

Jahresbericht 2002, 15. Dezember 2002

Projekt Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen

Autor und Koautoren	Oskar Wanner, Vassileios Panagiotidis, Hansruedi Siegrist
beauftragte Institution	Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG)
Adresse	Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf
Telefon, E-mail, Internetadresse	01 823 5090, wanner@eawag.ch, http://www.eawag.ch/
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	44177 / 84216
Dauer des Projekts (von – bis)	1. März 2002 – 29. Feb. 2004

ZUSAMMENFASSUNG

Es war zu untersuchen, wie sich die Wärmeentnahme aus dem Abwasser mittels einem in die Kanalisation eingebauten Wärmeübertrager auf den Betrieb einer nachgeschalteten Kläranlage auswirkt. Zu diesem Zweck wurde ein mathematisches Modell der Abwassertemperatur in der Kanalisation erarbeitet. Das erarbeitete Modell ist ein Instrument zur Untersuchung des Temperaturhaushalts in der Kanalisation. Wenn die Parameter des Modells auf eine gegebene Situation angepasst werden, kann mit dem Modell die zeitliche und örtliche Änderung der Abwassertemperatur zwischen dem Wärmeübertrager und der Kläranlage für diesen Fall berechnet werden. Mit dem Modell wurde eine Reihe von Simulationen durchgeführt für tiefe Temperaturen und für typische Werte der wichtigen Modellparameter.

Tiefe Temperaturen in der Kläranlage wirken sich vor allem auf die biologischen Prozesse „Nitrifikation“ und „Denitrifikation“ negativ aus. Diese Auswirkungen wurden mit einem statischen mathematischen Modell für nitrifizierende und denitrifizierende Belebungsanlagen untersucht. Es wurden eine Vielzahl von Simulationen durchgeführt mit den Parametern „Sicherheitsfaktor“, „Verhältnis von chemischem Sauerstoffbedarf zu Stickstoff“, „aerobem Schlammalter“ und „anoxischem Schlammalter“. Die Ergebnisse wurden in einem Nomogramm zusammengestellt. Das Nomogramm erlaubt, für die jeweiligen Parameterwerte die Auswirkungen reduzierter Abwassertemperaturen im Zulauf der Kläranlage zu bestimmen:

- Verminderung der Nitrifikationssicherheit bei gleichbleibendem aerobem Schlammalter
- Vergrößerung des Belebtschlammbeckens bzw. des totalen Schlammalters bei gleichbleibender Nitrifikationssicherheit und gleicher Denitrifikationsleistung
- Verminderung des Denitrifikationsvolumens auf Kosten des Nitrifikationsvolumens

Projektziele

Wärmerückgewinnung aus Abwasser mittels eines in die Kanalisation eingebauten Wärmeübertragers ist gesamtschweizerisch betrachtet an ca. 1000 Standorten theoretisch möglich und wurde auch an mehreren Orten schon erfolgreich realisiert [1]. Bei der Realisierung solcher Anlagen gilt es aber eine Reihe von praktischen Problemen zu berücksichtigen. Ziel dieses Projekts ist es, drei grundlegende Probleme im Zusammenhang mit der Wärmerückgewinnung aus Abwasser zu klären:

1. Wie wirkt sich die Wärmeentnahme in der Kanalisation auf die Abwassertemperatur in der Kanalisation (Wasserverdampfung, Wärmeaufnahme bzw. -abstrahlung) und auf die Prozesse in der biologischen Stufe einer nachgeschalteten Kläranlage (Nitrifikation und Denitrifikation) aus? Erwartetes Resultat der ersten Etappe: Der Einfluss der Wärmeentnahme aus der Kanalisation auf die Reinigungswirkung der biologischen Reinigungsstufe und Empfehlungen zur maximal zulässigen (und nötigenfalls zeitlichen Beschränkung der) Wärmeentnahme sollen praxisnah dargestellt werden.
2. Wie beeinflussen die Abwasserzusammensetzung und die Hydraulik die Biofilmbildung (Verschmutzung) und die Leistung des Wärmeübertragers? Erwartetes Resultat der zweiten Etappe: Die Abhängigkeit des Biofilmwachstums und des Abfalls der Wärmeübertragerleistung von den Inhaltsstoffen des Abwassers und vom Abflussregime sollen aufgezeigt werden.
3. Gibt es bauliche Massnahmen (Gefälle, Profil der Kanalisation, Auslegung des Wärmeübertragers, Wahl des Oberflächenmaterials) oder betriebliche Massnahmen (Reinigungsintervalle, Art der Reinigung, Abflussregime), mit denen die Biofilmbildung vermindert werden kann? Erwartetes Resultat der dritten Etappe: Massnahmen zur Verminderung oder zur Vermeidung der Biofilmbildung sollen zusammengestellt und die Auswirkungen der einzelnen Massnahmen quantitativ beschrieben werden.

