

Operationelle Modellierung des Schadstofftransports als Teil der Havariebekämpfung an der Elbe

Dr.-Ing. Stephan Mai

1 Einleitung

Die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, Art. 11 (3) 1) [2000] fordert für jede Flussgebietseinheit als grundlegenden Teil des zur Erreichung der Umweltziele festgelegten Maßnahmenprogramms den Aufbau von Strukturen zur Frühwarnung für den Fall unvorhergesehener Unfälle. In diesen Rahmen ist auch der bereits vor Einführung der WRRL seit 1991 bestehende, durch die Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE) – Arbeitsgruppe Unfallbedingte Gewässerbelastungen (H) – erarbeitete Internationale Warn- und Alarmplan Elbe (IWAP), der zuletzt im Jahr 2006 aktualisiert worden ist, einzuordnen. Zur Präzisierung der als Teil des IWAP zu erstellenden Meldungen ist von der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Zusammenarbeit mit dem Leichtweiß-Institut und den tschechischen Institutionen Povodi Labe, CHMU und VUV das numerische Modell „Alarmmodell Elbe“ (ALAMO) [HANISCH et al. 2000, HANISCH et al. 2002] zur Simulation des Schadstofftransports nach unfallbedingter Gewässerbelastung entwickelt worden und wird nun operationell von den Internationalen Hauptwarnzentralen (IHWZ) eingesetzt, wobei durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde eine laufende Aktualisierung der Modellparameter, z.B. der Wasserstands-Abfluss-Beziehungen (in Zusammenarbeit mit den Wasser- und Schifffahrtsämtern), mit anschließender Verifikation durch Tracerversuche, welche während des Modellaufbaus zur Kalibrierung der Modellparameter eingesetzt worden sind [HANISCH et al. 2000, DITTRICH und ETTMER 2002], sowie die erforderlichen Anpassungen an aktuelle Vorgaben des IWAP erfolgen.

Im Folgenden werden die mathematischen Grundlagen des Modells ALAMO sowie die Modellfunktionalität im operationellen Betrieb erläutert. Die zur Modellkalibrierung und Verifizierung durchgeführten Tracerversuche werden dargestellt und für einen im Oktober 2004 durchgeführten Tracerversuch sowie für eine im Januar 2006 eingetretene unfallbedingte Cyanid-Verunreinigung der Elbe den Berechnungsergebnissen des Modells ALAMO gegenübergestellt.

2 Mathematische Grundlagen des Modells

Die Modellierung des Schadstofftransport ist in ALAMO auf der Grundlage des von TAYLOR [1954] entwickelten Dispersions- bzw. Diffusionsansatzes realisiert. Neben dem dispersiven

und diffusiven Transport im Hauptstrom des Flusses werden in ALAMO der Wasseraustausch zwischen dem Hauptstrom und den ufernahen Stillwasserzonen (siehe hierzu z.B. WEITBRECHT [2004]) sowie der Schadstoffabbau berücksichtigt.

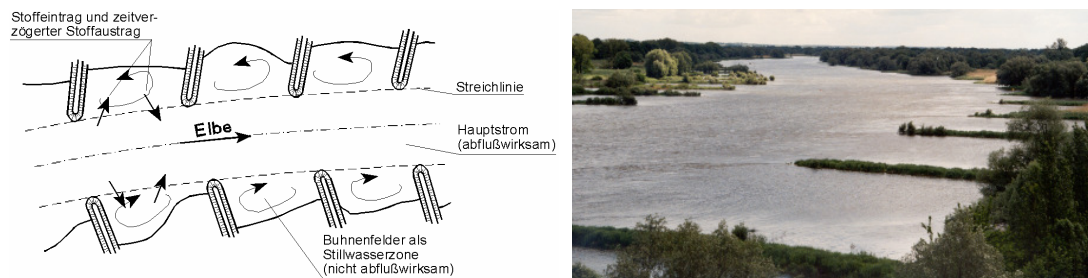


Abb. 1: Hauptstrom und Stillwasserzone eines Flusses (links: schematisch, rechts: in der Natur) [aus HANISCH et al. 2004(a)]

