

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 108 (1990)
Heft: 29

Artikel: Fehlerabschätzung bei Wasser- und Stoffbilanzen
Autor: KAESER, PAUL
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-77474>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 07.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Beiträge zur Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)

Fehlerabschätzung bei Wasser- und Stoffbilanzen

Der Mensch bezieht Rohstoffe aus der Natur, verwendet sie zur Herstellung von Konsumprodukten oder zur Energiegewinnung und gibt die daraus entstandenen festen, flüssigen oder gasförmigen Abfälle wieder in die Umwelt ab. So entstehen Stoffflüsse, welche in vielen Fällen umweltbelastend wirken. Um sie kontrollieren und steuern zu können, müssen sie bekannt sein; hierzu eignen sich Stoffflussanalysen, in denen die relevanten Flüsse quantifiziert und über abgrenzbare Bereiche bilanziert werden. Wie zuverlässig aber sind die Aussagen solcher Untersuchungen, die sich auf z.T. grob geschätzte Daten stützen? Am Beispiel einer regionalen Bilanz der Wasserflüsse und wassergebundenen Stoffflüsse soll gezeigt werden, wie eine Fehlerabschätzung durchgeführt werden kann.

Stoffbilanzen

In der Umweltplanung, beispielsweise bei der Durchführung von Umweltverträglichkeitsprüfungen, sollte eine

VON PAUL KAESER,
WETTINGEN

ganzheitliche Betrachtungsweise sicher gestellt sein. Handelt es sich bei den zu untersuchenden Umwelteinwirkungen um die Belastung der Umwelt mit Schadstoffen, so heißt dies, dass zunächst die Übersicht über alle relevanten Stoffflüsse gewonnen werden muss. Einzelne Schadstoffflüsse zu vermindern, braucht noch keine umweltfreundliche Lösung zu sein: Oft wird dabei das Problem nur verlagert, beispielsweise von der Luft ins Wasser (Rauchgaswäsche) oder zu den festen Abfällen (Filterrückstände).

Eine Methode, welche die oben geforderte Gesamtschau ermöglichen soll, ist die *Stoffflussanalyse* [1, 2]. Dabei wird der Weg einer Anzahl von Indikatorstoffen durch das betrachtete System verfolgt. Als Indikatoren wählt man Stoffe, die auf ihrem Weg durch die Umwelt analytisch verfolgt werden können. Am besten eignen sich konservative Stoffe, also solche, die nicht zerfallen oder entstehen (beispielsweise Elemente). Die relevanten Stoffflüsse müssen erkannt und durch Messungen oder Schätzungen quantifiziert werden (Bild 1). Bei konservativen Stoffen ergibt sich hierbei eine gewisse Kontrolle durch die Möglichkeit der Bilanzierung: Die Summe der Zuflüsse in ein betrachtetes Kompartiment muss gleich der Summe der Abflüsse und der Speicherung sein.

Eine solche Stoffflussanalyse erlaubt:

- den Vergleich anthropogener (z. B. durch eine Anlage verursachter) Stoffflüsse mit Referenzflüssen wie Stoffflüssen ohne Anlage, natürlichen Stoffflüssen oder gesetzlichen Grenzwerten.
- den Vergleich alternativer Lösungen bezüglich der verursachten Stoffflüsse.
- das Abschätzen der Anteile verschiedener Teilflüsse an einem Gesamtfluss (z. B. die Beiträge der kommunalen Abwässer und der Landwirtschaft zur Gewässereutrophierung). Daraus wird ersichtlich, wo Massnahmen ansetzen müssen, welche die Schadstoffflüsse in die Umwelt wirksam vermindern sollen.

Stoffflussanalysen wurden bisher hauptsächlich in der Abfallplanung, beispielsweise bei der UVP von Entsor-

gungsanlagen durchgeführt. An der Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) wird zur Zeit an der Stoffflussanalyse einer ganzen Region (Fallstudie Unteres Bünztal) gearbeitet.