Beim ersten Problem geht es um eine allfällige Beeinträchtigung des Kläranlagenbetriebs, bei den übrigen Problemen um die Reduktion der Leistung der Wärmeübertrager durch die Biofilmbildung. Die Lösung dieser Probleme ist von praktischer Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit und die Akzeptanz der Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen. Die wichtigsten Ergebnisse sollen auf Merkblättern zuhanden der Praxis zusammengestellt werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

In der Berichtsperiode wurde das Problem untersucht, wie sich die Wärmeentnahme in der Kanalisation auf die Abwassertemperatur in der Kanalisation selber und auf den Betrieb einer nachgeschalteten Kläranlage auswirkt. Zur Klärung dieses Problems muss die Änderung der Abwassertemperatur vom Wärmeübertrager bis zur Kläranlage berechnet werden. Die Änderung der Abwassertemperatur ist bestimmt von der Wärmeentnahme durch den Wärmeübertrager, von den Gegebenheiten beim Zusammenfluss von Abwasserströmen in der Kanalisation und vom Temperaturhaushalt im Kanalisationsrohr selber.

WÄRMEENTNAHME MITTELS WÄRMEÜBERTRAGER

Die Abnahme der Abwassertemperatur DT_w infolge der Wärmeentnahme durch den Wärmeübertrager kann einfach beschrieben werden durch die Formel

$$DT_W = \frac{\dot{Q}_e}{c_W \dot{m}_W} \quad (1)$$

wo $\dot{Q}_e$ die pro Zeiteinheit entnommene Wärmemenge, c_W die spezifische Wärmekapazität von Wasser und $\dot{m}_W$ der Massenstrom des Abwassers ist. Soll einem Abwasserkanal die Wärmemenge $\dot{Q}_e = 100$ kW entnommen werden, errechnet sich aus dieser Formel mit $c_W = 4190$ Ws/kg/K und für $\dot{m}_W = 100$ kg/s eine Reduktion der Abwassertemperatur von $DT_W = 0,2$ K. Die resultierende Abwassertemperatur T_{res} nach dem Zusammenfluss mehrerer Abwasserströme in der Kanalisation wird beschrieben durch die Formel

$$T_{res} = \frac{\sum_i (\dot{m}_{W,i} T_i)}{\sum_i \dot{m}_{W,i}} \quad (2)$$

wo $\dot{m}_{W,i}$ und T_i die Massenströme und die Temperaturen in den sich vereinigenden Kanalisationsrohren sind.

TEMPERATURHAUSHALT IN DER KANALISATION

Es wurde ein mathematisches Modell aufgestellt, das im wesentlichen aus einer Bilanzgleichung für die Abwassertemperatur besteht und deren zeitliche und örtliche Änderung in der Kanalisation beschreibt. Das Modell geht von einem Ansatz von Bischofsberger und Seyfried [2] aus. Diese Autoren fanden, dass die Abwassertemperatur vor allem durch den Wärmeübergang vom Abwasser in die Kanalluft, die Abwasserverdunstung und den Wärmedurchgang durch die Rohrwand beeinflusst wird, und dass andere Prozesse, wie die Wärmelängsleitung oder die Abwassererwärmung durch Reibung, vernachlässigt werden können.