Mathematisch führt dies zu folgendem Differentialgleichungssystem zur Beschreibung der Schadstoffkonzentration im Hauptstrom und in der Stillwasserzone:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -v \frac{\partial c}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \epsilon D_s (c - s) - k c \qquad \frac{\partial s}{\partial t} = D_s (c - s) - k s$$

c : Schadstoffkonzentration im Hauptstrom, s : Schadstoffkonzentration in der Stillwasserzone, v : mittlere Fließgeschwindigkeit, k : schadstoffspezifische Abbaurrate, D_L : Dispersionskoeffizient, D_s : Austauschrate zwischen Hauptstrom und Stillwasserzone, ϵ : Querschnittsflächenverhältnis von Stillwasserzone zu Hauptstrom

Die Parameter dieses Differentialgleichungssystems v , ϵ , D_s und D_L sind abhängig vom Abfluss und werden jeweils über einen Potenzansatz aus dem Abfluss ermittelt:

$$\epsilon = a_\epsilon \cdot Q^{b_\epsilon} \qquad v = a_v \cdot Q^{b_v} \qquad D_L = a_L \cdot Q^{b_L} \qquad D_s = a_s \cdot Q^{b_s}$$

Q : Abfluß, a_ϵ , b_ϵ : Parameter des Querschnittsflächenverhältnisses, a_v , b_v : Parameter der Strömungsgeschwindigkeit, a_L , b_L : Parameter des Dispersionskoeffizienten, a_s , b_s : Parameter der Austauschrate

Die Ermittlung der Parameter a_v und b_v ist mit Hilfe von für die Elbe zwischen Nĕmčice, Tschechische Republik, und Geesthacht durchgeführten eindimensionalen hydronumerischen Simulationen erfolgt [DREWES et al. 2001, SCHMITT et al. 2001]. Die Kalibrierung der Parameter a_ϵ , b_ϵ , a_L , b_L , a_s und b_s basiert auf den im folgenden Kapitel dargestellten Tracerversuchen [DITTRICH und ETTMER 2002].

ALAMO nutzt zur Lösung des Differentialgleichungssystems den von STEINEBACH [1995] entwickelten Rechenkern AMOR (Alarmmodell Rhein), welches auf dem Rosenbrock-Wanner-Verfahren basiert [RENTROP und STEINEBACH 1997].

3 Modellverifikation durch Tracorexperimente

3.1 Überblick über die Experimente

Für die Kalibrierung und Verifizierung von ALAMO sind seit 1997 neun Tracerversuche in der Elbe durchgeführt worden (Tabelle 1). Die Untersuchungen decken dabei einerseits die Elbe regional zwischen Nĕmčice und Geesthacht ab. Andererseits unterscheiden sich die Versuche im Bezug auf die herrschenden Abflussbedingungen, um eine Kalibrierung und Verifizierung des für Schadstofftransportvorhersagen bei Abflüssen zwischen MNQ und MHQ entwickelten ALAMO über einen weiten Teil des Einsatzbereichs zu ermöglichen.

Tabelle 1

Überblick über die als Teil der Entwicklung von ALAMO durchgeführten Tracerversuche

Datum	Einleitungs-ort	Elbe-km	Tracer-menge [kg]	Abfluß* Q [m³/s]	MNQ* [m³/s]	MHQ* [m³/s]	Erläuterung in
15.07.97	Schmilka	4,1	33,5	330	102	1480	HANISCH ET AL. 1998 HANISCH ET AL. 2004(b)
30.11.97	Ústí	-37,0	12,1	130	91	1430	DOSTÁL ET AL. 1998 HANISCH ET AL. 2004(b)
27.10.98	Elster	200,4	26,4	265	130	1490	HANISCH ET AL. 2004(b)
26.04.99	Mělník	-104,8	24,0	255	76	1324	DOSTÁL ET AL. 1999 HANISCH ET AL. 2004(b)
11.10.99	Elster	200,4	26,0	160	130	1490	HANISCH ET AL. 2004(b)
29.11.99	Nĕmčice	-249,2	2,0	16	12	309	DOSTÁL ET AL. 2000 HANISCH ET AL. 2004(b)
29.03.01	Schmilka	4,1	75,8	912	102	1480	HANISCH ET AL. 2004(b)
06.10.04	Mauken	184,5	20,0	136	114	1380	MAI ET AL. 2006 (a)
02.05.05	Nĕmčice	-249,2	8,0	52	12	309	

