

Alarmmodell Elbe (ALAMO)

Ein Vorhersagemodell zur Berechnung des Schadstofftransports

Grundlagen



2004

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Povodí Labe, s. p., Hradec Králové
Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Braunschweig
Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ), Praha
Výzkumný ústav vodohospodářský (VÚV) T. G. Masaryka, Praha
Internationale Kommission zum Schutz der Elbe, Magdeburg



Alarmmodell Elbe

Ein Vorhersagemodell zur Berechnung des Schadstofftransports

1 Zur Historie des Alarmmodells

Die Elbe und ihre Zuflüsse sind potenziell durch unfallbedingte Einleitungen gefährdet. Um Gewässerschäden möglichst abzuwenden, wurde von der *Internationalen Kommission zum Schutz der Elbe* (IKSE) ein internationaler Warn- und Alarmplan im Dezember 1991 verabschiedet, der als wesentlichen Bestandteil das zwischenzeitlich fertig gestellte und hier vorgestellte *Alarmmodell Elbe* enthält. Das Alarmmodell dient zur Vorhersage der Ausbreitung und des Transports von Schadstoffen in der Elbe und ermöglicht eine einfache und schnelle Übersicht über deren zeitliche und räumliche Verteilung. Diese Prognose erlaubt den betroffenen Unterliegern, im Alarmfall rechtzeitig Maßnahmen in die Wege zu leiten, damit Folgeschäden minimiert oder ganz vermieden werden. Somit ist das Alarmmodell nach Artikel 11 der EU-Wasserrahmenrichtlinie auch Teil des Maßnahmenprogramms bei Unfällen, da es rechtzeitig wirksame Abwehr- und Verhaltensstrategien zur Schadensbegrenzung ermöglicht.

2 Das Alarmmodell

Das Alarmmodell „ALAMO Elbe“ verknüpft den Rechenkern „AMOR“ mit den zur Berechnung notwendigen Durchflüssen, die direkt eingegeben oder aus bereit gestellten Wasserständen bzw. Pegelwerten programmintern über Tabellen bestimmt werden. Die Fließgeschwindigkeiten und die Stofftransportkoeffizienten werden dem Rechenkern als Funktionen vom Durchfluss verfügbar gemacht. Zur Ein- und Ausgabe der Daten und zur Berechnung wird das Modell über eine Programmoberfläche mit Menüführung bedient. Die Ergebnisse, die als Schadstoffkonzentrationen nach Ort und Zeit erhalten werden, können tabellarisch und graphisch zur Beschreibung der Unfallereignisse ausgegeben werden. Im Verlauf der Arbeiten zeigte sich, dass die Berechnungen und die Auswertung stark von der Qualität der hydrologischen und hydraulischen Grundlagendaten beeinflusst werden. Trotzdem konnte mit dem Alarmmodell ein geeignetes Instrument zur Vorhersage des Stofftransports in der Elbe erstellt werden.

3 Tracerversuche

Zur quantitativen Bestimmung der im Alarmmodell verwendeten Vermischungs- und Austauschparameter wurden in der Elbe sowohl in Tschechien als auch in Deutschland insgesamt sieben großräumige Tracerversuche bei unterschiedlichen Durchflüssen durchgeführt (Abb. 3.1 und Abb. 3.2) und an verschiedenen Einleitungsstellen begonnen. Diese empirische Vorgehensweise wurde ausgewählt, da eine praxistaugliche analytische Bestimmung der genannten Parameter derzeit nicht bekannt ist.



Abb. 3.1: Einleitung des Tracers in die Elbe



Abb. 3.2: Beginnende Tracerausbreitung

Als sicher detektierbarer Markierungsstoff erwies sich bei den Versuchen das stark fluoreszierende und toxikologisch unbedenkliche *Sulforhodamin G*. Der mit opto-elektronischen Sonden oder durch Laborbestimmung im Nanogrammbereich noch gut nachweisbare Stoff bewährte sich bestens für die Untersuchung langer Elbefließstrecken. Während der Tracerversuche wurde an mehreren Stellen unterhalb der Einleitungsstelle der Durchgang der Tracerwolken durch Probenehmer (s. Abb. 3.3) und zusätzlich durch opto-elektronische Messsonden erfasst. Die so ermittelten Tracerdurchgangskurven dienten zur Verifizierung und Kalibrierung des Alarmmodells.

Bei der Probenauswertung zeigte sich, dass die gemessenen Maximalkonzentrationen des Tracers im Längsverlauf der Elbe abnehmen und die Durchgangskurven mit dem Fließweg länger und flacher werden (s. Abb. 3.4).