Um den Einfluss der einzelnen Modellparameter auf die Abwassertemperatur zu bestimmen, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt [3]. Die Analyse ergab, dass die Abwassertemperatur am Stärksten beeinflusst wird durch Veränderungen der Abwassertemperatur im Zufluss des betrachteten Kanalisationsrohrs. Weitere Parameter, die einen grossen Einfluss haben, sind die Temperatur und die relative Feuchtigkeit der Luft in der Kanalisation, sowie der Massenstrom des Abwassers.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde das Modell um zwei Bilanzgleichungen für die Temperatur und den Wassergehalt der Luft in der Kanalisation erweitert. Mit dem erweiterten Modell kann nun die Wechselwirkung zwischen den Temperaturen des Abwassers und der Luft in der Kanalisation berücksichtigt werden. Das erweiterte Modell hat 14 Parameter. Für eine so grosse Zahl von Freiheitsgraden konnten nicht alle Lösungen der Modellgleichungen berechnet werden. Deshalb beschränkten sich die durchgeführten Modellrechnungen auf tiefe Temperaturen, die für die biologischen Prozesse in den Kläranlagen kritisch sind, auf Kanalisationsrohre mit einem Nenndurchmesser von 1,2 m, da für den Einbau von Wärmeübertragern eine gewisse Minimalgrösse nötig ist, und auf die Variation der Werte derjenigen Modellparameter, die sich in der Sensitivitätsanalyse als wichtig erwiesen haben [3]. In Abbildung 1 sind die Ergebnisse einer solchen Modellrechnung dargestellt. Das Beispiel zeigt, dass die Abnahme der Abwassertemperatur im modellierten Kanalisationsrohr für tiefe Aussenlufttemperaturen, kleine Aufenthaltszeiten der Luft in der Kanalisation und lange Fliessstrecken in der Grössenordnung von 1 °C liegt. Diese Aussage gilt allerdings nur für den verwendeten Parametersatz und ist nicht allgemein gültig. Das erarbeitete Modell ist demnach als Instrument zur Untersuchung des Temperaturhaushalts in der Kanalisation anzusehen, und seine Parameter müssen für die jeweils zu untersuchende Situation angepasst werden.

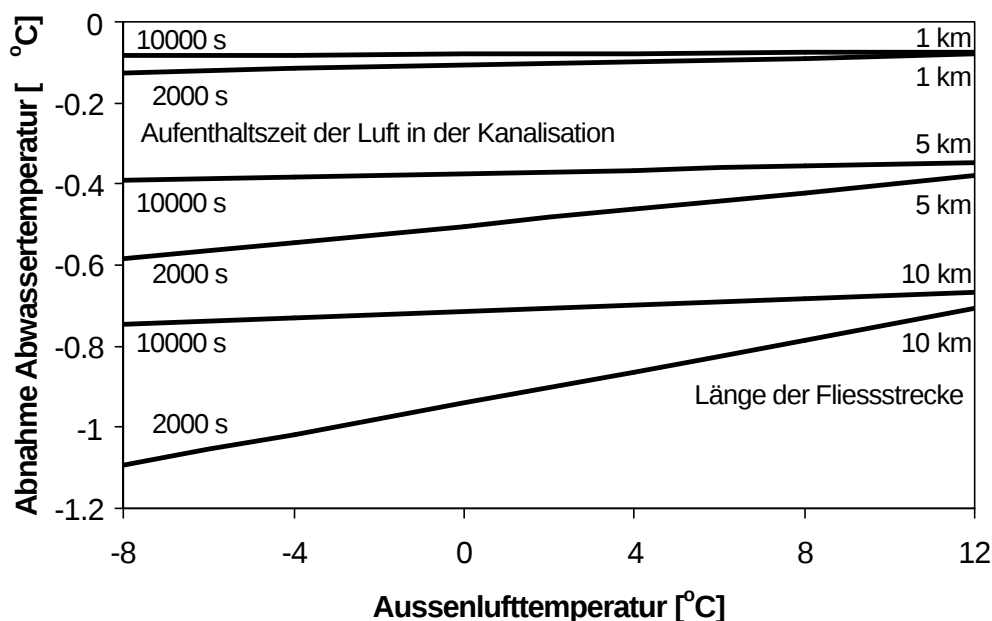


Abbildung 1: Mit dem erweiterten Modell gerechnete Abnahme der Abwassertemperatur in Abhängigkeit von der Aussenlufttemperatur für verschiedene Fließstreckenlängen und Aufenthaltszeiten der Luft in der Kanalisation.

