

QSim - das Gewässergütemodell der BfG

Ein Instrument zur Simulation und Prognose des Stoffhaushalts und der Planktodynamik in Fließgewässern

Das Gewässergütemodell QSim beschreibt in mathematischer Weise die komplexen chemischen und biologischen Vorgänge in Fließgewässern. Ein wesentliches Merkmal ist die Verknüpfung von hydraulischen mit ökologischen Modellbausteinen. Im Modell werden die wichtigsten biologischen Prozesse des Sauerstoff- und Nährstoffhaushalts, die Algen- und Zooplanktonentwicklung sowie Prozesse am Gewässerbett berechnet (Abb. 1). QSim eignet sich zur Berechnung von einfachen Flusssträngen bis hin zu vernetzten Gewässersystemen mit Fließumkehr. Ferner lassen sich auch bühnenverbaute Strecken und deren Einfluss auf den Stoffhaushalt sowie Temperaturschichtungen und in deren Folge auftretende vertikale Stoffgradienten mit einem quasi-2D Ansatz abbilden. Eines der Hauptergebnisse ist die Simulation von Jahresgängen des Sauerstoffgehalts und anderer Wasserbeschaffenheitsparameter sowie biologischer Größen, etwa der Algenbiomasse, entlang eines Flusslaufs.

QSim wird in der BfG vor allem eingesetzt, um die Auswirkungen wasserbaulicher Maßnahmen auf die Wasserbeschaffenheit von Bundeswasserstraßen zu ermitteln und zu beurteilen. Außerdem werden mit QSim Fragestellungen aus der Wasserwirtschaft und dem Flussgebiets-

management sowie Klimawandelfragen bearbeitet. Die aktuelle Version QSim 13.3 ist das Resultat von 30 Jahren kontinuierlicher Entwicklungsarbeit und Erfahrungen aus einer Vielzahl von Anwendungen für verschiedene Fließgewässersysteme. In QSim werden so die Modellentwicklung, fachliche Anwendung und gewässerökologische Grundlagenforschung an der BfG integriert.

Modellbeschreibung

Das Gewässergütemodell QSim ist deterministisch, d.h. die einzelnen auf den Stoffhaushalt eines Gewässers wirkenden Prozesse werden funktional in Form von Differential- und algebraischen Gleichungen ohne den Einfluss des Zufalls beschrieben. Die Identifizierung und Parametrisierung der Funktionen basiert auf wissenschaftlich beschriebenen Modellansätzen für funktionelle Wirkungszusammenhänge; sind diese nicht ausreichend genau bekannt, werden empirische Formeln benutzt. Die betrachteten Zustandsgrößen werden als gleichverteilt über den gesamten Gewässerquerschnitt betrachtet (eindimensional). Das Modell ist modular aufgebaut, d.h. für jeden Prozess existiert eine eigene Subroutine. Abb. 1 zeigt den schematischen Aufbau und die Arbeitsweise des Gütemodells QSim (Version 13.0).