Je nach Abfluss ist bei den Versuchen die Menge des eingesetzten Tracers Sulforhodamine G (SRG) zwischen 8 kg und 34 kg angepasst worden. Die Tracerzugabe ist jeweils von einem quer zur Strömung fahrenden Schiff bzw. Boot erfolgt (Abb. 2). Stromab des Einleitungsortes sind Messungen der Tracerkonzentration sowohl im Hauptstrom (Strommitte) als auch in den Stillwasserzonen (Ufer) erfolgt. In-situ erfolgt dazu die Konzentrationsmessung mit für SRG optimierten Fluorimetern [LIPPERT et al. 2004] bzw. dem Laser-Fluoreszenz-Spektrometer OPTIMOS (Abb. 2).



Abb. 2: Durchführung und Instrumentierung der Tracerversuche (links: Tracereinleitung, Mitte: Fluorimeter im Gewässer, rechts: Laser-Fluoreszenz-Spektrometer OPTIMOS)

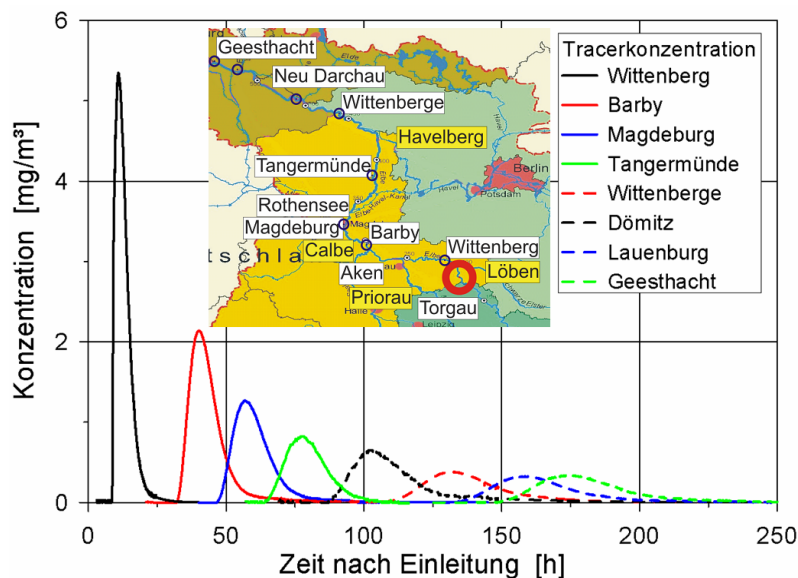


Abb. 3: Ganglinien der Tracerkonzentration an ausgewählten Stationen im Hauptstrom der Elbe nach Einleitung von SRG bei Mauken am 06.10.2004

Zusätzlich sind bei einzelnen der Tracerversuche auch automatische Probennehmer mit anschließender Probeauswertung mit Fluoreszenzspektrometern im Labor zum Einsatz gekommen. Beispielhaft für den am 06.10.2004 mit einer Einleitung von SRG bei Mauken (Elbe-km 184,5) begonnenen Tracerversuch sind die gemessenen und hinsichtlich der Wiederfindungsrate korrigierten Ganglinien der Tracerkonzentration im Hauptstrom in Abb. 3 dargestellt. Die Wiederfindungsrate des Tracers hat am Wehr Geesthacht, also etwa 400 km stromab des Einleitungsortes, etwa 80 % betragen. In Abb. 3 ist deutlich die Verbreiterung der Tracerdurchgangs infolge Dispersion und die damit verbundene Abnahme der maximalen Tracerkonzentration erkennbar. Durch Zwischenspeicherung des Tracers in den Stillwasserzonen kommt es zu einer deutlich ausgeprägten Asymmetrie des Tracerdurchgangs. Die Tracerlaufzeit von Mauken bis zum Wehr Geesthacht hat etwa 175 h für diesen nahezu bei MNQ durchgeführten Versuch betragen. Tracerlaufzeit, Dauer des Tracerdurchgangs sowie Asymmetrie des Tracerdurchgangs werden als grundlegende Parameter für die Verifikation von ALAMO verwendet.