Die Tracerversuche vermittelten umfangreiche Erkenntnisse über den Transport gelöster und suspendierter Stoffe in der Elbe. Durch die innerhalb eines großen Durchflussspektrums wiederholt durchgeführten Versuche konnten zudem weitreichende Informationen über den dreidimensionalen Vermischungsvorgang gewonnen werden. Die weitergehende Daten-

auswertung zeigte, dass sich die erhaltene Datenlage zur Verifizierung und Kalibrierung der numerisch gelösten Transportgleichungen trotz nicht ganz zu vermeidender Mess- und Auswertefehler gut eignet.

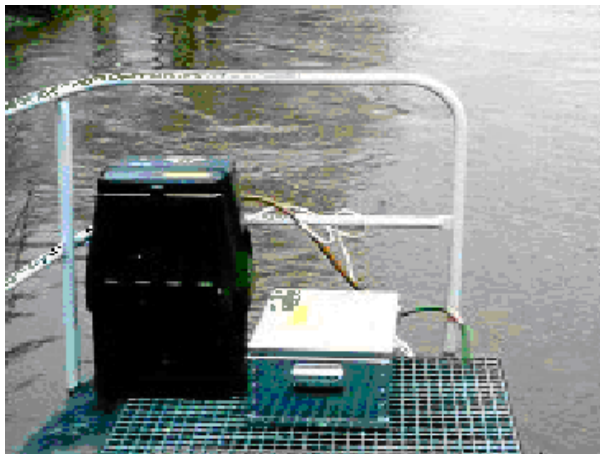


Abb. 3.3: Messstelle mit Probenehmer bei Bad Schandau

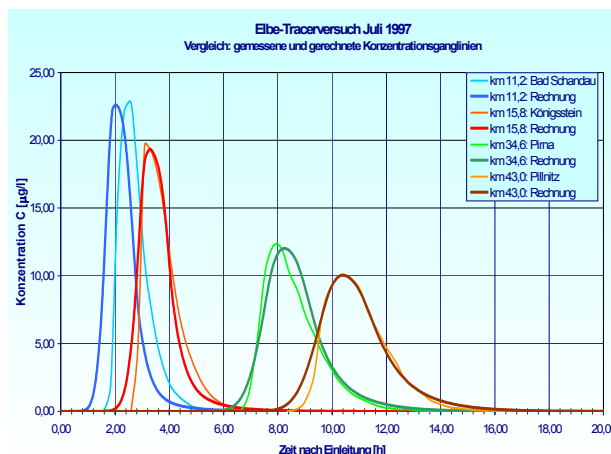


Abb. 3.4: Gemessene und berechnete Tracerkurven an 4 Messstellen

4 Theoretische Grundlagen des Stofftransports

Die angewandte Transportberechnung nutzt einen eindimensionalen Modellansatz, der die Vermischungsvorgänge wasserlöslicher Stoffe in der Elbe simuliert. Grundlage dieser Simulation ist ein erweitertes Taylormodell, das sogenannte Stillwasserzonenmodell. Das eindimensionale Gleichungssystem gewährleistet eine ausreichend genaue Beschreibung der Transportvorgänge in der staugeregelten Oberelbe und in der frei fließenden weitgehend durch Buhnen verbauten Mittelelbe. Das eindimensionale Stillwasserzonenmodell wird durch die folgenden Differentialgleichungen beschrieben:

$$\frac{dc}{dt} = -v \frac{dc}{dx} + D_L \frac{d^2c}{dx^2} - \epsilon D_s (c - s) - k_1 c$$

$$\frac{dc}{dt} = D_s (c - s) - k_1 s$$

- | | | | | |
|------|-------|---|------------|--|
| mit: | c | = Konzentration im Hauptstrom [$\mu\text{g/l}$] | s | = Konzentration in der Stillwasserzone [$\mu\text{g/l}$] |
| | v | = mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s] | ϵ | = Stillwasserzonenanteil [1] |
| | D_L | = Längsdispersionskoeffizient [m^2/s] | k_1 | = stoffspezifische, lineare Abbaukonstanten [$1/\text{s}$] |
| | D_s | = Stillwasserzonenkoeffizient [$1/\text{s}$] | | |

Als Stillwasserzonen im Sinne des Modellansatzes gelten alle nicht abflusswirksamen Querschnittsbereiche. Im Fall der Elbe sind dies z. B. die Buhnenfelder bei nicht überströmten Buhnen (s. Abb. 4.1)