Fehlerabschätzung

Bei der Quantifizierung der Stoffflüsse ist man auf Messungen oder Schätzungen angewiesen, die mit einer gewissen *Unsicherheit* behaftet sind. Diese kann beispielsweise in Form eines Vertrauensintervalls ausgedrückt werden, innerhalb dessen der geschätzte Wert mit einer vereinbarten Wahrscheinlichkeit (häufig 90%) liegt. Werden die Vertrauensintervalle für die verschiedenen Flüsse unabhängig voneinander bestimmt, so sind sie unrealistisch gross, da die *Abhängigkeiten* zwischen den verschiedenen Flüssen (beispielsweise Stoffbilanzen, die aufgehen müssen) nicht berücksichtigt sind. Durch Einbezug dieser Abhängigkeiten erhält man ein überbestimmtes System, in dem die Unsicherheit durch eine Ausgleichsrechnung minimiert werden kann.

Regionales Wasser- und Stoffflussmodell

Die hier vorgestellte Arbeit, die am Institut für Orts-, Regional- und Landesplanung (ORL-Institut) der ETH Zürich durchgeführt wurde, beruht auf Daten, die im Rahmen der erwähnten regionalen Stoffflussstudie im Unteren Bünztal von der EAWAG erhoben und ausgewertet wurden. Sie soll zeigen, wie

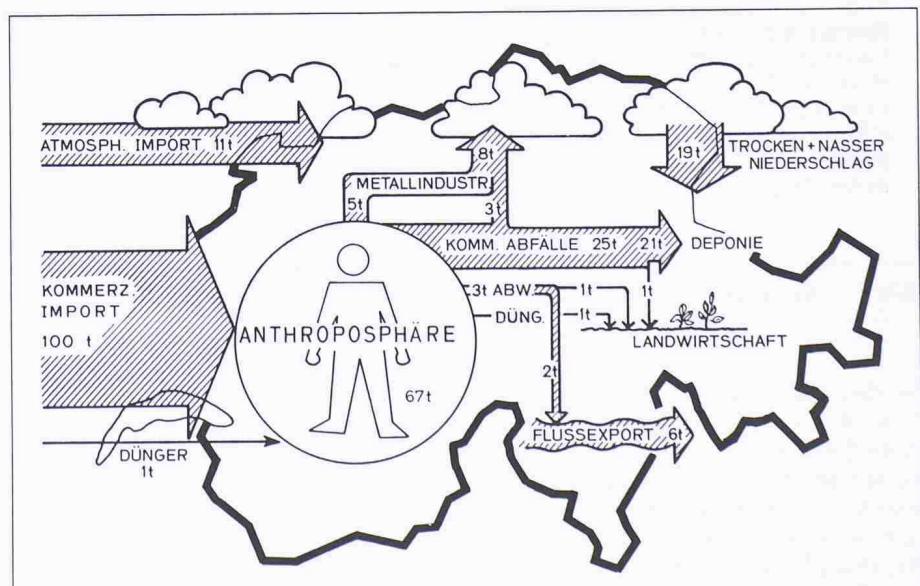
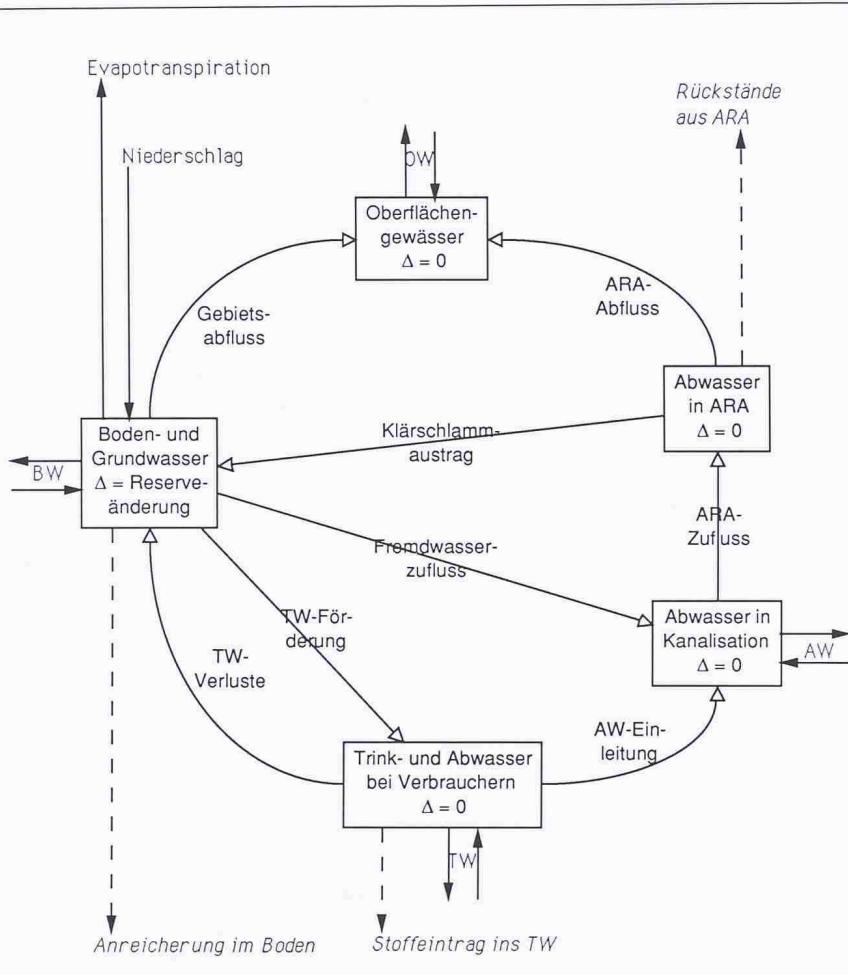