3.2 Ergebnis der Validierung

Die Validierung der Modells ALAMO wird im folgenden beispielhaft für den in Kapitel 3.1 dargestellten Tracerversuch erläutert. Zur Validierung ist eine Modellierung des Tracertransports nach Einleitung bei Mauken mit dem Modell ALAMO unter Vorgabe der Abflussbedingungen, d.h. der Wasserstände und Wasserstands-Abfluss-Beziehungen, durchgeführt worden. Da die Validierung rückblickend durchgeführt worden ist, ist im Gegensatz zum operationellen Betrieb des Modells eine Berücksichtigung der Instationarität des Abflusses erfolgt. Für die charakteristischen Parameter – Tracerlaufzeit, Dauer des Tracerdurchgangs und Asymmetrie des Tracerdurchgangs – sind in Abb. 4 Messung und Modell einander gegenübergestellt [MAI et al. 2006(b)].

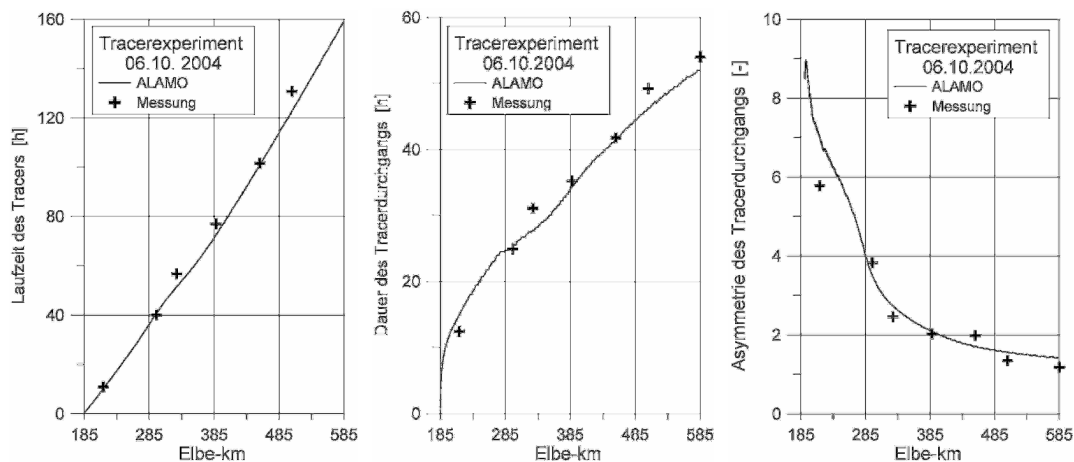


Abb. 4: Charakteristische Parameter des Tracerdurchgangs aus Modellergebnissen und Naturmessungen nach Tracereinleitung bei Mauken (06.10.2004) – links: Tracerlaufzeit, Mitte: Dauer des Tracerdurchgangs, rechts: Asymmetrie des Tracerdurchgangs

Messung und Modell sind im Hinblick auf den großen Anteil empirischer Beziehung in den ALAMO zugrundeliegenden 1-dimensionalen Differentialgleichungen in guter Übereinstimmung. Das Modell unterschätzt für den Elbabschnitt zwischen Mauken und Geesthacht die Laufzeit um bis zu 10 %. In Bezug auf die Dauer des Tracerdurchgangs ergeben sich in dem untersuchten Fließabschnitt Abweichungen um bis zu 12 % und hinsichtlich der Asymmetrie des Tracerdurchgangs um bis zu 18 %. Im Vergleich zu den großen Unsicherheiten, welche nach einer unfallbedingten Gewässerverunreinigung hinsichtlich Schadstoff, Schadstoffmenge sowie Zeit und Ort der Verunreinigung bestehen, ist die Modellgenauigkeit von ALAMO als ausreichend zu betrachten.

