

**Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG)**

**Bereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft**

**Universität Karlsruhe (TH)**

---

Thomas Hillenbrand

## **Analyse und Bewertung neuer urbaner Wasserinfrastruktursysteme**

---

Universität Karlsruhe (TH)

Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe

Schriftenreihe SWW – Band 134 – Karlsruhe 2009

Dissertation genehmigt von der Fakultät für  
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften  
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH) 2009

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. E.h. Hermann H. Hahn, Ph. D., Karlsruhe

Korreferent: PD Dr. Rainer Walz, Karlsruhe

Thomas Hillenbrand

Analyse und Bewertung neuer urbaner Wasserinfrastruktursysteme

Karlsruhe: Universität Karlsruhe, Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft, 2009  
Schriftenreihe SWW Karlsruhe – Band 134  
Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2009  
ISBN 978-3-9811461-7-2

**ISBN 978-3-9811461-7-2**

Alle Rechte vorbehalten

Satz: Institut für Wasser und Gewässerentwicklung  
Bereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft  
Universität Karlsruhe (TH)

Druck: E&B printware, Digital- und Schnelldruck GmbH, 76131 Karlsruhe

Printed in Germany

## Kurzfassung

Aufgrund von Veränderungen wichtiger Randbedingungen wie demographischer Wandel, oder Klimawandel sowie aus ökologischen und ökonomischen Gründen werden Alternativen zu den in Deutschland traditionell eingesetzten Systemen zur Wasserversorgung und Abwasserentsorgung, bestehend aus zentraler Trinkwasserversorgung und Abwasserableitung über große Kanalnetze mit anschließender Behandlung in zentralen Kläranlagen, gesucht. Besonderes Kennzeichen der traditionellen Systeme ist deren geringe Flexibilität, die sich aus den langen Nutzungsdauern wichtiger Komponenten und den damit verbundenen, versunkenen Kosten ("sunk costs") ergibt. Auf der anderen Seite ergeben sich durch den technischen Fortschritt Möglichkeiten für neue Konzepte, die in ersten Pilotvorhaben bereits umgesetzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb ein **methodisches Instrumentarium zur vergleichenden Bewertung urbaner Wasserinfrastruktursysteme** nach ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten erarbeitet, das aufbauend auf der Modellierung der Wasser- und Stoffströme den Vergleich von alternativen mit traditionellen Konzepten ermöglicht. Die Methodik wurde anhand des semidezentral ausgerichteten DEUS 21-Konzept erprobt. Dieses Konzept, das derzeit im Rahmen eines Forschungsvorhabens für ein Neubaugebiet mit etwa 100 Grundstücken umgesetzt wird, beinhaltet die Sammlung und semidezentrale Aufbereitung des anfallenden Regenwassers, das anschließend als Pflegewasser in Trinkwasserqualität wieder verteilt wird. Das Abwasser wird über eine Vakuumkanalisation gesammelt, an die auch Vakuumtoiletten und Küchenabfallzerkleinerer angeschlossen werden. Es wird behandelt in einer anaeroben Membranbehandlungsstufe mit Biogasgewinnung und anschließender Rückgewinnung der Nährstoffe Phosphor und Stickstoff.

Der methodische Ansatz baut auf einer Modellierung der Wasser-, Stoff- und Energieströme auf. Ausgangspunkt ist, entsprechend der für die **ökologische Bewertung** anerkannten Methodik der Ökobilanz, die Festlegung von Untersuchungsziel und –rahmen. Die Ergebnisse des dafür erstellten Modells "**SurWis**" (**Stoffstrom urbanes Wasserinfrastruktursystem**) können dann als Input- und Outputströme der Sachbilanz eingesetzt werden. Zur Ableitung der Kenngrößen, die für den sich anschließenden Schritt der Wirkungsabschätzung festzulegen sind, wurde die ökologische Relevanz von urbanen Wasserinfrastruktursystemen in Deutschland untersucht. Besondere Bedeutung haben danach die resultierenden Gewässerbelastungen mit Nährstoffen und Schwermetallen, noch höhere Emissionsanteile ergeben sich jedoch bei den Einträgen organischer Mikroverunreinigungen wie Arzneimittelreststoffe oder Körperpflegemittel oder bei dem Eintrag antibiotikaresistenter Mikroorganismen. Hohe Relevanz weisen außerdem die Phosphorgehalte im Abwasser als mineralische Ressource und der mit der Wasserinfrastruktur verbundene Wasserverbrauch auf. Um stoffliche und mengenbezogene Belastungen des Wasserkreislaufs adäquat berücksichtigen zu können, ist zwischen Gesamtbelastungen und regionalen bzw. lokalen Belastungen zu unterscheiden. Zur **ökonomischen Bewertung** wird in Anlehnung an die LAWA-Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen die Kapitalwertmethode genutzt. Aufgrund der sich danach ergebenden, sehr langen Betrachtungszeiträume und der geringen Flexibilität

