

Thèse ETH No. 11155

**Recensement et évaluation du métabolisme anthropique
sur la base des boues d'épuration**

présentée à
L' ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE ZURICH

pour l'obtention du titre de
Docteur ès sciences techniques

par
Georges Marc CHASSOT

ing. agr. dipl. EPF
né le 25 avril 1962
originaire d'Orsonnens

acceptée sur proposition
de Prof. Dr. P. Baccini, rapporteur
de Dr. H. Siegrist, corapporteur
de T. Candinas, corapporteur

Zurich 1995

RESUME

Le système de désapprovisionnement des biens aqueux de l'anthroposphère (évacuation des eaux usées et traitement dans une station d'épuration) est une partie intégrante de l'économie régionale. La gestion et l'observation du métabolisme anthropique motive la recherche d'instruments de détection avancée des modifications métaboliques dans ce système. L'hypothèse selon laquelle il est possible de recenser et d'évaluer le métabolisme anthropique sur la base des boues d'épuration a été formulée.

A l'aide de la méthode de l'analyse des flux de substances (Baccini et Brunner, 1991), un modèle métabolique a été élaboré, décrivant le transfert des flux entre les biens source (eaux domestiques, eaux de ruissellement, eaux industrielles et artisanales et eaux claires, précipitants) et les biens cible (boues d'épuration, eaux épurées, déchets de dégrillage et de dessablage, eaux déversées) du système pour une période d'observation d'un an et avec une option stationnaire. Il se base sur une étude de littérature (concentration et flux massique des biens source, coefficients de transfert des substances à la station d'épuration) et sur des réflexions théoriques (processus de transfert et de transformation à la station d'épuration) et s'appuie sur les propriétés indicatrices des éléments chimiques P, Cu, Pb et Zn.

Compte tenu de la variabilité inhérente aux concentrations dans les boues, l'analyse de sensibilité de la composition des boues d'épuration à réagir à des modifications du bassin versant et à des modifications typologiques du traitement des eaux usées brutes et des boues, a mis en exergue les variables de réglage du système. Ces propriétés indicatrices théoriques ont été ensuite validées avec les données en champ à disposition (analyses des boues d'épuration du contrôle officiel, production de boues des stations d'épuration, données sur la technologie des stations, enquête dans des bassins versants choisis). Les résultats établis permettent la formulation de deux thèses qui forment les principes de base de l'observation du métabolisme anthropique avec les informations contenues dans les boues d'épuration:

- 1) Dans une optique de détection avancée, la compréhension du système lors de l'observation s'avère nécessaire pour mettre en évidence et interpréter une modification métabolique anthropique.

La connaissance du fonctionnement de la station d'épuration et en particulier du transfert des substances dans les boues à la station d'épuration (ou de sa modification entre deux observations) sont importants. Les concentrations de substances dans les boues sont sensibles à ce transfert, variable selon la technologie de la station, dépendant de paramètres opérationnels ou liés au bassin versant. En ignorant ce transfert, il est nécessaire d'admettre une variabilité, donc une incertitude supplémentaire à celle inhérente aux concentrations de substances dans les boues. La compréhension de l'état du système dans le bassin versant s'avère indispensable

dans le but de cerner où la modification métabolique a eu lieu. La composition de la boue est également sensible à des facteurs qui agissent sur la production de boues: apport de matières minérales par les eaux de ruissellement, apport de matières organiques industrielles, ajout de Ca, dégradation de la matière organique. Ils peuvent fausser le recensement de modifications métaboliques en se basant uniquement sur la composition des boues. Le procédé usuel d'observation des concentrations dans les boues doit être dorénavant complété avec une observation concertée de la station et du bassin versant.

2) Par rapport à d'autres biens des systèmes de désapprovisionnement des déchets aqueux, les boues d'épuration peuvent être considérées comme un indicateur phénoménologique approprié du métabolisme anthropique.