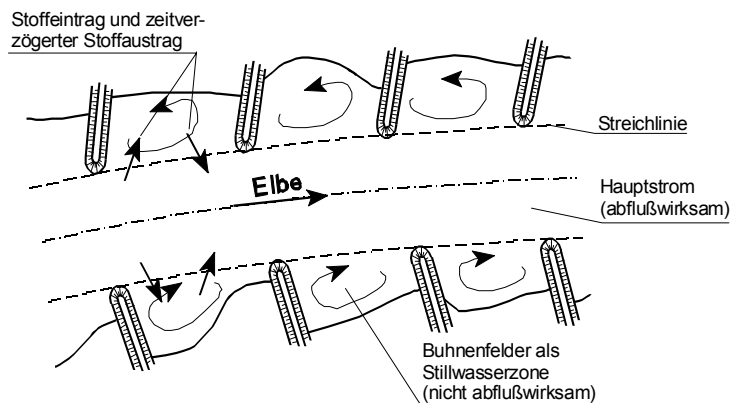


Abb. 4.1: Prinzipskizze zur Definition des Stillwasserzonenmodells

Die Terme des Stillwasserzonenmodells beschreiben die folgenden Teilaspekte:

- $-v \frac{dc}{dx}$: die Translation des Stoffes mit der mittleren Fließgeschwindigkeit v (konvektiver Transport)
- $+D_L \frac{d^2c}{dx^2}$: den dispersiven Stofftransport in Flusslängsrichtung. Er wird im Wesentlichen hervorgerufen durch die ungleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung im Fließquerschnitt bzw. durch die Turbulenz der Wandreibung.
- $-\varepsilon D_s(c-s)$: den Konzentrationsaustausch zwischen dem abflusswirksamen Hauptstrom und den nicht abflusswirksamen Stillwasserzonen. Solange die Konzentration im Hauptstrom größer ist als die Konzentration der Stillwasserzonen, wird der Stoff in die Stillwasserzonen eingetragen; sinkt die Konzentration im Hauptstrom unter die Konzentration der Stillwasserzonen, wird der Stoff wieder in den Hauptstrom zurücktransportiert.
- $-k_1 c$: den linearen Abbau des Stoffes. Sowohl die absolute Größe von k_1 als auch die Annahme eines linearen Abbaus ist stoffspezifisch. Für die Beschreibung des Transports eines Stoffes ist der Abbau nicht von Bedeutung.

Da die Stofftransportparameter in Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten variieren und aufgrund der Vielzahl der Einflüsse nicht zu berechnen sind, ist eine Verifizierung und Kalibrierung des Alarmmodell-Rechenkerns (AMOR) notwendig.

5 Hydraulische Grundlagen

Eingabedaten des Alarmmodells sind die hydrologischen und hydraulischen Größen der Elbe bei verschiedenen Durchflussereignissen. Daher wurde zunächst ein hydraulisch-numerisches Modell für den Bereich von Němčice/CZ bis zur Wehranlage Geesthacht/D entwickelt. Dies entspricht einer Fließlänge von rd. 835 km. Aus der Anforderung an geringe Rechenzeiten sowie an eine einfache Handhabung des Modells wurde der Rauheitsansatz nach *Manning-Strickler* als Berechnungsgrundlage gewählt. Die Spiegellinienberechnung erfolgte für den eingeschränkten Fall der eindimensionalen, stationär-ungleichförmigen und verzweigungsfreien Gerinneströmung. Die abschnittsweise Berechnung erlaubt auch für den instationären Fall eine hinreichend genaue Bestimmung der Fließzeiten.

Mit den Ergebnissen des hydraulischen Modells (s. Abb. 5.1 und Abb. 5.2) kann erstmals eine durchgängige Berechnung der Fließgeschwindigkeiten und Fließzeiten für einen Abflussbereich zwischen MNQ und MHQ für die 835 km lange Fließstrecke der Elbe erfolgen. Die auf Grundlage der berechneten Geschwindigkeiten ermittelten Fließzeiten betragen für den Fließweg zwischen Němčice/ČR und Geesthacht/D für MNQ, MQ und MHQ rd. 790 h, 331 h bzw. 146 h (s. Abb. 5.2).