der Systeme sind allerdings Veränderungen wichtiger Einflussfaktoren oder Randbedingungen dezidiert zu berücksichtigen: Dazu zählen die Auswirkungen des Klimawandels und des demographischen Wandels oder auch mögliche zusätzliche ökologische Anforderungen. Große Bedeutung besitzen die Auswirkungen des technologischen Fortschritts, die vor allem bei Techniken mit geringem Reifegrad bei gleichzeitig hoher Innovationsdynamik zu deutlichen Effizienzverbesserungen und Kostenreduktionen führen können. Diese wurden nach dem Konzept der Erfahrungskurven abgeschätzt. Als Datengrundlage der ökonomischen Bewertung dienen ebenfalls die SurWis-Modellergebnisse.

Zur Erprobung des methodischen Ansatzes wurde das DEUS 21-Konzept unter den Randbedingungen der o. g. Pilotanwendung mit einem konventionellen Konzept sowie einem Konzept mit dezentraler Regenwassernutzung, jeweils unterschieden in eine städtische und eine ländliche Variante, verglichen. Die **ökologischen Bewertungsergebnisse** zeigen insgesamt die große Bedeutung der Nutzungsphase, bei einigen Wirkungskategorien (u.a. Treibhauspotenzial) ist allerdings auch die Bauphase mit einem Emissionsanteil von bis zu 25% erheblich. Die Entsorgungsphase spielt dagegen eine untergeordnete Rolle. Werden die resultierenden Ergebnisse auf die durchschnittlich von einem Einwohner in Deutschland verursachten Umweltbelastungen bezogen ("Normierung"), werden die höchsten Anteile bei verschiedenen Einzelindikatoren zur Toxizität mit teilweise über 50% verursacht, für die als ökologisch besonders wichtig eingeschätzte Wirkungskategorie "Treibhauseffekt" liegt der Anteil dagegen bei etwa 2%. Im Vergleich der verschiedenen Konzepte ergeben sich für das DEUS 21-Konzept besondere ökologische Vorteile bei den Kategorien Phosphor- und Wasserbedarf, aquatische Eutrophierung und den meisten ökotoxikologischen Einzelindikatoren, Nachteile dagegen vor allem bei den stark durch den Energieverbrauch beeinflussten Kategorien. Bei einer Bewertung unter Berücksichtigung der zu erwartenden Veränderungen verbleiben nur noch Nachteile bei den Emissionen an Nonylphenol, das exemplarisch für anaerob schlecht abbaubare, organische Verbindungen ausgewählt wurde. Ein zusätzlicher, im Rahmen der Ökobilanz-Methodik nicht einbezogener ökologischer Vorteil des DEUS 21-Konzepts ist die weitgehende Elimination der hygienischen Belastungen im Abwasser.

Soweit von dem bislang üblichen, nur die aktuellen Bedingungen berücksichtigenden Ansatz ausgegangen wird, zeigen die **Ergebnisse der ökonomischen Bewertung** Vorteile für die konventionellen Konzepte. Bei einem integrierten Berechnungsansatz unter Berücksichtigung der zu erwartenden Veränderungen einschließlich des technischen Fortschritts werden die Unterschiede deutlich geringer, teilweise kehren sie sich um. Erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse haben dabei auch die in der Literatur beschriebenen, großen Bandbreiten der Kosten konventioneller Konzepte, die bspw. durch die Baukonjunktur oder durch unterschiedliche bauliche Randbedingungen verursacht werden.

Wichtige **Schlussfolgerung** aus den erzielten Ergebnissen ist die notwendige Erweiterung der für die ökologische und ökonomische Bewertung zur Verfügung stehenden Methoden, um relevante, über die langen Nutzungsdauern hinweg sich ändernde Bedingungen sowie die spezifischen Besonderheiten urbaner Wasserinfrastruktursysteme berücksichtigen zu können.