Les concentrations de P, Zn, Cu et Pb dans les données en champ, compte tenu de la variabilité liée à la technique et à la fréquence d'échantillonnage et à l'analyse, sont sensibles à la composition des eaux domestiques, des eaux de ruissellement et des eaux industrielles et artisanales. Elles peuvent ainsi réagir à des modifications dans les bassins versants. En utilisant les flux d'éléments chimiques dans les boues d'épuration, il est possible de mettre en évidence des modifications du métabolisme anthropique dans les processus source (Pb dans les eaux de ruissellement, Cu dans les eaux industrielles, du P dans les eaux domestiques) ou l'influence de contaminations spécifiques (Zn dans les eaux domestiques).

Par rapport aux eaux usées brutes et aux eaux épurées, les avantages des boues d'épuration, notamment leur facilité (relative) d'échantillonnage, l'analytique dans des domaines de mesures plus fiables pour de nombreux éléments chimiques (facteur de concentration des substances), leur effet mémoire (dû au stockage des boues à la station), la fiabilité de calcul des flux d'éléments chimiques (à condition d'une fréquence d'échantillonnage suffisamment élevée), la possibilité d'un contrôle de plausibilité (la production spécifique de boues), permettent leur utilisation comme sonde chimique du système.

Les informations contenues dans les boues peuvent par conséquent être utilisées pour évaluer (par exemple par rapport aux déjections humaines) le métabolisme dans les processus source du système, pour estimer son incidence sur les processus cible (récepteurs aquatiques), pour estimer l'efficacité de mesures environnementales dans le bassin versant ou pour détecter de manière avancée de nouvelles substances problématiques. Dans le cadre d'un réseau d'observation ciblé, la sensibilité de la composition et les propriétés indicatrices des boues peuvent être améliorées par un échantillonnage plus fréquent et par la connaissance du fonctionnement de la station d'épuration. Des séries chronologiques s'avèrent nécessaires pour enregistrer et évaluer les modifications métaboliques et pour renforcer la précision des flux recensés.

ZUSAMMENFASSUNG

Erfassung und Beurteilung des anthropogenen Stoffwechsels auf der Basis von Klärschlamm

Das Entsorgungssystem der flüssigen Güter der Anthroposphäre (Abwasserentsorgung und -behandlung in der Kläranlage) ist ein wichtiger Bestandteil der regionalen Volkswirtschaft. Die Steuerung und die Beobachtung des anthropogenen Stoffwechsels begründen die Forschung nach geeigneten Früherkennungsinstrumenten von Stoffwechseländerungen in diesem System. Die Arbeitshypothese lautet, dass es möglich ist, den anthropogenen Stoffwechsel auf der Basis von Klärschlamm zu erfassen und zu beurteilen.

Anhand der Methodik der Stoffflussanalyse (Baccini und Brunner, 1991) wurde ein Stoffhaushaltsmodell erarbeitet. Das stationäre Modell beschreibt den Transfer der Stofffluxe zwischen den Input- (häusliches Abwasser, Regenwasser, industrielles und gewerbliches Abwasser, Fremdwasser, Fällungsmittel) und den Outputgütern des Systems (Klärschlamm, gereinigtes Abwasser, Rechen- und Sandfanggut, Entlastungswasser). Die Beobachtungsperiode beträgt ein Jahr. Das Modell basiert auf einer Literaturstudie (Konzentrationen und Massenfluxe der Inputgüter, Transferkoeffizienten der Stoffe in der Kläranlage) sowie auf theoretischen Überlegungen (Transfer und Umwandlung der Stoffe in der Kläranlage) und nutzt die Zeigereigenschaften der Stoffe P, Cu, Pb und Zn.

Die Tauglichkeit der Klärschlammzusammensetzung, auf Änderungen der Inputgüter und auf Modifikationen der Abwasserreinigungs- und Schlammbehandlungstypen zu reagieren, wurde durch eine Sensitivitätsanalyse abgeklärt. Darin wurde auch die Variabilität der Stoffkonzentrationen miteinbezogen. Diese theoretischen Zeigereigenschaften wurden dann mit eigenen Felddaten (Klärschlammanalysen der offiziellen Klärschlamm-Kontrolle, Produktion der einzelnen Kläranlagen, Angaben über die Kläranlagentechnologie, Umfrage in ausgewählten Einzugsgebieten) geprüft. Die Resultate erlauben die Formulierung zweier Thesen, die das Prinzip der Beobachtung des anthropogenen Stoffwechsels auf der Basis von Klärschlamm bilden:

- 1) Um anthropogene Änderungen des Stoffhaushaltes im Sinne der Früherkennung erfassen und beurteilen zu können, ist das Verständnis des Systems zum Zeitpunkt der Beobachtung, nötig.