4 Operationeller Einsatz des Modells bei Gewässerverunreinigung

4.1 Graphische Benutzeroberfläche des Modells ALAMO

Um ALAMO im operationellen Betrieb möglichst problemfrei für den Benutzer in den internationalen Hauptwarnzentralen entlang der Elbe – dies sind Povodí Labe in Hradec Králové, das Sächsisches Staatsministerium des Innern, Landespolizeipräsidium in Dresden, das Lagezentrum des Ministeriums des Innern des Landes Sachsen-Anhalt in Magdeburg, der Zentrale Bereitschaftsdienst des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg beim Landesumweltamt in Potsdam, der Führungs- und Lagedienst der Polizei der Freien und Hansestadt Hamburg für die Länder Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern und Hamburg [IKSE 2006] – zur Verfügung zu stellen, sind sämtliche zur Modellsteuerung erforderlichen Eingaben über eine geführte graphische Benutzeroberfläche möglich. Die Benutzeroberfläche steht in tschechischer, deutscher und englischer Sprache zur Verfügung. Vom Benutzer sind im Havariefall der gemeldete Ort der Gewässerverunreinigung, die Art der Gewässerverunreinigung sowie Zeitpunkt, Dauer und Menge des eingeleiteten Schadstoffs vorzugeben. Sämtliche weiteren Parameter, wie die aktuellen Abflüsse bzw. Wasserstände und W-Q-Beziehungen stehen über https-Abruf im Internet den Anwendern zum Download bereit.

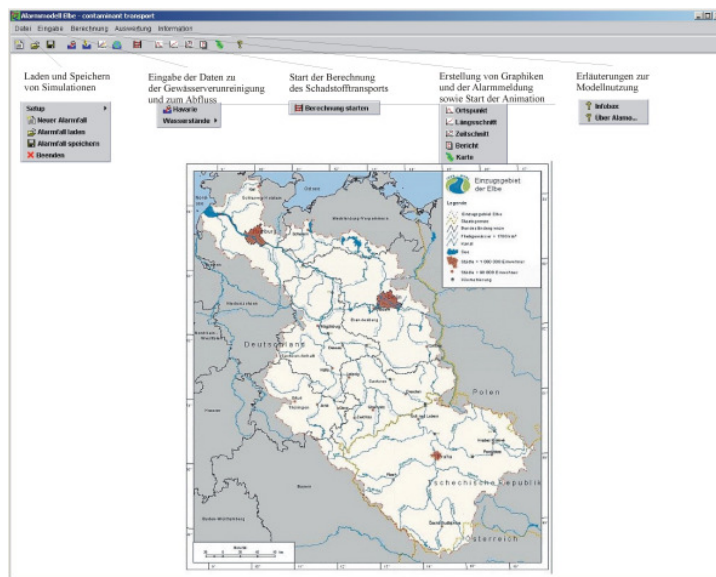


Abb. 5: Startbildschirm von ALAMO und eingebaute Funktionen

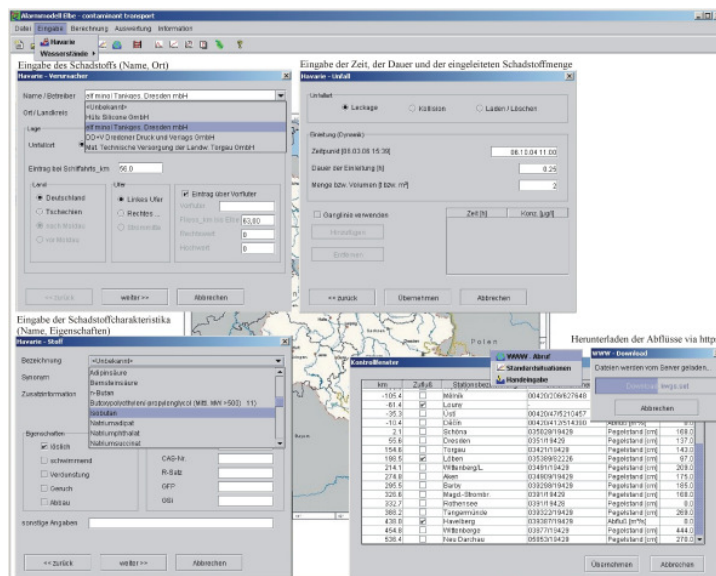


Abb. 6: Nutzerführung zur Vorbereitung des Modellstarts nach Gewässerverunreinigung

