. Exemplarisch sind hier die Pegel Villigst/mittlere Ruhr, Hagen-Hohenlimburg/Lenne, Hagen-Eckesey/Volme und Hattingen/untere Ruhr dargestellt: in schwarz die gemessenen Ganglinien der mittleren täglichen Abflüsse in m^3/s , in blau die mit dem Modell simulierte Abflüsse. Die punktierte vertikale Linie nach dem 10. Tag kennzeichnet den Zeitpunkt, an dem die Vorhersage durchgeführt wurde. Im Zeitraum bis zum Vorhersagezeitpunkt, für den simulierte und gemessene Werte verfügbar sind, sollten die beiden Ganglinien möglichst gut übereinstimmen wie es z. B. im Bild 28 a bei den Pegeln Villigst, Hohenlimburg und Hattingen annähernd der Fall ist. Im sechstägigen Vorhersagezeitraum ist im operativen Fall, d. h. am Tag der Berechnung, nur die rote Vorhersageganglinie eingetragen.

Um ein Maß für die Güte der Anpassung zu haben, sind zum Vergleich die tatsächlichen (gemessenen) und die unter Kenntnis der gemessenen meteorologischen Daten vom Modellsystem simulierten Ganglinien eingetragen. Bild 28 a belegt, dass die Vorhersagen für die ersten drei Tage bei allen Pegeln erstaunlich gut mit den gemessenen übereinstimmen. Dies ist umso erfreulicher als es sich ab dem 29.12. um einen relativ steilen Abflussanstieg handelt. Die nächsten zwei Vorhersagetage sind für die am weitesten stromab gelegenen Stationen Hohenlimburg und Hattingen am besten angepasst. Der letzte Tag ist bei allen Stationen aufgrund zu niedriger Niederschlagsvorhersagen unbefriedigend.

Bild 28 b zeigt dagegen einen Ausschnitt aus der Niedrigwasserperiode des Sommers 2003. Auch hier ergibt sich ein ähnliches Bild. Die Anpassung des Modells, die gerade in solchen Trockenperioden für die Steuerung des Systems von großer Bedeutung ist, kann durchgängig als zufriedenstellend bis gut bezeichnet werden. Größere Abweichungen wie am dritten Tag beim Pegel Hagen-Eckesey sind mit der unzureichenden räumlichen Auflösung bzw. Genauigkeit der Niederschlagsvorhersage des DWD zu erklären.

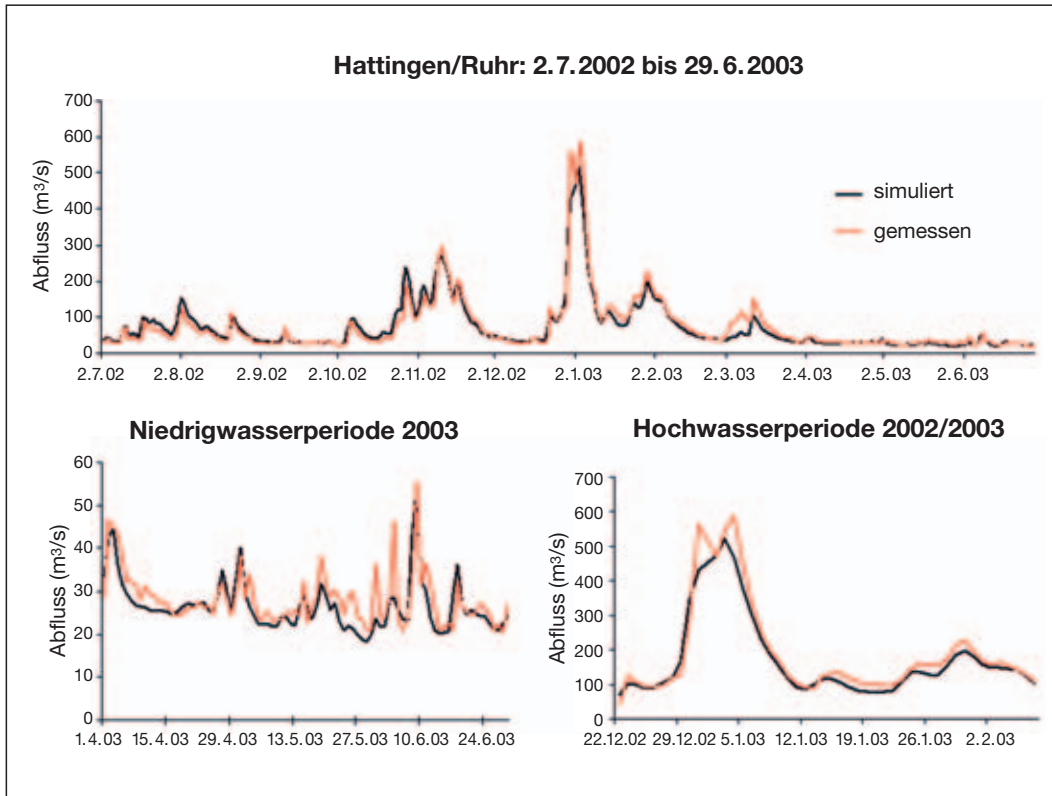


Bild 29: Güte der Modellergebnisse im einjährigen Testzeitraum
 Fig. 29: Comparison of measured and simulated data within a one-year test period