## Abstract

For ecological and economic reasons the search is on for alternatives to the centralised system of drinking water supply and wastewater disposal via large networks of sewers with subsequent treatment in central wastewater treatment plants. The low degree of flexibility is a specific feature of such traditional systems, resulting from the long service life of important components and the associated unretrievable sunk costs. Within this project, therefore, a method was developed for the **comparative evaluation of urban water infrastructure systems**. Based on modelling water and material flows, this method makes it possible to compare alternative and traditional concepts using their ecological and economic impacts. The methodology was tested using the semidecentral DEUS 21 concept. This concept, which is currently being implemented within the scope of a research project in a new housing development of about 100 plots, covers the collection and semidecentralized treatment of rainwater which is subsequently distributed as service water of drinking water quality. Wastewater is collected via a system of vacuum sewers, which are also connected to vacuum toilets and kitchen waste shredders. Wastewater is then purified in an anaerobic membrane plant with biogas production and subsequent recovery of the nutrients phosphorous and nitrogen.

The method is based on modelling the water, material and energy flows. In line with the accepted method of life-cycle assessment for **ecological evaluation**, the starting point is to set a goal and scope for the assessment. The results of the developed model "**SurWis**" (**Stoffstrom urbanes Wasserinfrastruktursystem**<sup>1</sup>) can be used as input and output flows for the life cycle inventory. To derive the indicators which have to be defined for the subsequent life cycle impact assessment, the ecological relevance of urban water infrastructure systems in Germany was examined. The resulting water pollution with regard to nutrients and heavy metals is of particular significance; however, there are even higher emission shares for organic micropollutants such as pharmaceutical residues or personal care products or for antibiotic-resistant microorganisms. The concentration of phosphorous in wastewater as a mineral resource is also very relevant as is the domestic water consumption associated with the water infrastructure. In order to be able to adequately take into account material and quantitative pollution of the water cycle, a distinction has to be made between total emissions and regional or local emissions. The net present value method is used for the **economic evaluation** following the German LAWA<sup>2</sup> guidelines for conducting dynamic cost comparison calculations. This allows for adding up the cash flows over an evaluation period which is fixed depending on the useful life. Because of the resulting very long evaluation periods and the low degree of flexibility of the systems, however, changes of important factors of influence or system boundaries have to be explicitly examined and taken into account: These include the

---

<sup>1</sup> Material flow of urban water infrastructure system

<sup>2</sup> LAWA: Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (German Working Group on water issues)

impacts of climate change, changes due to demographic developments or also possible additional ecological standards. The impacts of technological change are particularly important, as these can lead to obvious efficiency improvements and cost reductions, primarily in technologies with low maturity and simultaneously high innovation dynamics. These were estimated following the concept of experience curves. The SurWis modelling results are also used as input to the database for the economic evaluation.

For testing the methodology the DEUS 21 concept was compared under the conditions of the above-named pilot application with a conventional, centrally organized concept and an extended conventional concept with decentralized rainwater utilisation, each divided into an urban and a rural variant. The **ecological evaluation results** show the high overall importance of the service period; for some impact categories (among other, global warming potential), however, the construction phase also has a substantial role, with an emission share of up to 25 %. The disposal phase, in contrast, only plays a subordinate role. If the results are related to the average environmental emissions caused by one resident in Germany ("standardisation"), the highest shares, some over 50 %, are caused for different individual indicators of toxicity; in contrast, the share for the impact category "greenhouse effect", which is assessed as being especially important ecologically, is only around 2 %. When comparing the different concepts, the results show that there are specific ecological advantages in the categories demand for phosphorous and for water, aquatic eutrophication and most of the ecotoxicological individual indicators for the DEUS 21 concept, but disadvantages primarily in those categories strongly influenced by energy consumption. In an evaluation considering the expected changes, only disadvantages remain for emissions of nonylphenol, which was chosen as an example for an anaerobic poorly degradable, organic compound. The elimination of hygienic contaminations is an additional advantage of the DEUS 21 concept, which is not possible to include in the method of life-cycle assessment.

The **results of the economic evaluation** vary with the method used: There are clear advantages for conventional concepts if the common method used so far is assumed which only takes current conditions into account. With an integrated calculation method which takes expected changes into account, including technological change, the differences are much smaller, and may even be partly reversed. The large margins in the costs of conventional concepts described in the literature substantially influence the results. These are caused by overall building activity, for example, or different structural constraints.

An important **conclusion** from the results obtained is that the existing methods for ecological and economic evaluation need to be extended in order to be able to consider relevant conditions which change over the long service life and the specific features of urban water infrastructure systems.