Die Abb. 4 gibt eine Übersicht über die Menüstruktur von ALAMO. Die Abb. 5 stellt die Nutzerführung zur Eingabe einer Gewässerverunreinigung dar. Die Ergebnisse der Simulation des Schadstofftransports werden einerseits tabellarisch unter Angabe des erwarteten Beginns, Maximums und Endes des Schadstoffdurchgangs für ausgewählte Station entlang der Elbe zusammengefasst. Andererseits ermöglicht ALAMO auch die graphische Darstellung der zu erwartenden maximalen Schadstoffkonzentration entlang des Flusses sowie die Eintrittszeit des Schadstoffdurchgangs. Die Abb. 7 zeigt beispielhaft diese graphischen Ausgabemöglichkeiten. Im Nachgang zur Berechnung generiert ALAMO automatisiert die nach IWAP durch die Internationalen Hauptwarnzentralen zu erstellenden Alarmmeldungen.

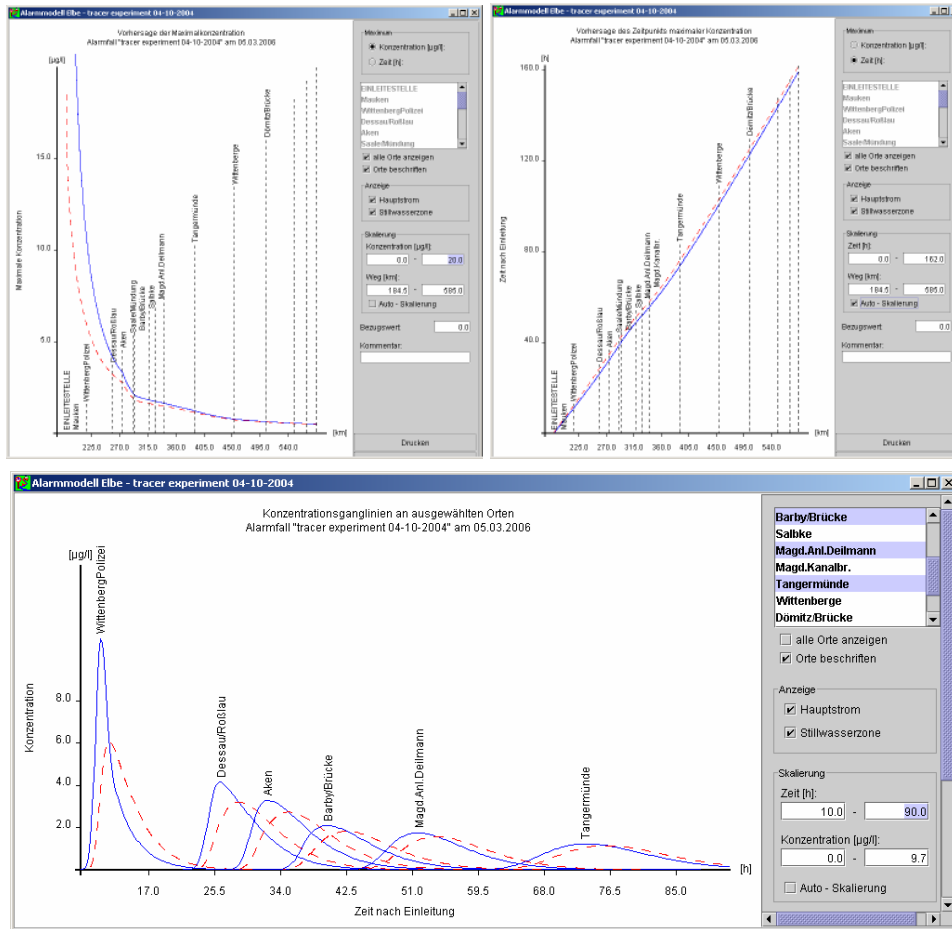


Abb. 7: Graphische Ausgabemöglichkeiten zur Visualisierung des Schadstofftransports

4.2 Einsatz von ALAMO nach unfallbedingter Gewässerverunreinigung

Die dargestellte Nutzerführung sowie die Ausgabemöglichkeiten von ALAMO haben sich im operationellen Betrieb bewährt.