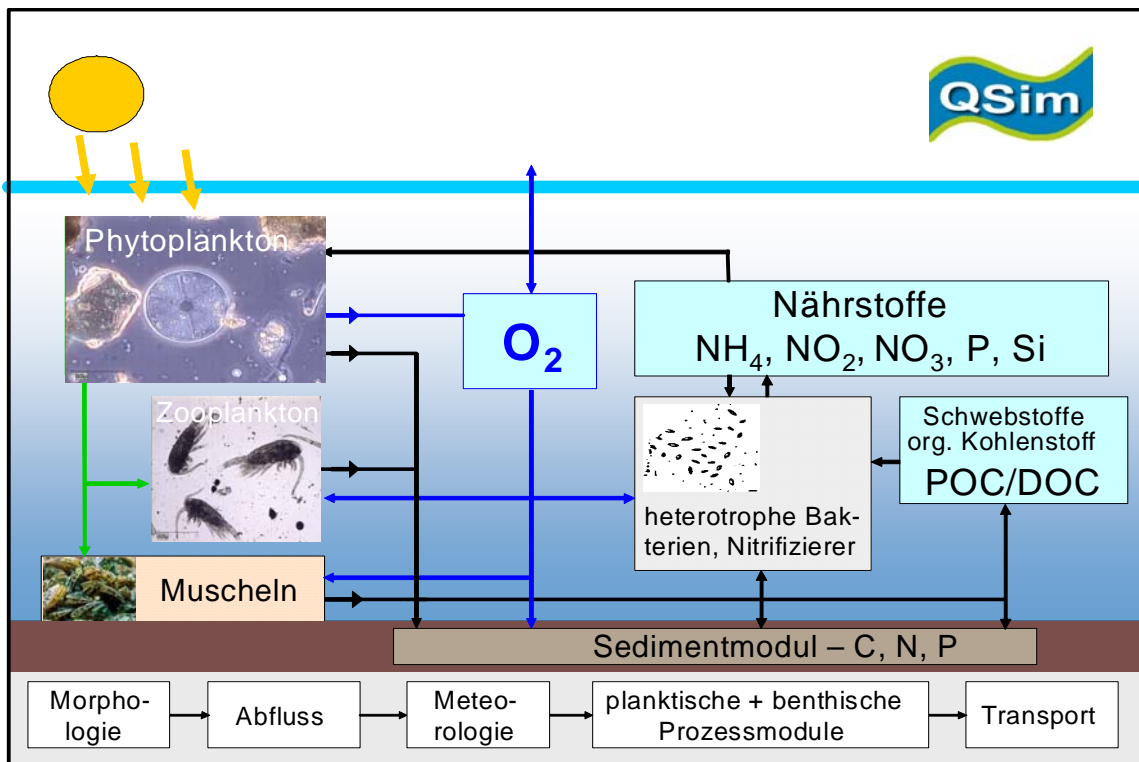


Abb. 1: Modellaufbau und Arbeitsweise von QSim

Tab.1: Prozesse und Eingabegrößen in QSim

Prozesse	Eingabegrößen
Abflusssimulation	Morphologisch/ hydrologisch: Flussgeometrie, Abfluss Meteorologisch: Globalstrahlung, Lufttemperatur, Bedeckungsgrad und Wolkentyp, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit Physikalisch/chemisch: Wassertemperatur, Sauerstoff, Chemischer Sauerstoffbedarf, Ammonium, Nitrit, Nitrat, o-Phosphat, Gesamt-N und -P, Silikat, pH-Wert, Alkalinität, Schwebstoff, Ca, Leitfähigkeit Biologisch: Biochemischer Sauerstoffbedarf (C- und N-bürtiger Anteil), Flagellaten, Planktische Algenbiomasse (Chlorophyll a) und Anteil von Kiesel-, Grün- und Blaualgen, Zooplankton (Rotatoriendichte), nitrifizierende Bakterien (<i>Nitrosomonas</i> und <i>Nitrobacter</i>), benthische Algen, Makrophyten, benthische Filtrierer (<i>Dreissena polymorpha</i> , <i>Chelicorophium curvispinum</i>)
Sedimentation	
Wärmehaushalt	
Unterwasserlichtklima	
Kalkkohlenäure-Gleichgewicht	
Sauerstoff- und Nährstoffhaushalt	
Bakterienwachstum	
Nitrifikation	
Algenwachstum	
Makrophytenwachstum	
Zooplanktonwachstum	
Wachstum benthischer Filtrierer	

QSim ist in FORTRAN 95 geschrieben und unter WINDOWS-Betriebssystemen lauffähig. Datenein- und -ausgabe sowie die Bedienung des Modells erfolgen über die Benutzeroberfläche GERRIS.

Für die ökologischen Modellbausteine wirken die Abflussdaten an den Modellrändern und die meteorologischen Daten für das Modellgebiet als antreibende Kräfte. In dem offline gekoppelten hydraulischen Modell HYDRAX kann der Abfluss unter Lösung der Saint-Venant Gleichungen wahlweise stationär oder instationär gerechnet werden. Alle von der Sonneneinstrahlung abhängigen Prozesse wie Temperatur und Algenwachstum werden dynamisch modelliert, indem entsprechend der Berechnungszeitschrittweite (in der Regel eine Stunde) ein Strahlungswert ermittelt wird. Das Modell ist praxisbezogen, d.h. es werden, soweit möglich, Eingabegrößen verwendet, die routinemäßig bei der chemisch-biologischen Überwachung von Fließgewässern erfasst werden.

Anwendungsbeispiele

Das Modell QSim quantifiziert die einzelnen gewässer-ökologisch relevanten Prozesse und ermöglicht damit eine in sich geschlossene Systemanalyse. Aufgrund seiner deterministischen Struktur ist QSim zudem für Prognosen geeignet. So können die Auswirkungen unterschiedlicher Flussmorphologien, z.B. veränderte Wassertiefen durch Fahrrinnenvertiefungen, auf die Wasserbeschaffenheit und das Plankton eines Flusses beschrieben und beurteilt werden. In den letzten Jahren bildeten Betrachtungen zum Einfluss des Klimawandels auf Stoffhaushalt und Phytoplankton sowie Wärmelastmodellierungen einen weiteren Schwerpunkt. Einen Überblick über die bisherigen QSim-Anwendungen gibt Tab. 2.

Elbe: Algenentwicklung unter Globalem Wandel

Die 700 km lange Fließstrecke von der Moldaumündung (Obříství, Elbe-km -114) bis zum Wehr Geesthacht (Elbe-km 585) wurde mit QSim modelliert, um die Auswirkungen veränderter klimatischer und sozioökonomischer Randbedingungen auf die Wasserbeschaffenheit der Elbe zu betrachten.