TEMPERATUREINFLUSS AUF DEN KLÄRANLAGENBETRIEB

Von den in der Kläranlage ablaufenden Prozessen werden vor allem die Nitrifikation und die Denitrifikation von tiefen Temperaturen beeinträchtigt. Es wurde deshalb untersucht, wie sich eine Abnahme der Temperatur im Zulauf der Kläranlage auf diese Prozesse auswirken würde. Für diese Untersuchung wurde das Modell von Koch et al. [4] verwendet, das auf dem Belebtschlammmodell ASM3 basiert [5]. Das verwendete Modell ist für die Simulation von nitrifizierenden und denitrifizierenden Belebungsanlagen entwickelt worden. Es berücksichtigt Prozesse wie Hydrolyse, Wachstum, endogene Atmung, Nitrifikation und Denitrifikation. Das Modell kann die Stickstoffeliminationsleistung berechnen, die sich zusammensetzt aus der Schlammproduktion (Inkorporation von Stickstoff in die Biomasse) und der Denitrifikationsleistung. Das Modell ist statisch, d.h. die Auswirkungen zeitlich ändernder Zulauffrachten und –temperaturen können damit nicht untersucht werden. Mit dem Modell wurde eine grosse Zahl von Simulationen durchgeführt. Dabei wurden die Parameterwerte, die für die zu untersuchenden Prozesse wichtig sind, variiert und für die übrigen Modellparameter wurden Werte verwendet, die etwa den Durchschnittswerten von kommunalen Kläranlagen entsprechen. Die Resultate wurden in einem Nomogramm zusammengefasst dargestellt.

Das Nomogramm (Abb. 2) besteht aus drei Diagrammen: Im ersten Diagramm kann der Sicherheitsfaktor der Nitrifikation (SF_{Nit}) in Abhängigkeit der Temperatur und des aeroben Schlammalters (SRT_{aer}) herausgelesen werden. Im zweiten Diagramm wird das Verhältnis von anoxischem zu totalem Schlammalter, d.h. das Verhältnis von anoxischem Volumen zu totalem Volumen des Belebungsbeckens (V_{ano}/V_{tot}) dargestellt. Es kann, wenn das totale Schlammalter (SRT_{tot}) bekannt ist, das anoxische Schlammalter (SRT_{ano}) herausgelesen werden (oder es kann das totale Schlammalter herausgelesen werden, wenn das Verhältnis von anoxischem Volumen zu totalem Volumen des Belebungsbeckens bekannt ist). Im dritten Diagramm wird der totale Wirkungsgrad der Denitrifikation (h_{tot}) in Funktion vom anoxischen Schlammalter und vom Verhältnis von totalem chemischem Sauerstoffbedarf zu totalem Stickstoff im Zulauf der Kläranlage ($C_{CSB,0}/C_{N,0}$) dargestellt.