Es gibt grundsätzlich zwei Möglichkeiten dies zu verbessern:

- a) Verbesserung der kurzfristigen Wettervorhersage des DWD, insbesondere deren räumlicher Auflösung:
 Dem sind – wie Gespräche mit dem Deutschen Wetterdienst gezeigt haben – zurzeit noch methodische Grenzen, insbesondere bei konvektiven (sommerlichen) Ereignissen, gesetzt. In den übrigen Jahreszeiten ist eine deutliche Verbesserung in naher Zukunft zu erwarten.

- b) Verdichtung des Online-Niederschlagsmessnetzes:
 Daran wird zurzeit von der Abteilung Mengenwirtschaft und Morphologie gearbeitet, indem vorhandene Stationen Dritter (StuÄ, Wasserwerke u.a.) in das vorhandene Fernübertragungssystem eingebunden werden.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Entwicklung und Anwendung verbesserter raumzeitlicher Vorhersagemethoden mit Hilfe geostatistischer Verfahren. Hieran wird zurzeit im Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe unter Leitung von Dr. Ihringer intensiv gearbeitet.

Tabelle 14: Güte der Modellergebnisse im ersten Jahr der Anwendung
 Table 14: Accuracy of the model results with the one-year test period

Pegel	gemessen Mio. m ³	simuliert Mio. m ³	Abweichung %
Villigst/Ruhr	1.001	927	7,35
Hohenlimburg/Lenne	893	899	-0,69
Eckesey/Volme	311	291	6,31
Wetter/Ruhr	2.197	2.181	0,71
Hattingen/Ruhr	2.292	2.261	1,35
Werden/Ruhr	2.431	2.308	5,05
Mülheim/Ruhr	2.463	2.332	5,30

In Bild 29 sind die Ergebnisse der simulierten und die gemessenen Ganglinien für das gesamte Testzeitjahr (2.7.2002 bis 29.6.2003) dargestellt. Es zeigt sich eine durchweg gute Anpassung während den Niedrig- und Mittelwasserzeiten. Dies bestätigt auch Tabelle 14, in der für verschiedene Pegel in Ruhr, Lenne und Volme die gemessenen und simulierten Abflussvolumina des gleichen einjährigen Testzeitraums untereinander verglichen werden. Prozentuale Abweichungen zwischen 0,69 und 7,35 % sind bei der Simulation eines solch komplexen wasserwirtschaftlichen Systems mit solch extremen anthropogenen Einflüssen mehr als zufriedenstellend. Auffallend ist, dass bei den Messstellen, die am untersten Punkt des jeweiligen Flusses liegen (z. B. Wetter, Hattingen, Hohenlimburg) die geringeren Abweichungen auftreten. Offensichtlich gleichen sich bestimmte Einflüsse auf dem langen Fließweg aus.