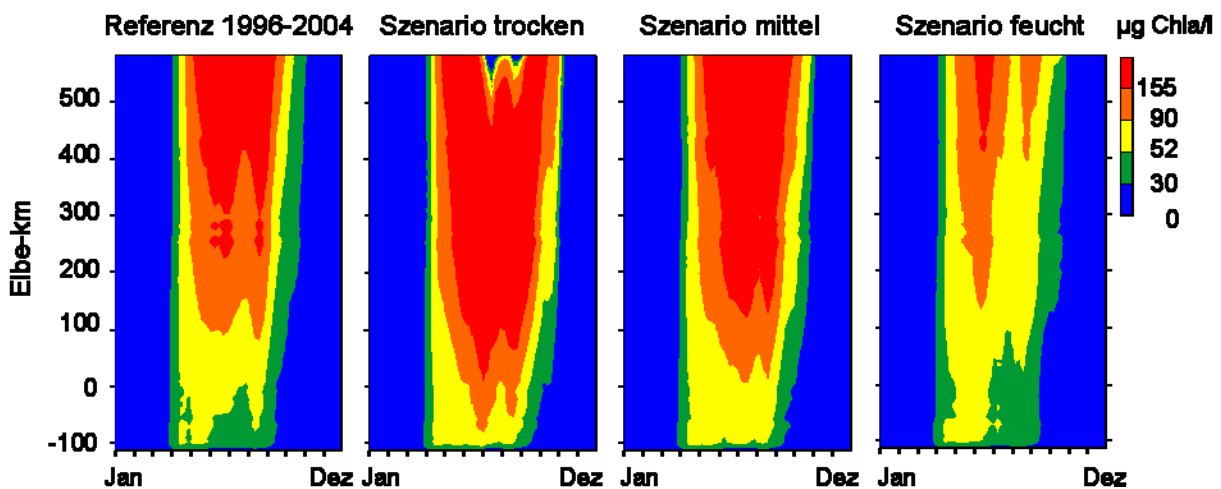


Abb. 2: Zeitliche und räumliche Simulation der Chlorophyll-a Konzentrationen in der Elbe unter verschiedenen Klimawandelszenarien. Klassengrenzen in µg Chla/l nach dem deutschen Bewertungsverfahren für Phytoplankton zur Umsetzung der WRRL. Elbe-km 0 entspricht tschechisch-deutscher Grenze.

In trockenen Szenarien resultieren die Klimaänderungen (reduzierter Abfluss, erhöhte Globalstrahlung und erhöhte Temperatur) in einem deutlich erhöhten Biomassezuwachs des Phytoplanktons in der oberen Mittelbebe etwa bis Magdeburg (Abb. 2). Im unteren Abschnitt der Fließstrecke wird dieser Effekt durch einen erhöhten Grazingdruck und Selbstbeschattung der Algen weitgehend kompensiert. Gleichzeitig stellt die in der Mittelbebe produzierte Algenbiomasse eine erhebliche Belastung für die unterstrom anschließende Tideelbe dar.

Mosel: Sommerliche Sauerstoffdefizite

In der Obermosel traten 1994 während des sommerlichen Niedrigwassers bei Palzem (Mosel-km 229) zeitweise deutliche Sauerstoffdefizite auf (Abb. 3 oben). Zeitgleich kam es zu einem Rückgang der Phytoplanktonkonzentrationen (Abb. 3 unten). Dies verdeutlicht den Einfluss der jahreszeitlichen Algenentwicklung auf den Sauerstoffhaushalt der Mosel. Die Modellsimulation zeigt darüber hinaus, dass die Abnahme der Algendichte und der damit einhergehende Rückgang der biogenen Belüftung im Sommer auf die Filtrieraktivität (Grazing) durch Muscheln zurückzuführen ist.

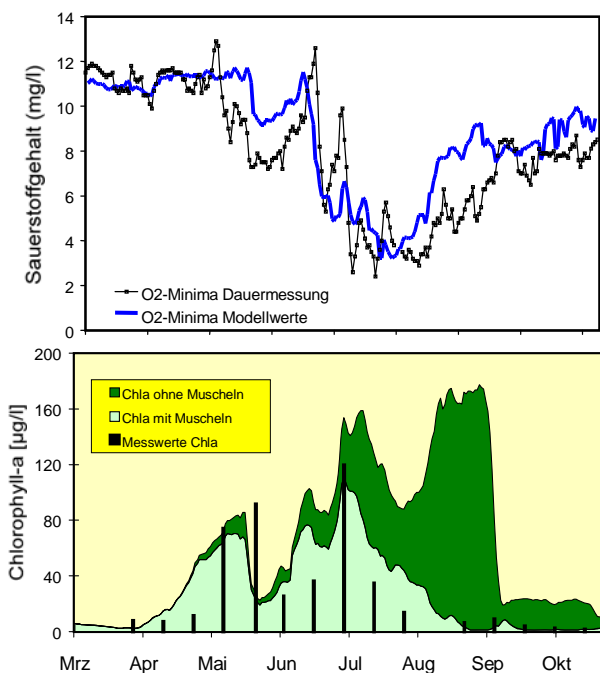


Abb. 3 Sauerstoffdefizit und Algenbiomasseentwicklung (Chlorophyll a) in der Mosel bei Palzem im Jahr 1994 - Messdaten und Modellsimulationen.

Havel: Zukünftige Wasserqualität

Die Havel zwischen Berlin und Brandenburg ist Teil des Modellgebietes der Berliner Gewässer, einem komplexen Wasserstraßennetz, das durch Stauregulierung, niedrige Fließgeschwindigkeiten und hohe Nährstofffrachten geprägt wird. Im späten Sommer kommt es an Havel und Spree regelmäßig zu Blaualgenblüten, gelegentlich treten Sauerstoffdefizite auf, die Fischsterben zur Folge haben können.

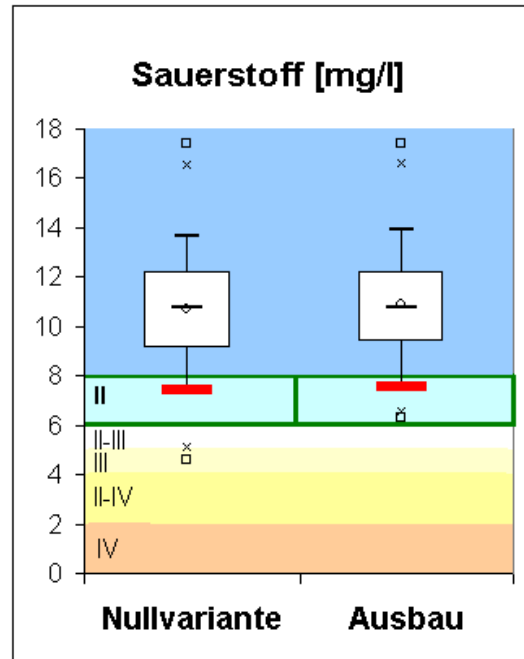


Abb. 4: Modellerte Verteilung (Boxplots) der Sauerstoffkonzentrationen der Flusshavel (UHW-km 32-55), 2003 und 2004: Nullvariante und Ausbauvariante für Planung 2005, Klassifizierung des 90 Perzentils (rot).