Die Kenntnis des Betriebes der Kläranlage und insbesondere der Transferkoeffizienten der Stoffe in den Klärschlamm (oder seiner Änderungen zwischen zwei Beobachtungen) sind wichtig. Die Konzentrationen im Klärschlamm reagieren sensibel auf diesen Transfer. Dieser ist von der Technologie der Kläranlage abhängig, von Betriebsparametern und von Einflussfaktoren des Einzugsgebietes. Würde man

diese Transferkoeffizienten vernachlässigen, müsste mit einer grösseren Variabilität gerechnet werden, d.h. mit einer höheren Unsicherheit als derjenigen, welche die Konzentrationen ohnehin schon beinhalten. Die Kenntnis des Systems im Einzugsgebiet ist unerlässlich, wenn man die Ursache der Veränderungen erkennen will. Die Stoffkonzentration wird auch von Faktoren beeinflusst, die auf die Schlammproduktion einwirken. Diese Faktoren sind: das Einbringen von mineralischer Substanz mit Regenwasser, sowie von organischer Substanz mit industriellem Abwasser, die Zugabe von Ca, der Abbau der organischen Substanz. Sie können die Interpretation des Stoffwechsels verfälschen, wenn man sich nur auf die Stoffkonzentration abstützt. Die bis heute übliche Beobachtung der Klärschlammkonzentrationen muss deswegen mit der koordinierten Beobachtung der Kläranlage und des Einzugsgebietes vervollständigt werden.

2) Im Vergleich mit anderen Gütern des Systems „Abwasserentsorgung und -behandlung“ kann Klärschlamm als geeigneter phänomänologischer Indikator des anthropogenen Stoffwechsels betrachtet werden.

Die P, Zn, Cu und Pb-Konzentrationen im Klärschlamm, unter Berücksichtigung der Variabilität der Probenahmetechnik, bzw. -frequenz und der Analytik, reagieren mit unterschiedlichem Grad und je nach Eigenschaften der Stoffe sensitiv auf Änderungen des häuslichen Abwassers, des Regenwassers und des industriellen Abwassers. Sie können so Veränderungen im Einzugsgebiet aufzeigen. Anhand der Stofffrachten im Klärschlamm ist es möglich, Stofffluxänderungen in den Herkunftsprozessen (z. B. Pb im Regenwasser, Cu im industriellen Abwasser, P im häuslichen Abwasser) oder die Abwesenheit von spezifischen Belastungen (z. B. Zn im häuslichen Abwasser) zu erkennen.

Im Vergleich mit Rohabwasser und gereinigtem Abwasser beinhaltet Klärschlamm als chemischer Indikator folgende Vorteile: relativ einfache und sichere Probenahme möglich, die Analytik arbeitet im verlässlichen Bereich für viele Stoffe, der Memory-Effekt (wegen der Lagerung des Schlammes in der Kläranlage), die Zuverlässigkeit der Stofffrachtenberechnungen (bei genügend hoher Probenahmefrequenz), die Möglichkeit der Plausibilitätskontrolle (spezifische Klärschlammproduktion).

Die Informationen, die im Klärschlamm enthalten sind, können dazu gebraucht werden, die Herkunftsprozesse zu beurteilen (Vergleich mit den menschlichen Abgängen), ihren Einfluss auf die Zielprozesse (Vorfluter) abzuschätzen, die Auswirkung von Umweltmassnahmen im Einzugsgebiet abzuschätzen, neue Problemstoffe frühzeitig zu erkennen. Im Rahmen eines gezielten Beobachtungsnetzes können die Sensitivität und die Zeigereigenschaften des Klärschlammes und mit einer erhöhten Probenahmefrequenz und mit der Kenntnis des Betriebes der Kläranlage verbessert werden. Zeitreihen sind nötig um die Stoffwechseländerungen zu erkennen und die Treffsicherheit der erfassten Fluxe zu verbessern.