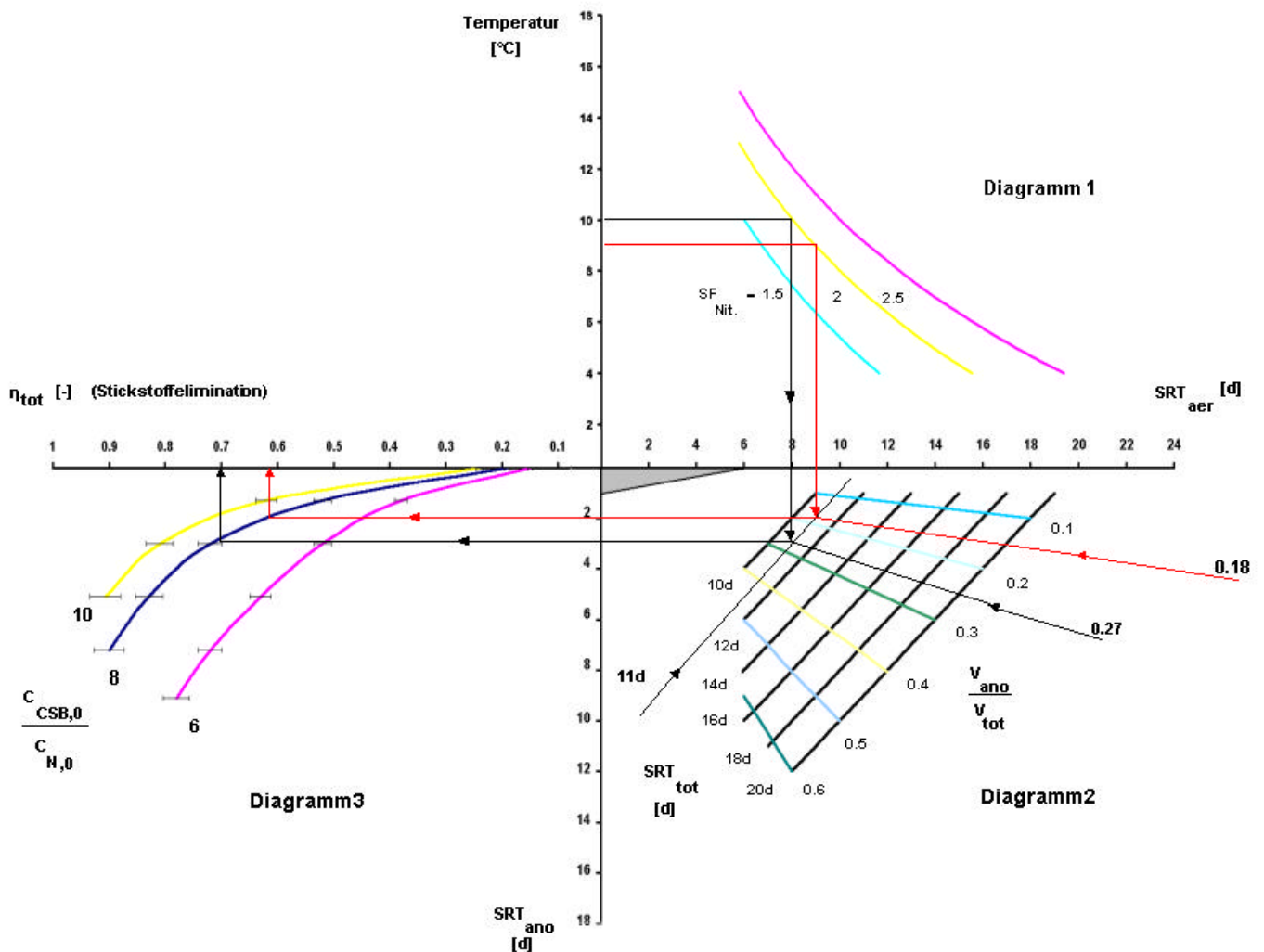


Abbildung 2: Nomogramm zur Abschätzung des Einflusses einer Temperaturabsenkung des Abwassers auf die Sicherheit der Nitrifikation bzw. die Verminderung der Stickstoffelimination bei gleichbleibender Nitrifikationssicherheit.

Mit dem Nomogramm können folgende Effekte der Abwasserabkühlung beurteilt werden:

- Verminderung der Nitrifikationssicherheit bei gleichbleibendem aerobem Schlammalter (aerobes und anoxisches Volumen wird beibehalten, Ammoniumablaufwert wird jedoch stärker ansteigen während einer Spitzenfracht)
- Vergrößerung des Belebtschlammbeckens bzw. des totalen Schlammalters bei gleichbleibender Nitrifikationssicherheit und gleicher Denitrifikationsleistung
- Verminderung des Denitrifikationsvolumens auf Kosten des Nitrifikationsvolumens (gleiche Nitrifikationssicherheit, aber verminderte Denitrifikationsleistung).