Um mögliche zukünftige Änderungen durch Ausbau (Abb. 4), Klimawandel und veränderte Bewirtschaftung auf die Gewässergüte abschätzen zu können, wird die prozessorientierte Gewässergütemodellierung mit QSim hier intensiv genutzt. Dabei arbeitet die BfG nicht nur an Aufträgen der WSV sondern auch in aktuellen Forschungsvorhaben. In der Klimafolgenforschung wird QSim an den Berliner Gewässern eingesetzt (www.kliwas.de). An der Kladower Seenstrecke (Havel) wird die Fragestellung bearbeitet, welche Folgen eine Reduktion der Stickstoffeinträge für das Gewässer hat (www.nitrolimit.de).

Perspektiven

Die vertikal aufgelöste Berechnung der Prozesse in der Wassersäule von geschichteten Gewässern und die Darstellung von Flusseen sollen verbessert werden. Das bereits entwickelte Sedimentmodul wird für verschiedene Gewässer erprobt und weiterentwickelt, um die Austauschprozesse zwischen Wassersäule und Sediment im Modell besser abzubilden. QSim ist für mehrdimensionale Berechnungen, wie sie u.a. für Modellierungen von Ästuaren benötigt werden, umstrukturiert und erweitert worden und wird z. Zt. getestet. Dadurch entsteht eine Kopplung von QSim mit komplexen hydrodynamischen Modellen und morphologischen Modellen.

QSim-Homepage

http://www.bafg.de/DE/08_Ref/U2/01_mikrobiologie/QSIM/qsim_node.html

Tab. 2: Übersicht der Anwendungen des Gewässergütemodells QSim

	Anwendungsbereich	Simulationsgebiet und Zeitraum
Auswirkung wasserbaulicher Maßnahmen auf den Stoffhaushalt und ökologische Wechselwirkungen	Stauregelung	Fulda (1980, 1987), Saar (1983, 1986), Donau (1986, 1989, 2000, 2012), Altmühl (1988), Saale (2002)
	Hypothetisches Kulturwehr	Elbe (1992)
	Staulegung	Aller (1994, 1995)
	Verbreiterung, Vertiefung	Datteln-Hamm-Kanal (1993), Dortmund-Ems-Kanal (1994), Elbe-Havel-Kanal (1993), Mittellandkanal (1994), Peenestrom (1994), Weser (1989), Neckar (1993), Obermosel (1998), Havel (2005), Sacrow-Paretzer Kanal (2004), Teltowkanal u. Havel (2008)
	Veränderte Abflussaufteil. im Gewässernetz	Spree/ Havel/ Teltowkanal (1997, 2003)
Auswirkung Reinigungsstrategien	Aufteilung von Belüftungskosten	Saar (1992)
	Künstlicher Sauerstoffeintrag an Wehren	Main (1994), Saar (2001)
	Bau eines Seitenkanals	Saale (2003)
	Reduzierung von P und N	Modellfluss (Nährstoff-Wirkstudie 1991), NITROLIMIT (Elbe, Havel 2010-2016), RESI (Elbe, Donau seit 2015)
Wärmelast	Wärmeeinleitungen und Temperaturregime	Berliner Gewässer, Donau, Rhein, Saar
Auswirkungen globaler Wandel	Änderungen von Nährstoffkonzentrationen und Klima, Modellvernetzung	GLOWA Elbe I-III Projekte (2000-2010), KLIWAS (Rhein, Elbe, Berliner Wasserstraßen 2009-2013), Expertennetzwerk (seit 2017), ProWas (seit 2017)
Analyse v. Ereignissen, Prozessanalyse Stofflaufzeiten	Fischsterben, Sauerstoffminima	Mosel (1980, 1993, 1997), Elbe (1994, 1998, 2003), Saar (2001)
	Komponenten des O ₂ -Haushaltes	Elbe (1997)
	Tracerversuche	Spree/ Havel (Projekt Flusshygiene seit 2015)
Erprobung neuer Modellbausteine	Hygienische Belastung	
	Vergleich Simulationswerte / fließzeitkonforme Messwerte, 2D-Simulationen	Mosel (1984, 1986), Saar (1988-1995), Elbe (1997, 2003, 2005-2007), Rhein (2010, 2011), Saar (2004-2005), Tideelbe (2007)
Analyse der pelagisch – benthischen Kopplung	Grazing des Phytoplanktons durch Dreikantmuscheln, Wachstum und Nahrungsangebot der Dreikantmuscheln	Mosel, Saar (1999)
		Rhein (2000), Donau (2000)