Bild 1. Cadmiumflüsse in der Schweiz (Quelle: P. H. Brunner, 1982)



Für jedes der drei hydrologischen Einzugsgebiete (Bünztal, Holzbach, Reuss) werden Wasser- und Stoffbilanzen gemäß obigem Schema erstellt. *Reservoirs* sind durch Rechtecke dargestellt. Über jedes Reservoir wird bilanziert (Summe aller Flüsse ins bzw. aus dem Reservoir = Δ). Außerdem wird für jedes der drei Einzugsgebiete sowie für die ganze Region je eine Import-Export-Bilanz erstellt. *Flüsse* sind durch Pfeile dargestellt. Gestrichelte Pfeile bedeuten Zugabe von Stoffen ins Wasser bzw. Entnahme aus dem Wasser. Einige Flüsse sind im folgenden erklärt:

Fremdwasserzufluss: Nicht von Verbrauchern stammendes Abwasser (zur Hauptsache die von versiegelten Flächen in die Kanalisation abfließenden Niederschläge). **TW-Verluste:** Nicht von Verbrauchern bezogenes Trinkwasser (undichte Leitungen, Hydranten, Brunnen

usw.). **AW-Einleitung:** Über Wasseruhren erfasstes Trinkwasser, wird verschmutzt an die Kanalisation abgegeben. **Reserveänderung:** Zunahme der Menge von Grund- und Bodenwasser. Diese Größe wird beim Bilanzieren wie ein Fluss behandelt. **Stoffeintrag ins TW:** Verschmutzung von Trinkwasser zu Abwasser. **Rückstände aus ARA:** Rechengut, Sandfanggut und aus dem Einzugsgebiet exportierter Klärschlamm. **Anreicherung im Boden:** Entfernen von Stoffen aus Grund- und Bodenwasser durch Adsorption und Fällung im Boden.