Eine eingehendere Beschreibung des Nomogramms und seines Gebrauchs wird in [6] gegeben.

PRÜFSTAND ZUR UNTERSUCHUNG DER VERSCHMUTZUNG

In der Berichtsperiode wurde in der neuen Versuchshalle der EAWAG ein Prüfstand geplant und aufgebaut, mit dem die Verschmutzung und die daraus resultierende Leistungseinbusse des

Wärmeübertragers untersucht werden soll. Der Prüfstand besteht aus einer Plexiglasrinne, in die ein kleiner Wärmeübertrager (Austauschfläche 1.0 x 0.1 m) der Firma KASAG, 3550 Langnau, eingelegt ist und die mit kommunalem Abwasser beschickt werden kann. In einem geschlossenen Kreislauf fließt Ionentauscherwasser durch den Wärmeübertrager und durch ein Kühlaggregat, mit dem die Eingangstemperatur des Wärmeübertragers gesteuert werden kann. Gemessen wird die Ein- und die Ausgangstemperatur des Wärmeübertragers, sowie die Abwassertemperatur in der Rinne. Zuerst wurden die Abwasserpumpe, die Pumpe des Kühlkreislaufs und die Temperaturfühler kalibriert, nun wird der kWert des sauberen Wärmeübertragers bestimmt für verschiedene hydraulische Bedingungen.

Nationale Zusammenarbeit

Keine Zusammenarbeit

Internationale Zusammenarbeit

Keine Zusammenarbeit

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Projektziel 1: Die Temperaturabnahme aufgrund der Wärmeentnahme und der Wärmeverluste in der Kanalisation, und die Auswirkungen reduzierter Temperaturen auf die Kläranlage wurden für den stationären Fall quantifiziert; die Untersuchung für den dynamischen Fall (Tagesgang) musste zurückgestellt werden, da keine adäquaten Daten zur Verfügung stehen. Im Winter 2002/03 sollen solche Daten erhoben und ausgewertet werden.

Projektziel 2: Der Prüfstand zur Untersuchung der Verschmutzung der Wärmeübertrager wurde fertiggestellt. Probleme beim Kalibrieren der Wärmeübertragerleistung und der Messeinrichtungen führten zu einer mehrwöchigen Verzögerung. Anfang 2003 soll mit der Untersuchung der Verschmutzung begonnen werden.

Projektziel 3: Wird in der 2. Hälfte 2003 angegangen werden.

Referenzen

- [1] E. A. Müller und B. Kobel: **Nutzung von Wärme aus Abwasser mit Wärmepumpen**, aus *Korrespondenz Abwasser*, 48, Heft 8, Seiten 1074-1090, 2001.
- [2] W. Bischofsberger und C. F. Seyfried: **Wärmeentnahme aus Abwasser**, aus Schriftenreihe des Lehrstuhls für Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen der Technischen Universität München, Heft 56, 1984.
- [3] O. Wanner, V. Panagiotidis und H. Siegrist: **Abwassertemperatur und Wärmeentnahme aus der Kanalisation**, zur Veröffentlichung vorgesehen in *Korrespondenz Abwasser*.
- [4] G. Koch, M. Kühni und H. Siegrist: **Calibration and validation of an ASM3-based steady-state model for activated sludge systems – Part I: Prediction of nitrogen removal and sludge production**, aus *Wat. Res.*, 35, Heft 9, Seiten 2235-2245, 2001.
- [5] W. Gujer, M. Henze, T. Mino und M. van Loosdrecht: **Activated Sludge Model No. 3**, aus *Wat. Sci. Technol.*, 39, Heft 1, Seiten 183-193, 1999.

- [6] V. Panagiotidis und H. Siegrist: ***Einfluss der Wärmeentnahme aus dem Abwasser des Entwässerungssystems auf den Betrieb der Kläranlage***, interner Bericht, Ingenieurabteilung EAWAG, 2002.