Weiterführende Literatur

- Becker A, Kirchesch V, Baumert HZ, Fischer H, Schöl A (2010) Modelling the effects of thermal stratification on the oxygen budget of an impounded river. *River Research and Applications* 26: 572-588.
- Hardenbicker P, Viergutz C, Becker A, Kirchesch V, Nilson E & Fischer H (2017) Water temperature increases in the river Rhine in response to climate change. *Regional Environmental Change* 17 (1): 298-308. DOI: 10.1007/s10113-016-1006-3
- Hein B, Viergutz C, Wyrwa J, Kirchesch V, & A Schöl (2016) Impacts of climate change on the Water Quality of the Elbe Estuary. *Journal of Applied Water Engineering and Research*. DOI: 10.1080/23249676.2016.1209438.
- Kirchesch V, Schöl A (1999) Das Gewässergütemodell QSIM - Ein Instrument zur Simulation und Prognose des Stoffhaushalts und der Planktodynamik von Fließgewässern. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 43 (6): 302-308. <http://www.hywa-online.de/>
- Quiel K, Becker A, Kirchesch V, Schöl A, Fischer H (2011) Influence of global change on phytoplankton and nutrient cycling in the Elbe River. *Regional Environmental Change* 11: 405-421.
- Schöl A, Kirchesch V, Bergfeld T, Müller D (1999) Model-based analysis of oxygen budget and biological processes in the regulated rivers Moselle and Saar: modelling the influence of benthic filter feeders on phytoplankton. *Hydrobiologia* 410: 167 – 176.
- Schöl A, Kirchesch V, Bergfeld T, Schöll F, Borchering J, Müller D (2002) Modelling the chlorophyll a content of the River Rhine - interaction between riverine algal production and population biomass of grazers, rotifers and zebra mussel, *Dreissena polymorpha*. *International Review of Hydrobiology* 87: 295-317.

Laufende Forschungsprojekte mit QSim

www.bmvi-expertennetzwerk.de/DE/Projekte/TF1/SP-Schiffbarkeit.html; bmbf.nawam-rewam.de/projekt/flusshygiene; www.resi-project.info/; www.bafg.de/DE/07_Nachrichten/20170215_prowas.html; www.kliwas.de; www.nitrolimit.de

Ansprechpartner: V. Kirchesch, 0261-1306-5537, volker.kirchesch@bafg.de; A. Schöl, -5514, schoel@bafg.de; Dr. A. Becker, -5520, becker@bafg.de; Dr. T. Bergfeld-Wiedemann, -5217, bergfeld-wiedemann@bafg.de; Dr. H. Fischer, -5458, helmut.fischer@bafg.de

QSim – the water quality model of the Federal Institute of Hydrology (BfG)

A tool to simulate and predict the dynamics of matter budgets and plankton in rivers

The water quality model QSim describes in a mathematical way the complex chemical and biological processes in running waters. An important feature of QSim is the close linkage of hydraulic with ecological modules. In the model, the most important biological processes of the oxygen and nutrient budget as well as the development of phyto- and zooplankton and the processes at the river bottom are calculated (figure 1). The model is suitable to simulate processes in simple channels as well as in complex river networks and water bodies with variable flow directions like estuaries. Furthermore, engineered river stretches with groynes (wing dams) and their influence on budgets of nutrients and oxygen can be modelled. A two-dimensional approach in QSim can reproduce thermal stratification and resulting vertical gradients of matter. As major results, annual cycles of oxygen and nutrient concentration as well as biological variables (e. g. algal biomass) can be calculated for the river continuum.

The major purpose of QSim is to determine and evaluate the consequences of engineering measures on the water quality of federal waterways. Furthermore, problems of

water and catchment management as well as impacts of climate change are examined with QSim. The current version QSim 13.0 is the result of 30 years of continuous development and experience from numerous applications to various river systems in Germany. The synergy of model development and application and hydroecological fundamental research will guarantee the enhanced applicability of QSim in the future.

Model description

QSim is a deterministic water quality model, meaning that the processes relevant for the matter budget of a river are described functionally by differential and algebraic equations without any stochastic effect. Identification and parameterisation of the mathematical functions are based on published scientific knowledge or on own experimental results; if this is not sufficient, empirical equations are used. The variables are considered to be homogeneously distributed across the river's cross section (one-dimensional model). The model has a modular structure, i. e. for each process exists a separate subroutine (figure 1, table 1).