Die drei Einzugsgebiete tauschen untereinander und mit der Umgebung Wasser und Stoffe aus. Die entsprechenden Flüsse sind bezeichnet mit **BW** (Boden- und Grundwasser), **OW** (Oberflächenwasser), **AW** (Abwasser) und **TW** (Trinkwasser).

Bild 2. Wasserflüsse und wassergebundene Stoffflüsse in der Region Unteres Bünztal

bei derartigen Untersuchungen auf einfache Art eine geeignete Fehlerabschätzung durchgeführt werden kann. Hierzu wurde als Testbeispiel der Wasserkreislauf ausgewählt; die Stoffflussanalyse beschränkt sich also auf die durch das Wasser transportierten Stoffe (*wassergebundene Stoffflüsse*). Der Einfachheit halber wird hier nur ein einziges Indikatorelement (Chlor) betrachtet; weitere Stoffe könnten problemlos einbezogen werden.

Systembeschreibung

Da der Wasserkreislauf die Basis für die betrachteten Stoffflüsse bildet, erscheint es sinnvoll, zur Unterteilung des Untersuchungsgebietes die natürli-

chen Wasserscheiden zu verwenden. Die Region wurde deshalb in die hydrologischen Einzugsgebiete der drei Oberflächengewässer (Bünztal, Holzbach, Reuss) unterteilt; für jedes Einzugsgebiet wurde eine eigene Wasser- und Stoffbilanz erstellt.

Ein qualitatives *Modell* des so definierten Systems zeigt Bild 2. Es besteht aus *Reservoirs* und *Flüssen*. Flüsse transportieren Wasser und/oder Stoffe von einem Reservoir zum andern oder von einem Reservoir in die Umgebung (Export) oder umgekehrt (Import). Zwischen den verschiedenen Flüssen bestehen zwei Arten von *Abhängigkeiten*:

- **Bilanzgleichungen:** Für jedes Reservoir können sowohl eine Wasserbilanz als auch für jeden Stoff je eine Stoffbilanz erstellt werden. Diese Bilanzen haben alle die Form:

$$\Sigma \text{ Zuflüsse} - \Sigma \text{ Abflüsse} - \text{Reserveänderung} = 0$$

Zusätzlich können auch für Gebiete (beispielsweise Einzugsgebiete) solche Bilanzen aufgestellt werden (Import-Export-Bilanzen).

- **Beziehung zwischen Wasser- und Stoffflüssen:** Die Beziehung zwischen einem Wasserfluss und einem mit ihm verbundenen Stofffluss ist durch die entsprechende Stoffkonzentration gegeben:

$$\text{Konzentration} = \text{Stofffluss} / \text{Wasserfluss}$$

Eingabegrößen

Die Quantifizierung der Eingabegrößen, d. h. der Wasserflüsse und Stoffkonzentrationen, erfolgt durch Messungen oder Schätzungen. Im vorliegenden Beispiel waren die Vertrauensintervalle für über 80 Größen zu bestimmen. Dabei werden die gegenseitigen Abhängigkeiten noch nicht berücksichtigt; dies geschieht erst bei der mathematischen Bearbeitung des Modells (Fehlerrechnung). Manche Größen, wie etwa die Trinkwasserförderung, werden relativ genau gemessen. Andere, beispielsweise die Reserveänderung des Grundwassers, können nur grob geschätzt werden, in diesem Fall aus der Veränderung der Grundwasserspiegel. Entsprechend stark unterscheiden sich die Breiten der Vertrauensintervalle.