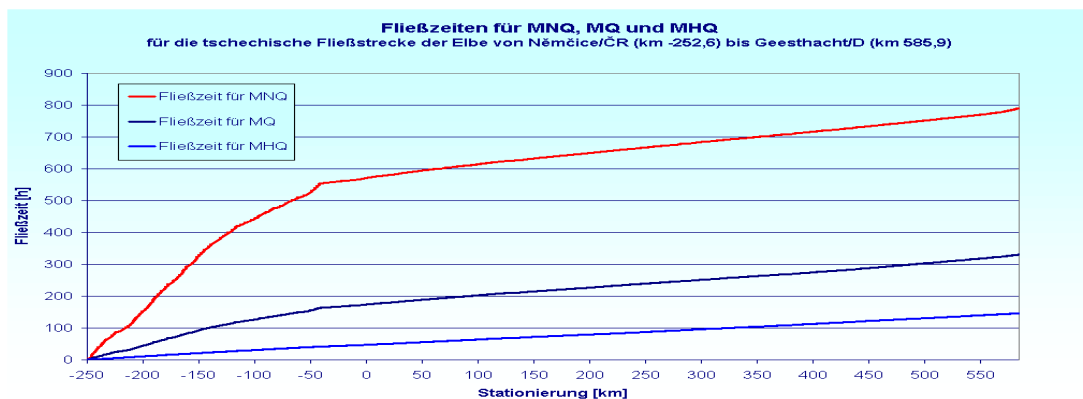


Abb. 5.1: Fließzeitenlängsschnitt für die Elbe von Němčice/ČR (km -252,6) bis Geesthacht/D (km 585,9)

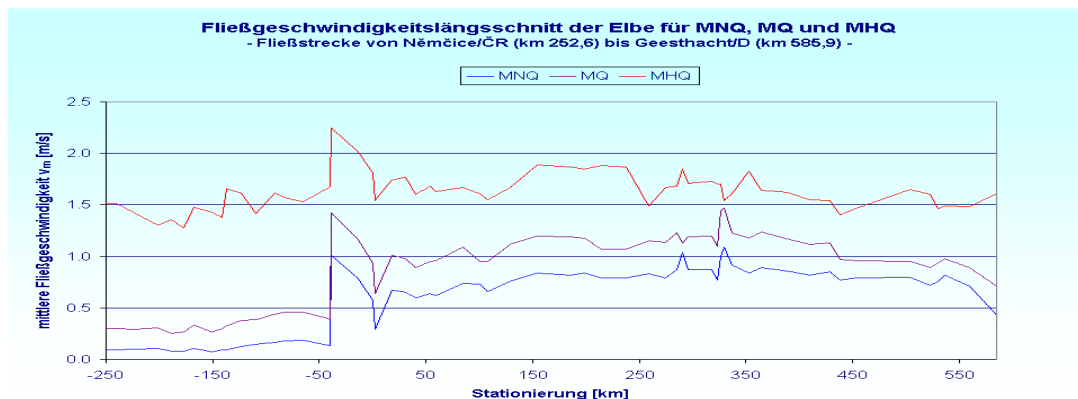


Abb. 5.2: Fließgeschwindigkeitslängsschnitte der Elbe von Němčice/ČR (km -252,6) bis Geesthacht/D (km 585,9) mit sprunghafter Änderung der Fließgeschwindigkeiten von der staugeregelten zur frei fließenden Elbe

Die durchgängigen hydraulischen Berechnungen bilden die Basis für die darauf aufbauende Bestimmung der Stofftransportparameter. Für die Verifizierung und Kalibrierung des Alarmmodells mit der dabei angestrebten genauen Bestimmung der Stofftransportparameter waren großräumige Tracerversuche notwendig.

6 Verifizierung und Kalibrierung des Rechenkerns

Die in der tschechischen und deutschen Elbe bei deutlich unterschiedlichen Durchflüssen durchgeführten Tracerversuche dienen zur Identifikation der Transportparameter, die Tracerganglinien wurden zur Kalibrierung des Alarmmodells verwendet. Bei der Kalibrierung wurde angestrebt, die an den Messstellen bestimmten Konzentrationsganglinien der Tracerversuche durch die mit Hilfe des Rechenkerns ermittelten Ganglinien möglichst genau nachzubilden. Unter Einbeziehung der Berechnungsergebnisse des hydraulisch-numerischen Modells erfolgte eine abschnittsweise Quantifizierung der drei Transportparameter *Längsdispersionskoeffizient*, *Stillwasserzonenanteil* und *Stillwasserzonenkoeffizient*.

In geringem Umfang mussten auch die mit Hilfe des hydraulisch-numerischen Modells berechneten Fließgeschwindigkeiten an die transportwirksame Fließgeschwindigkeit angepasst werden. Es zeigte sich, dass bei einer Gesamttransportzeit von 250 Stunden und mittleren Durchflussverhältnissen die modellierten Eintreffzeiten gegenüber den Tracerkurven mit Abweichungen von weniger als 5 % erhalten werden. Relativ große zeitliche Abweichungen ergaben sich verschiedentlich bei der Nachrechnung der gemessenen Maximalkonzentrationen, die aber bei Markierungsversuchen wesentlich vom Probenahmestandort im Querprofil abhängen.