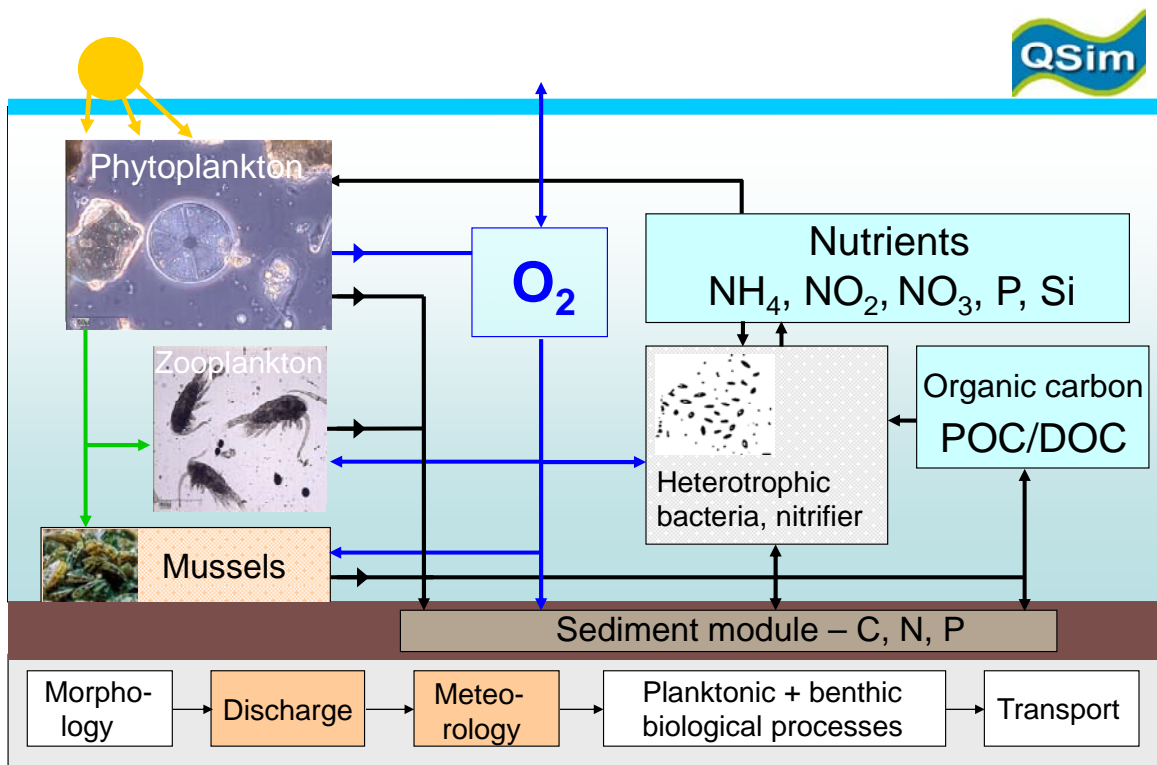


Figure 1: Module structure and functionality of QSim.

Tab.1: Processes and input variables in QSim.

Processes	Input variables
Discharge	Morphological and hydrological: Cross sections, discharge
Sedimentation	
Heat budget	Meteorological: Global radiation, air temperature, cloud cover, humidity, wind velocity
Light climate	
Calcium-carbon dioxide budget	Physical and chemical: water temperature, oxygen, chemical oxygen demand, nitrate, ammonium, ortho-phosphate, silicate, pH, alkalinity, seston
Oxygen and nutrient budgets	
Bacterial growth	Biological: Biological oxygen demand (carbon-derived and nitrification-derived), biomass of planktonic algae (chlorophyll a) and proportion of diatoms, green algae and cyanobacteria, zooplankton (abundance of flagellates and rotifers), benthic algae, macrophytes, benthic filter feeders (<i>Dreissena polymorpha</i> , <i>Chelicorophium curvispinum</i>)
Nitrification	
Algal growth	
Macrophyte growth	
Zooplankton growth	
Growth of benthic filter feeders	

QSim is written in FORTRAN 95 and runs under all Windows operating systems. In- and output of data as well as the model operation are performed across the user interface GERRIS.

The ecological modules are driven by the discharge at the upper boundary (the starting point of the model section) and of the main tributaries as well as by meteorological conditions (global radiation, air temperature, cloudiness, wind velocity). The discharge is calculated using Saint-Venant equations by the hydraulic model HYDRAX which is coupled offline with QSim. Discharge is calculated either in a stationary (constant discharge during the model run) or an instationary way (changing discharge during the model run). All variables depending on solar radiation (e.g. temperature and algal growth) are modelled dynamically by using a specific value for radiation in each calculation step (usually one hour). The model requires input data of water quality parameters that are usually determined during routine monitoring programs.

Examples

QSim quantifies various relevant processes in aquatic ecosystem ecology and thereby allows a self-contained system analysis. Because of its deterministic structure, QSim is also appropriate for predictions. For instance, the effect of various morphological alternatives, e.g. changes in water depth by deepening of the navigation channel, on water quality and the plankton community of a river can be described and evaluated. In recent years, further investigations focused on the influence of climate change on the matter budget and phytoplankton dynamics as well as simulations of the thermal load. Table 2 provides an overview over the previous applications of QSim.

Elbe: Phytoplankton dynamics under global change

The impact of climatic and socio-economic change on the water quality was simulated for a 700 km section of the Elbe between Obříství, Elbe-km -114, and the tidal weir of Geesthacht, Elbe-km 585 to investigate the effects of changing climatic and socio-economic boundary conditions on the water quality of the Elbe.

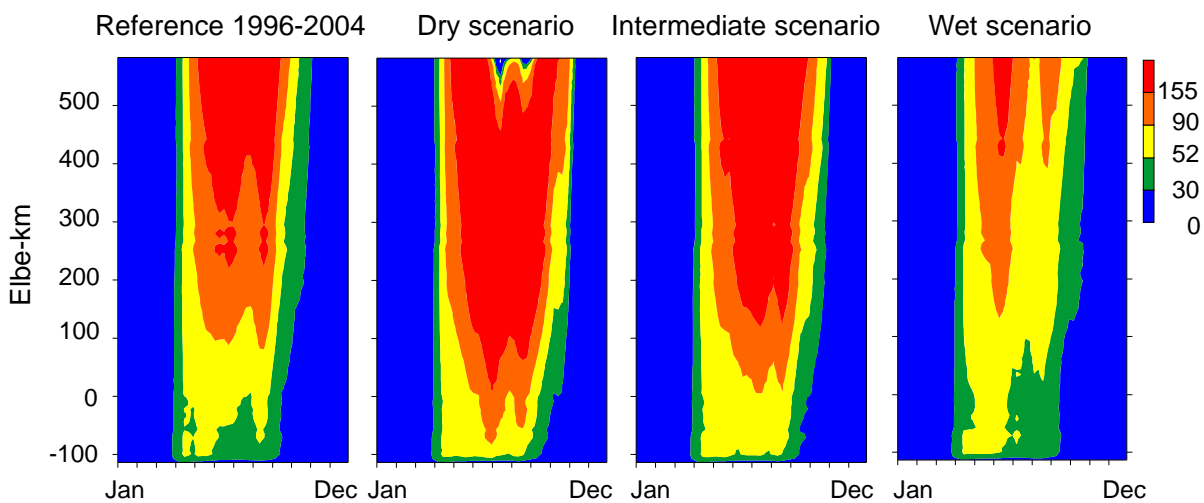


Figure 2: Spatiotemporal simulation of chlorophyll a concentrations in the Elbe under different climate change scenarios. Colors depict simulated chlorophyll-a concentrations indicating water quality according to the German assessment methods for the implementation of the Water Framework Directive. Elbe-km -114 is the confluence with the Vltava at Obříství, Elbe-km 0 is at the Czech-German border.