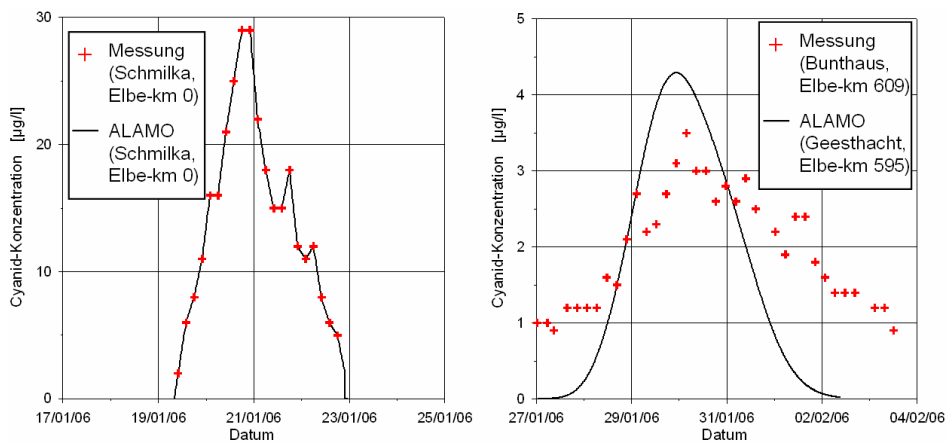


Abb. 8: Operationelle Vorhersage des Schadstofftransports nach Gewässerverunreinigung am 09.01.2006 (links: vorgegebene Schadstoffganglinie bei Schmilka, rechts: berechnete bzw. gemessene Schadstoffganglinie bei Geesthacht bzw. bei Bunthaus)

Auch die Aussagegüte im operationellen Modellbetrieb ist, sofern ausreichende Kenntnis über die unfallbedingte Gewässerverunreinigung vorhanden ist, positiv zu beurteilen. So ist nach einer Gewässerverunreinigung mit Cyanid bei Nymburk (Elbe-km -164), Tschechische Republik, am 09.01.2006 und Vorliegen der Schadstoffbelastung an der ersten Messstelle auf deutschem Gebiet in Schmilka (Elbe-km 0) die Dauer des Schadstofftransports bis Geesthacht gut vorhergesagt worden (Abb. 8).

5 Zusammenfassung

Das zur operationellen Modellierung des Schadstofftransports in der Elbe entwickelte Alarmmodell Elbe (ALAMO) weist trotz des vergleichsweise einfachen (um Stillwasserzonen) erweiterten Taylorschen Lösungsansatzes eine ausreichende Genauigkeit auf, wie sowohl durch Tracerexperimente als auch durch Nachverfolgung einer unfallbedingten Gewässerverunreinigung im operationellen Betrieb gezeigt werden konnte. Durch die graphische Benutzeroberfläche von ALAMO ist eine leichte, intuitive Bedienung des Modells, auch bei seltener Nutzung, gewährleistet. ALAMO trägt damit zur Erfüllung der Anforderungen der Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EC bei. Es ist ein wesentlicher Baustein des Internationalen Warn- und Alarmplans Elbe und für die Einleitung von Sofort-Maßnahmen nach Gewässerverunreinigung unabdingbar.