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Zusammenfassung	XVII
1 Einleitung	1
2 Zielsetzung	5
3 Grundlagen und gewählter Untersuchungsansatz	8
3.1 Grundlagen zur Stoffstrombilanzierung und ökologischen Bewertung	8
3.1.1 Beschreibung der Ökobilanz-Methode	8
3.1.2 Bewertungsansätze zur Wirkungsabschätzung im Rahmen der Ökobilanz-Methode	11
3.1.3 Untersuchungen zur ökologischen Bewertung von Wasserinfrastruktursystemen	15
3.1.4 Kennzahlen zur ökologischen Relevanz urbaner Wasserinfrastruktursysteme in Deutschland	17
3.1.5 Beschreibung des Untersuchungsansatzes zur Stoffstrombilanzierung und ökologischen Bewertung	25
3.1.5.1 Zielfestlegung und Sachbilanzierung	25
3.1.5.2 Festlegung der Wirkungskategorien	26
3.1.5.3 Aufbereitung der Wirkungsindikatorergebnisse und Auswertung	37
3.1.6 Grenzen des Ökobilanz-Ansatzes	41
3.2 Grundlagen zur ökonomischen Bewertung	44
3.2.1 Methoden zur ökonomischen Bewertung	44
3.2.1.1 Statische Verfahren	45
3.2.1.2 Dynamische Verfahren	45

3.2.1.3	Einzel- und gesamtwirtschaftliche Betrachtungsweisen	48
3.2.1.4	Ökonomische Bewertung neuer Techniken – Konzept der Erfahrungskurve	49
3.2.2	Untersuchungen zur ökonomischen Bewertung von Wasserinfrastruktursystemen	54
3.2.3	Beschreibung des Untersuchungsansatzes zur ökonomischen Bewertung von Wasserinfrastruktursystemen	56
4	Änderungen wichtiger Einflussfaktoren für urbane Wasserinfrastruktursysteme während ihrer Nutzungsdauer	59
4.1	Technologischer Fortschritt	59
4.2	Änderungen weiterer Einflussfaktoren	62
5	Beschreibung der Anwendungsfälle	66
5.1	"DEUS 21"-Konzept	66
5.2	Konventionelles Konzept	68
5.3	Konventionelles Konzept mit Regenwassernutzung	68
5.4	Randbedingungen der Untersuchungsszenarien	69
6	Stoffstrombilanzierung und ökologische Bewertung	72
6.1	Beschreibung des Modells zur ökologischen Bewertung	72
6.1.1	Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	72
6.1.2	Beschreibung der Sachbilanzmodule	76
6.1.2.1	Allgemeine Module	77
6.1.2.2	Bauphase	78
6.1.2.3	Betriebsphase	80
6.1.2.3.1	Aufbereitung und Verteilung von Trink-, Regen- und Pflegewasser	80
6.1.2.3.2	Oberflächenabfluss	81
6.1.2.3.3	Haushalte	82
6.1.2.3.4	Abwasserableitung und -behandlung	88
6.1.2.3.5	Bioabfallbehandlung	96



6.1.2.4	Entsorgungsphase	97
6.1.2.5	Module zur Systemerweiterung (Produktkorb)	97
6.1.3	Stoffstrommodell Wasser	100
6.1.3.1	Grundstruktur des Stoffstrommodells Wasser	102
6.1.3.2	Datenquellen	103
6.2	Ergebnisse der ökologischen Bewertung	105
6.2.1	Ausgewählte Ergebnisse des Stoffstrommodells Wasser	105
6.2.2	Ausgewählte Ergebnisse der Sachbilanz	109
6.2.3	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	111
6.2.3.1	Ergebnisse für die einzelnen Wirkungskategorien	111
6.2.3.2	Ergebnisse der Normierung und Ordnung	126
6.2.3.3	Sensitivitätsanalysen	129
6.2.4	Ergebnisse unter zukünftigen Bedingungen	132
6.2.5	Zusatzaspekte bei der ökologischen Bewertung	139
6.2.6	Fehlerbetrachtung	140
6.2.7	Diskussion der Ergebnisse zur ökologischen Bewertung	142
7	Ökonomische Bewertung	146
7.1	Datengrundlagen	147
7.1.1	Bauphase	147
7.1.2	Betriebsphase	149
7.2	Ergebnisse	150
7.2.1	Ergebnisse mit konventionellem Berechnungsansatz	150
7.2.2	Ergebnisse mit integriertem Ansatz zur Berücksichtigung zukünftiger Veränderungen	151
7.2.3	Sensitivitätsanalysen zur ökonomischen Bewertung	158
7.2.4	Fehlerbetrachtung	162

7.2.5	Diskussion der Ergebnisse der ökonomischen Bewertung	164
8	Schlussfolgerungen	166
9	Literaturverzeichnis	171
Anhang	188	
	Schriftenreihe SWW - Karlsruhe	211