In dry scenarios, climate change (reduced discharge, slightly enhanced global radiation and higher temperature) causes a strongly enhanced growth of phytoplankton in the upper Middle Elbe down to river-km 300 (figure 2). In the lower section of the Middle Elbe, this effect is mostly compensated by zooplankton grazing and by self-shading of phytoplankton. The algal biomass produced in the Middle Elbe constitutes a strong, so called secondary pollution for the downstream areas, particularly the Elbe Estuary.

Mosel: Oxygen deficiencies during summer

In the upper Moselle at Palzem (Moselle-km 229), significant oxygen deficiencies occurred during low-flow situations in summer (figure 3, upper panel). Concurrently, the algal biomass (measured as chlorophyll a content) decreased substantially (figure 3, lower panel). This surveillance demonstrates the influence of the seasonal growth dynamics of algae on the oxygen budget of the Moselle. In a modelling approach with and without benthic filter feeders it could be shown that the decrease of algal biomass and the concurrent decrease of biogenic oxygen are caused by the filtering activity (grazing) of mussels (*Dreissena polymorpha*).

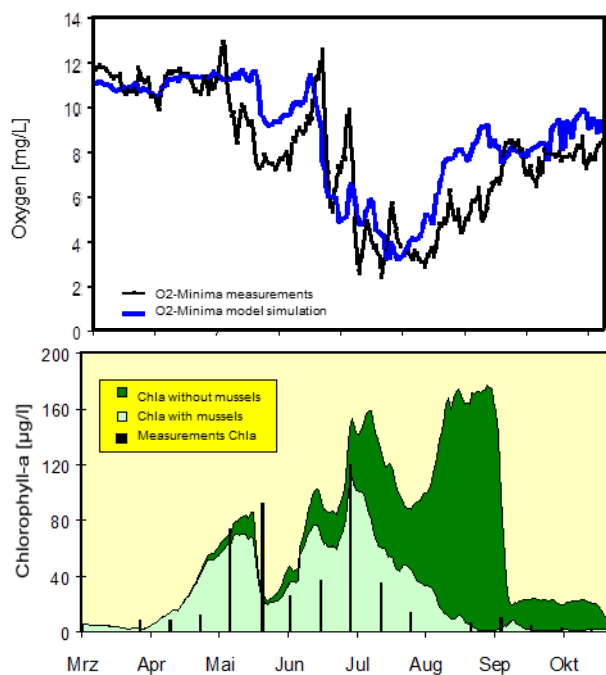


Figure 3: Oxygen and algal biomass (chlorophyll a) dynamics in the Upper Moselle at Palzem (Mosel-km 229) in 1994 – measurements and model simulation.

Havel: Future water quality

The river Havel between Berlin and Brandenburg, as well as the river Spree, is part of a complex network of rivers, lakes and channels, characterized by impoundments, flow regulation, low flow velocities and high nutrient loads. Cyanobacterial blooms regularly occur in the rivers Havel and Spree in late summer; oxygen deficiencies can occur occasionally that can be followed by fish kills.

Process-based simulations with QSim are used intensely in order to simulate future effects of river training (figure 4), climate change and changes in river management on the water quality. This work is assigned by the Water and Navigation Administration, as well as funded by actual research projects. In climate impact studies, QSim is applied at the Berlin waterways (www.kliwas.de). At the Lower Havel in Berlin, simulations are run to test the consequences of nutrient and, particularly, nitrogen reduction on the phytoplankton dynamics (www.nitrolimit.de).

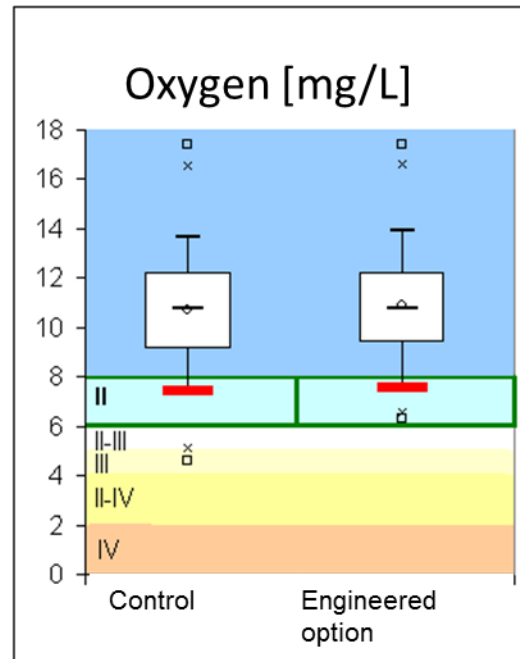


Figure 4: Simulated distribution (boxplots) of the oxygen concentrations in the Havel (Havel-km 32-55), years 2003 and 2004: Control and engineered option, classification of water quality (red) according to the 10-percentile of oxygen concentration.

Perspectives

In the future, we aim to improve the simulation of vertically resolved processes in the water column of stratified waters and riverine lakes. A recently developed sediment module is now being tested in order to better depict exchange processes between the water column and the sediments in various river systems.