ABSTRACT

Assessment of the anthropogenic metabolism based on sewage sludge

Urban sewage transportation and treatment systems are an integral part of the regional economy. The management and the observation of the anthropogenic metabolism call for research of strategies for early detection of changes in the metabolism. As a hypothesis, it was assumed that it is possible to assess the anthropogenic metabolism with the help of sewage sludge.

Based on the methodology of the material flux analysis (Baccini and Brunner, 1991), a model was worked out that describes the transfer of element fluxes between educts (domestic sewage, run-off, industrial waste water, sewer infiltration water and precipitants) and products (sewage sludge, treated effluent, grit and screenings, storm-water overflow) of the system for a period of one year under stationary conditions. It was based on a literature review (concentration and mass flux of the educts, transfer coefficients during the sewage treatment) and theoretical considerations (transfer and transformation of substances in the sewage treatment plant). The model uses the indicator properties of the elements phosphorus, copper, lead and zinc. Taking into account the variability of the element concentrations in sewage sludge the sensitivity analysis of the sludge composition as a function of educts of the drainage basin, changes of the sewage treatment scheme and the sludge treatment operation showed the key factors in the system. These theoretical indicator properties were then validated with existing field data (analysis of the official Swiss control of sewage sludge; data on the technology and the sludge production of each sewage treatment plant; own investigations in selected drainage basins). The results of this study lead to the following two conclusions which can be laid down as the principles of the observation of the anthropogenic metabolism with the help of sewage sludge:

- 1) For an early detection of changes occurring in the anthropogenic metabolism and for their interpretation the understanding of the system at the time of the observation is necessary.

It is important to know how the sewage treatment plant operates and especially how the transfer coefficients of the different elements are (or their change between two observations). Element concentrations are sensitive to these transfer coefficients. They can vary according to the treatment technology, to operational parameters or to the drainage basin. Ignoring these transfer coefficients would mean additional variability and thus add to the uncertainty already inherent of element concentrations of sewage sludge. Knowledge of the state of the system in the drainage area is of

great importance in order to identify the origin of changes. Element composition in sewage sludge is also sensitive to factors which lead to a higher sludge production and therefore influence the concentration. These factors depend on the drainage area (import of minerals with run-off, import of industrial organic substance) and/or on the sewage sludge treatment (addition of calcium, hydrolysis of organic material, digestion). They can falsify the interpretation of the metabolism if it is only based on element concentrations. The usual survey methods of element concentrations in sewage sludge must therefore be complemented with a detailed survey of the sewage treatment plant and the drainage basin.

- 2) Compared to other goods in the system of urban sewage transportation and treatment sewage sludge can be considered as an appropriate phenomenological indicator of the anthropogenic metabolism.

Taking into account the variability due to sampling technique and frequency and the uncertainties of the analysis, P, Zn, Cu and Pb concentrations of the sludge (field data) are sensitive to a different extent to the composition of domestic sewage, run-off and industrial wastewater. Therefore, element concentrations in the sludge are sensitive to changes in the type of the drainage area. Using element fluxes in sewage sludge it is possible to assess metabolic changes occurring in the processes of origin (e.g. Pb in run-off, Cu in industrial wastewater, P in domestic sewage) or to assess the effects of specific contaminations (e.g. Zn in domestic sewage).

Compared with wastewater and treated effluent, sewage sludge has many advantages which make it suitable as an environmental indicator. Some of these advantages are the relatively simple sampling procedures, the reliable chemical analysis for a lot of elements (higher concentration than in raw sewage and treated effluent), the memory-effect (due to its stocking), the reliability of element fluxes calculations (sample number must be high enough) and the possibility of a control of the plausibility (specific sludge production).

Therefore, the information in sewage sludge can be used to assess the metabolism in the processes of origin (compared to human excreta reference values), to estimate its influence on the processes of destination (receiving waters), to predict the impact of legal directives and acts to regulate the pollutants, to detect early the entry of new hazardous pollutants in aquatic systems. If used in an observation network, the sensitivity of element concentrations and indicator properties of sewage sludge can be improved with an increased sampling frequency and knowledge about the functioning of the sewage treatment plant. Time series analysis are necessary to assess metabolic changes and to improve the accuracy of the fluxes.