7 Modelleinsatz

Die für den Rechenkern zur Prognose benötigten Eingaben der Unfalldaten und der Abflusssituation bestehen aus der Ortsangabe (Schifffahrtskilometer), Zeit (Datum, Uhrzeit), Schadstoff (Art, Menge), Dauer der Einleitung sowie den Wasserständen oder auch den Durchflüssen, die über das Internet per HTTPS-Protokoll von einem zentralen Server abgerufen werden können. Sollten keine aktuellen Durchfluss- oder Wasserstandsdaten verfügbar sein, kann die Rechnung mit vorgegebenen Abflusshauptzahlen oder mit einem Schätzwert gestartet werden.

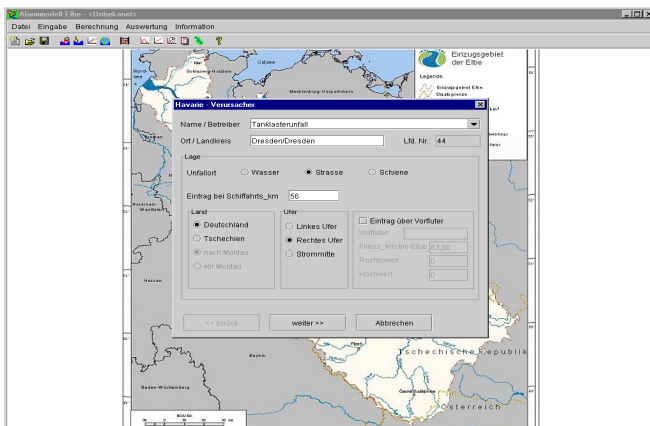


Abb. 7.1: Eingabefenster für Havariedaten

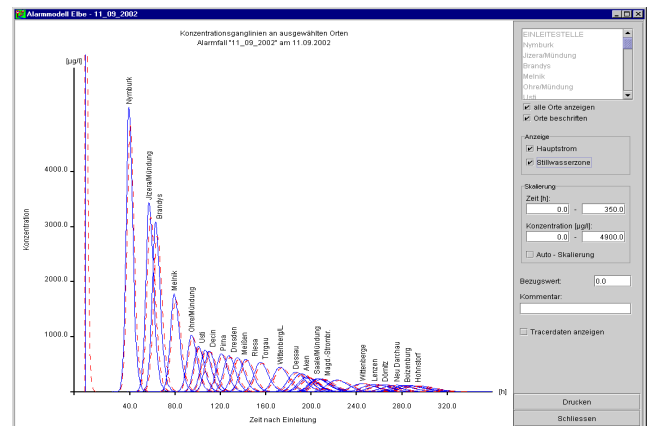


Abb. 7.2: Berechnete Konzentrationsganglinien an ausgewählten Orten

Die Datenausgabe und die Ergebnisdarstellungen sind sowohl in graphischer als auch in tabellarischer Form möglich. Die prognostizierten Durchgangskurven und die Maximalkonzentrationen können als Orts- und Zeitlängsschnitte dargestellt werden. Die tabellarische Ausgabe entspricht der offiziellen Warn- und Alarmmeldung der internationalen Alarmzentralen, die zusätzlich die Durchflüsse, die maximalen Schadstoffkonzentrationen mit ihren Eintreffzeiten an ausgewählten Orten enthalten.

8 Schlussbemerkung

Das Alarmmodell Elbe erfasst eine Fließstrecke von 835 Flusskilometern, so dass die Prognosen des Schadstofftransports ab Némčice am tschechischen Oberlauf der Elbe bis hinab nach Geesthacht vor den Toren Hamburgs möglich werden. Mit wenigen, auch unvollständigen Informationen zum Unfallgeschehen und zur Abflusssituation lässt sich eine dem ersten Erkenntnisstand angemessene interpretierbare Warn- und Alarmmeldung erzeugen, die mit graphischen und tabellarischen Darstellungen weitergabefähig ist.

9 Literatur

Dostál K., H. Hanisch, M. Mende, K. Stahl (2002): Tracerversuche Elbe – Dokumentation der Ergebnisse.

Hanisch H., M. Mende et al. (2003): Alarmmodell Elbe – Operationelle Vorhersage des Schadstofftransports in der Elbe.