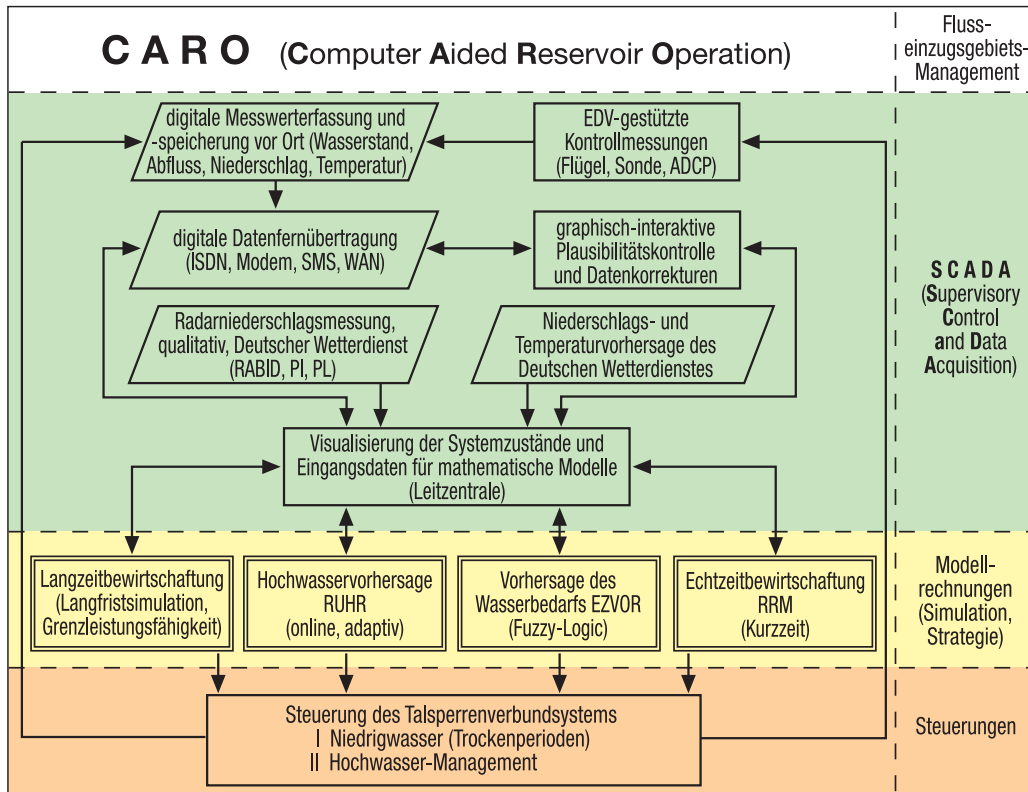


Bild 30: CARO als ganzheitliches Konzept zur Steuerung eines Talsperrensystems
Fig. 30: CARO, a comprehensive concept for the operation of a reservoir system

11.4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Echtzeitbewirtschaftungsmodell RRM (Real-time River Management) hat sich in der einjährigen Praxis nach entsprechender Schulung und einigen Verbesserungen, die z. B. die Berechnung verschiedener Varianten erleichtern, als außerordentlich nützlich erwiesen. Durch seinen Einsatz wurde die Steuerung des Talsperrensystems insbesondere während der Trockenperiode im Sommer 2003 optimiert und objektiviert.

Das vorgestellte Echtzeitbewirtschaftungsmodell ist ein wichtiger Baustein der von uns unter dem Namen CARO – analog zu CAD oder CAL – zusammengefassten EDV-gestützten Entscheidungshilfe (Decision Support System)

zur optimierten Talsperrensteuerung im Einzugsgebiet der Ruhr [9]. Bild 30 zeigt das ganzheitliche Konzept von CARO.

Um das Programmsystem CARO zu vervollständigen, ist vorgesehen, zum Ende des Jahres 2003 das Hochwasservorhersagemodell, das bisher nur für die besonders hochwassergefährdete Lenne existiert, auf die gesamte Ruhr zu erweitern.

In einem weiteren Schritt soll – beginnend in 2004 – mit der Entwicklung eines neuen stochastischen Langfristbewirtschaftungsmodell begonnen werden, um veränderte Randbedingungen in ihren Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit des wasserwirtschaftlichen Systems mit Hilfe von Langzeitsimulationen von Fall zu Fall abschätzen zu können.

Literatur:

- [1] Studie zur Durchgängigkeit der Ruhr und ihrer Nebengewässer. Abschlussbericht (2003).
- [2] Morgenschweis, G.; Nusch, E. A.: Wassermengen- und Gewässergüte-Monitoring im Einzugsgebiet der Ruhr. Wasser und Boden (55), 2003, 5, Seite 9-17.
- [3] Leavesley, G. H.; Stannard, L. G.: The Precipitation Runoff Modeling System – PRMS. Water Resources Publications: 'Computer Models of Watershed Hydrology' edited by V. P. Singh (1995).
- [4] Gitschel, C.: Computergestützte Generierung hydrologischer Simulationsmodelle. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2000, Heft 123.
- [5] Schulla, J.: Modellbeschreibung WaSiM-ETH. Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, ETH Zürich, 1999, unveröffentlicht.
- [6] IWK: Echtzeitbewirtschaftung der Talsperren im Einzugsgebiet der Ruhr. Zwischenbericht zum Proj. HY 98/10. Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (2000), unveröffentlicht.
- [7] IWK: Umstellung der Talsperrenbewirtschaftung für Niedrig- und Mittelwasserabflüsse auf Echtzeitbetrieb. Zwischenbericht zum Proj. HY 00/1. Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (2002), unveröffentlicht.
- [8] Brudy-Zippelius, Th.: Wassermengenbewirtschaftung komplexer Fluss-einzugsgebiete: Simulation und Echtzeitbetrieb. Diss. Universität Karlsruhe (2003).
- [9] Morgenschweis, G.; zur Strassen, G.: CARO – Ein Decision Support System zur Wassermengenbewirtschaftung der Talsperren im Einzugsgebiet der Ruhr. KA-Korrespondenz Abwasser (2003), 50, H. 2, Seite 206-212.



Kronprinzenstraße 37, 45128 Essen
Postfach 10 32 42, 45032 Essen
Telefon (02 01) 178-0
Fax (02 01) 178-14 25

Nachdruck – auch auszugsweise
– nur mit Quellenangabe gestattet.

Gedruckt auf umweltfreundlich herge-
stelltem Papier aus 50 % recycelten
Fasern.