Fehlerrechnung

Ist das Stoffflussmodell erstellt und sind seine Eingabegrößen quantifiziert, so wird es einer Fehlerausgleichsrechnung unterzogen, welche die Abhängigkeiten zwischen den Eingabegrößen berücksichtigt und dadurch deren Unsicherheit verringert. Im vorliegenden Beispiel sind einfache Standardverfahren (Regressionsrechnung) kaum an-

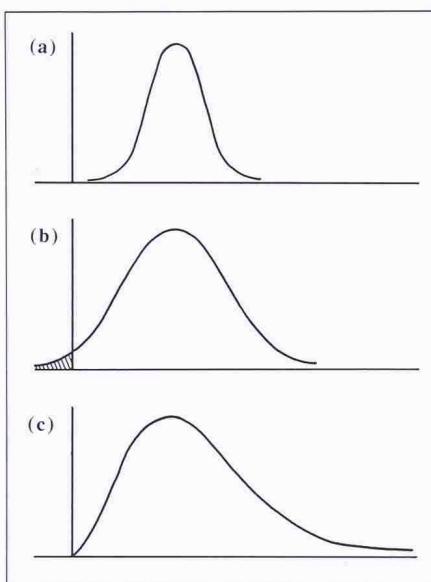


Bild 3. Wahrscheinlichkeitsverteilung bei nichtnegativen Grössen.

Bei (a) ist die Streuung klein im Vergleich zum Mittelwert, weshalb Normalverteilung auch für nichtnegative Grössen möglich ist. Bei (b) hingegen umfasst die Normalverteilung wegen der relativ grossen Streuung auch negative Werte (schraffierter Bereich); sind diese unzulässig, so muss eine schiefe Verteilung (c) angenommen werden.

wendbar, da Wasser- und Stoffbilanzen miteinander gekoppelt sind. Andererseits kommen Methoden, die eine Auseinandersetzung mit komplizierten mathematischen Verfahren voraussetzen, für die Anwendung in der Praxis kaum in Frage. In solchen Fällen benötigt man Softwarewerkzeuge, die das Erstellen von Modellen unterstützen und deren mathematische Formulierung und Verarbeitung dem Benutzer abnehmen. Für diesen genügt es ja meist, zu wissen, was das Programm tut, ohne die angewendeten mathematischen Verfahren im einzelnen zu beherrschen.

Methode

Im vorliegenden Beispiel wurde mit einem solchen Werkzeug gearbeitet, das eine deklarative Problemformulierung erlaubt: Es wurde ein *Bilanzmodell* erstellt. Die Methode wurde in den letzten zehn Jahren am ORL-Institut entwickelt und in Form eines Computerprogramms (BILANZ) realisiert [3, 4, 5, 6]. Inzwischen wird sie auch in der Praxis kommerziell eingesetzt.

Mit Bilanzmodellen können Schätzungen in komplizierten Systemen optimiert werden, wobei sich auch *zeitliche Entwicklungen* einbeziehen lassen. Deshalb wurde die Methode bisher hauptsächlich für Prognosen eingesetzt (Be-

völkerungsentwicklung, Energieszenarien, Finanzplanung). Das den Bilanzmodellen zugrundeliegende mathematische Verfahren ist der Kalman-Filter. Dessen Eignung für Voraussagen wurde auch im Bereich der Hydrologie bestätigt [7]. Auch Stoffflussanalysen müssen oft zeitliche Entwicklungen berücksichtigen (etwa die Veränderung der Abfallzusammensetzung). Im vorliegenden Beispiel handelt es sich allerdings um ein stationäres Modell, in dem ein Fließgleichgewicht vorausgesetzt wird.

Probleme, Erfahrungen

Damit eine Fehlerrechnung zu verlässlichen Resultaten führt, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein: Erstens müssen die Beziehungen zwischen allen relevanten Grössen korrekt und vollständig erfasst werden, d. h. das Modell muss die Wirklichkeit richtig beschreiben (was nur annähernd möglich ist, da jedes Modell eine Vereinfachung darstellt). Zweitens müssen die Eingabegrössen zuverlässig geschätzt werden (unter der Voraussetzung, dass die geschätzten Grössen unabhängig sind; Abhängigkeiten werden ja erst bei der anschliessenden Fehlerrechnung berücksichtigt). Zur Schätzung gehört insbesondere die Angabe eines Masses für die Unsicherheit (beispielsweise Vertrauensintervall). Dies bereitet in der Praxis oft Mühe. Unter anderem spielen hierbei psychologische Effekte eine Rolle, die das Resultat verfälschen können; meist bewirken sie ein Unterschätzen der Unsicherheit (zu schmale Vertrauensintervalle). Eine gute Einführung in diese Probleme findet man in [8].