Literatur

- DITTRICH, A., ETTMER, B.: Elbe – Stofftransport, Untersuchung im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bericht des Leichtweiß-Instituts, Nr. 876, 1-44, Braunschweig, 2002.
- DOSTÁL, K., KOZA, V., REDERER, L.: Zpráva o testovacím pocusu na Labi, Bericht, Povodi Labe, Hradec Králové, 1998.
- DOSTÁL, K., KOZA, V., REDERER, L.: Zpráva o 2. testovacím pocusu na Labi, Bericht, Povodi Labe, Hradec Králové, 1999.
- DOSTÁL, K., KOZA, V., REDERER, L.: Zpráva o 3. testovacím pocusu na Labi, Bericht, Povodi Labe, Hradec Králové, 2000.
- DREWES, U., ETTMER, B. MENDE, M.: Hydraulische Berechnungen von Němčice bis zur deutsch-tschechischen Grenze, Bericht des Leichtweiß-Instituts, Nr. 869, 1-27, Braunschweig, 2001.
- HANISCH, H.-H., DOSTÁL, K., TREJTNAR, K., VOSIKA, S., SPECHT, F.-J., EIDNER, R.: Traceruntersuchungen in der Elbe; In: 8. Magdeburger Gewässerschutzseminar, Hrsg. W. Geller und D. Bornhöft, 29-32, Teubner, Stuttgart, 1998.
- HANISCH, H.-H., SPECHT, F.-J., DREWES, U., STEINEBACH, G., WITTKOWSKI, G.: Alarmmodell Elbe zur Vorhersage des Transports gelöster Schadstoffe in der Elbe; In: 9. Magdeburger Gewässerschutzseminar, Hrsg. W. Geller, P. Puncochár, D. Barion, H. Feldmann, H. Guhr, V. Jirásek, M. Simon, J. Smrták, ATV-DVWK-Schriftenreihe, 22, 73-74, GFA-Verlag, Hennef, 2000.

- HANISCH, H.-H., MENDE, M., ETTMER, B.: Alarmmodell Elbe zur operationellen vorhersage des Schadstofftransports; In 10. Magdeburger Gewässerschutzseminar, Hrsg. W. Geller, P. Puncochar, H. Guhr, W. v. Tümpling, J. Medek, W. Smrták, H. Feldmann, O. Uhlmann, 337-338, Teubner, Stuttgart, 2002.
- HANISCH, H., DOSTÁL, K., REDERER, L., SPECHT, F.-J., MENDE, M., STAHL, K.: Tracerversuche Elbe – Dokumentation der Ergebnisse, Abschlußbericht, Bundesanstalt für Gewässerkunde, 1-84, Koblenz, 2004(b).
- HANISCH, H., MENDE, M., STEINEBACH, G.: Alarmmodell Elbe –ALAMO, Bericht von BfG, Povodi Labe, LWI, VUV, CHMU und IKSE, 1-78, Koblenz, 2004(a).
- IKSE (Internationale Kommission zum Schutz der Elbe): Internationaler Warn- und Alarmplan Elbe, 1-24, Magdeburg, 2006
- LIPPERT, D., MAI, S., BARJENBRUCH, U.: Fluorimeter zum Nachweis von Sulforhodamin G - Optimierung eines Messgerätes zur Durchführung von Tracerversuchen, Kurzinformation, 1-6, http://inet.bafg.de/servlet/is/11922/srg_fluorimeter.pdf, Koblenz, 2005.
- MAI, S., LIPPERT, D., BARJENBRUCH, U.: Operational Modelling of Contaminant Transport in the River Elbe, Proc. of the 7th Int. Conf. on Hydroinformatics, Vol. 1, 16 - 23, Nice, France, 2006.
- MAI, S., LIPPERT, D., BARJENBRUCH, U.: Studies of Tracer Transport in the River Elbe, Proc. of the 7th Int. Conf. on Hydro-Science and Engineering ICHE, 92 - 93, Philadelphia, 2006 (b).
- RENTROP, P., STEINEBACH, G.: Model and numerical techniques for the alarm system of river Rhine, Surveys on Mathematics for Industry, Vol. 6, 245-265, 1997.
- STEINEBACH, G.: Das Alarmmodell Rhein und weitergehende Methoden zur Stofftransportberechnung, Wasser und Boden, Jg. 47, H. 10, 21-27, Wiesbaden, 1995.
- SCHMITT, J., ETTMER, B., DREWES, U.: Durchgängige hydraulische Berechnungen von der deutsch-tschechischen Grenze (km 0) bis zur Wehranlage Geesthacht (km 585), Bericht des Leichtweiß-Instituts, Nr. 867, 1-18, Braunschweig, 2001.
- TAYLOR, G.I.: The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 223, 446-468, 1954.
- WEITBRECHT, V.: Influence of dead-water zones on the dispersive mass transport in rivers, Universitätsverlag Karlsruhe, 1-130, 2004.