QSim is restructured and expanded for multi-dimensional calculations, as e.g. needed for the simulation of estuaries. We actually test the multi-dimensional approach. This includes the coupling of QSim with complex hydrodynamic and morphological models.

QSim-Homepage

http://www.bafg.de/DE/08_Ref/U2/01_mikrobiologie/QSIM/qsim_node.html

Tab. 2: Previous applications of the water quality QSim.

Field of application	Specific problem	Simulation area and period
Effect of engineering measures on matter budgets and ecological interactions	Weirs and damming	Fulda (1980, 1987), Saar (1983, 1986), Donau (1986, 1989, 2000, 2012), Altmühl (1988), Saale (2002)
	Weir in side channel	Elbe (1992)
	River rehabilitation	Aller (1994, 1995)
	Morphological changes: widening and/or deepening	Datteln-Hamm-Kanal (1993), Dortmund-Ems-Kanal (1994), Elbe-Havel-Kanal (1993), Mittellandkanal (1994), Peenestrom (1994), Weser (1989), Neckar (1993), Obermosel (1998), Havel (2005), Sacrow-Paretzer Kanal (2004), Teltowkanal u. Havel (2008)
	Changed discharge distribution	Spree/ Havel/ Teltowkanal (1997, 2003)
Effects of nutrient reduction	Distribution of aeration costs	Saar (1992)
	Artificial aeration downstream of weirs	Main (1994), Saar (2001)
	Construction of a navigation channel	Saale (2003)
	Reduction of P and N	Nutrient impact study (1991), NITROLIMIT (Elbe, Havel 2010-2016), RESI (Elbe, Danube since 2015)
Thermal loads	Thermal pollution and temperature regime	Berlin Waterways, Danube, Rhine, Saar
Global change impacts	Climate change, change of nutrient inputs, model chains and model networks	GLOWA Elbe I-III projects (2000-2010), KLIWAS (Rhein, Elbe, Berlin Waterways 2009-2013), Expertennetzwerk (since 2017), ProWas (since 2017)
Analysis of distinct events, process analyses	Fish kills, oxygen depletion,	Moselle (1980, 1993, 1997), Elbe (1994, 1998, 2003), Saar (2001)
	Components of the oxygen budget	Elbe (1997)
	Tracer studies	Spree/ Havel (Project Flusshygiene since 2015)
Test of new modules	Hygienic water quality	Spree/ Havel (Project Flusshygiene since 2015)
	Comparison of simulations with Lagrangian field data, quasi-2D-Simulations, simulation of side zones (groyne fields)	Mosel (1984, 1986), Saar (1988-1995), Elbe (1997, 2003, 2005-2007), Rhein (2010, 2011), Saar (2004-2005), Tideelbe (2007)
Analysis of pelagic – benthic coupling	Grazing of phytoplankton, growth and food supply of Zebra Mussels	Mosel, Saar (1999) Rhein (2000), Donau (2000)

Further readings

- Becker A, Kirchesch V, Baumert HZ, Fischer H, Schöl A (2010) Modelling the effects of thermal stratification on the oxygen budget of an impounded river. *River Research and Applications* 26: 572-588.
- Hardenbicker P, Viergutz C, Becker A, Kirchesch V, Nilson E & Fischer H (2017) Water temperature increases in the river Rhine in response to climate change. *Regional Environmental Change* 17 (1): 298-308. DOI: 10.1007/s10113-016-1006-3
- Hein B, Viergutz C, Wyrwa J, Kirchesch V, & A Schöl (2016) Impacts of climate change on the Water Quality of the Elbe Estuary. *Journal of Applied Water Engineering and Research*. DOI: 10.1080/23249676.2016.1209438.
- Kirchesch V, Schöl A (1999) Das Gewässergütemodell QSIM - Ein Instrument zur Simulation und Prognose des Stoffhaushalts und der Planktondynamik von Fließgewässern. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 43 (6): 302-308. <http://www.hywa-online.de/>
- Quiel K, Becker A, Kirchesch V, Schöl A, Fischer H (2011) Influence of global change on phytoplankton and nutrient cycling in the Elbe River. *Regional Environmental Change* 11: 405-421.
- Schöl A, Kirchesch V, Bergfeld T, Müller D (1999) Model-based analysis of oxygen budget and biological processes in the regulated rivers Moselle and Saar: modelling the influence of benthic filter feeders on phytoplankton. *Hydrobiologia* 410: 167 – 176.
- Schöl A, Kirchesch V, Bergfeld T, Schöll F, Borchering J, Müller D (2002) Modelling the chlorophyll a content of the River Rhine - interaction between riverine algal production and population biomass of grazers, rotifers and zebra mussel, *Dreissena polymorpha*. *International Review of Hydrobiology* 87: 295-317.

Recent research projects using QSim

www.bmvi-expertennetzwerk.de/DE/Projekte/TF1/SP-Schiffbarkeit.html; bmbf.nawam-rewam.de/projekt/flusshygiene; www.resi-project.info/; www.bafg.de/DE/07_Nachrichten/20170215_prowas.html; www.kliwas.de; www.nitrolimit.de

Contact: Volker Kirchesch, 0261-1306-5537, volker.kirchesch@bafg.de; Andreas Schöl, -5514, schoel@bafg.de; Annette Becker, -5520, becker@bafg.de; Tanja Bergfeld-Wiedemann, -5217, bergfeld-wiedemann@bafg.de; Helmut Fischer, -5458, helmut.fischer@bafg.de