Schwierigkeiten kann auch die *Wahrscheinlichkeitsverteilung* der geschätzten Grössen bereiten. Häufig wird, wenn die effektive Verteilung nicht bekannt ist, von einer Normalverteilung ausgegangen. Für Grössen, die keine negativen Werte annehmen können, beispielsweise für Konzentrationen, ist dies nur zulässig, wenn die Streuung im Vergleich zum Mittelwert klein ist (Bild 3). Die verwendete Software lässt zwar auch andere Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu, kann jedoch Streuungsmaße für Quotienten nur berechnen, wenn Zähler und Nenner normalverteilt sind; Quotienten werden aber im vorliegenden Beispiel zur Definition der Konzentrationen benötigt.

Das Erstellen eines Modells zwingt zur Systematisierung der Realität. Dabei können bisher übersehene Sachverhalte zum Vorschein kommen. Widersprüche, unsinnige Resultate (beispielswei-

Literatur

- [1] P. Baccini, M. Baechler, P. Brunner, G. Henseler: Von der Entsorgung zum Stoffhaushalt: Die Steuerung anthropogener Stoffflüsse als interdisziplinäre Aufgabe. – In: Müll und Abfall, Heft 4/1985.
- [2] P. Baccini, P. Brunner, H. Belevi, G. Henseler, W. Obrist, H. Diener: Die Umweltverträglichkeitsprüfung von Entsorgungsanlagen: Einführung in die Methodik der Stoffflussanalyse. Referate des EAWAG-Seminars vom 16. Sept. 1987 an der ETH Zürich. – EAWAG 1987.
- [3] B. Schmid: Bilanzmodelle. ORL-Bericht Nr. 40, 1979.
- [4] R. Kyburz, B. Schmid: Accounting Models – a New Tool in Forecasting. – ORL-Studienunterlage Nr. 40, 1979.
- [5] B. Schmid, R. Signer, R. Müller, C. Gabathuler, R. Zängerle: Information on Complex Systems – Representation and Inference. Five papers presented at the 4th International Symposium on Forecasting in London. – ORL-Bericht Nr. 61, 1988.
- [6] R. Zängerle: Ein Informationssystem zur Erzeugung quantitativer Schätzungen für die Planung. Beispiel: Schweizerisches Energiewesen. – ORL-Bericht Nr. 60, 1987.
- [7] J. Ihringer: Vorhersage von Hochwasserabflüssen aus Niederschlägen mit dem Kalman-Filter. – Mitteilungen des Institutes für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe Nr. 25, 1985.
- [8] R. Signer: Von Schwierigkeiten im Umgang mit Information – Befunde und Maximen. – In: DISP Nr. 89/90, 1987.

se bergauf fliessendes Wasser) und nicht aufgehende Bilanzen zwingen zur Überprüfung des Modells und der Eingabedaten. Das Bilanzmodell dient also nicht nur zur Optimierung der Schätzung der interessierenden Grössen, sondern auch zur *Konsistenzprüfung* der Systembeschreibung. Dieser «Nebeneffekt» hat sich als mindestens so nützlich erwiesen wie das eigentliche Ziel der Arbeit, die Fehlerabschätzung.

Adresse des Verfassers: Paul Kaeser, dipl. Natw. ETH, Lerchenstrasse 2, 5430 Wettigen; Kontaktadressen:

- Bilanzmodelle: Richard Eisler, dipl. Math. ETH, ORL-Institut, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich
- Regionale Stoffhaushaltstudie: Dr. Paul H. Brunner, EAWAG, 8600 Dübendorf.