

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Doctoral Thesis, Periodical Part, Published Version

**Fenrich, Eva Katrin**

## **Entwicklung eines ökologisch-ökonomischen Vernetzungsmodells für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher**

Mitteilungen. Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:  
**Universität Stuttgart**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106483>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Fenrich, Eva Katrin (2018): Entwicklung eines ökologisch-ökonomischen Vernetzungsmodells für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher. Stuttgart: Universität Stuttgart, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung (Mitteilungen. Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart, 257). <http://dx.doi.org/10.18419/opus-10112>.

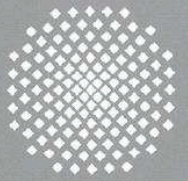
### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

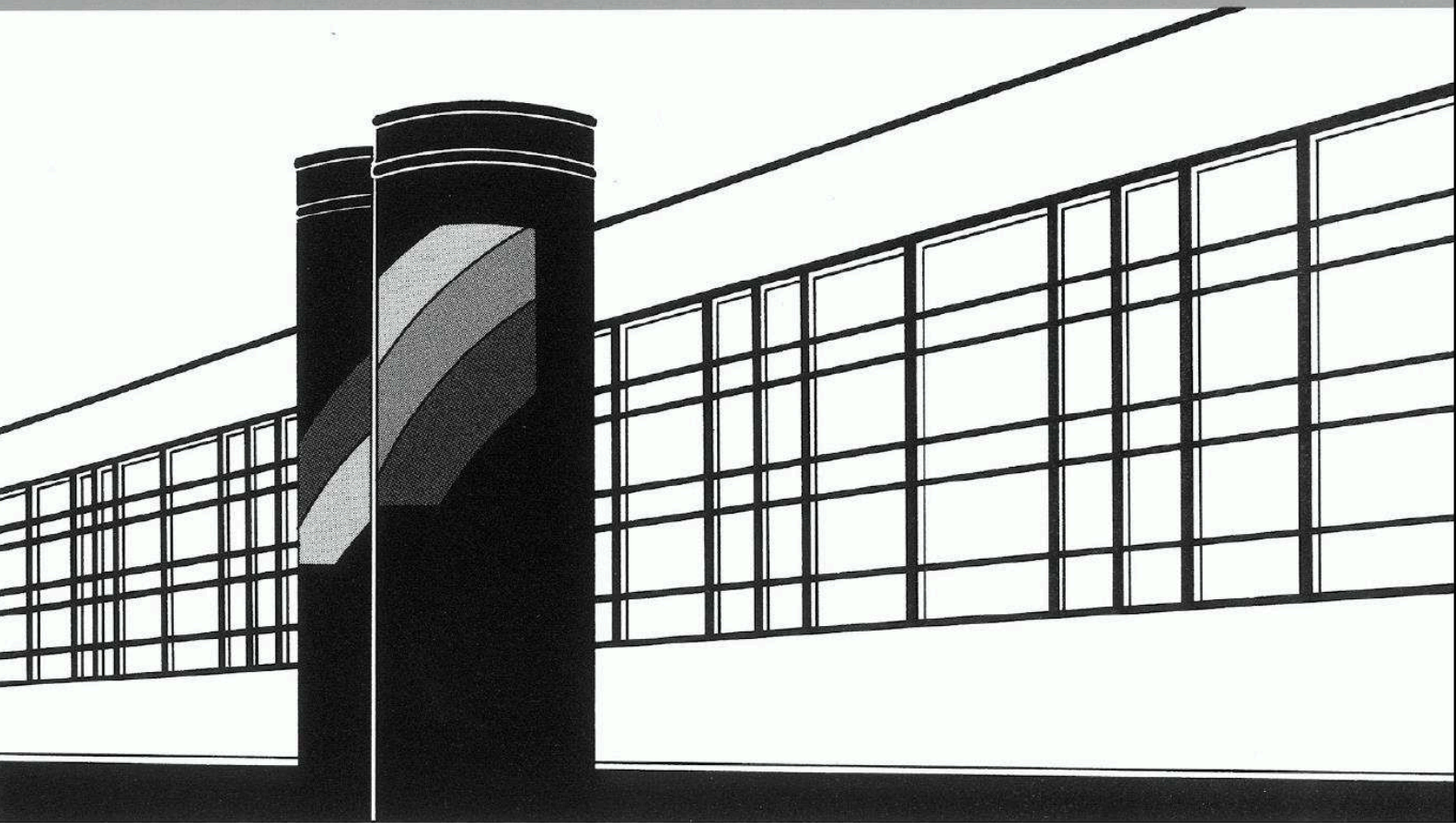


Universität Stuttgart



Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung

# *Mitteilungen*



Heft 257 Eva Katrin Fenrich

Entwicklung eines ökologisch-  
ökonomischen Vernetzungsmodells für  
Wasserkraftanlagen und  
Mehrzweckspeicher



# **Entwicklung eines ökologisch-ökonomischen Vernetzungsmodells für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher**

von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der  
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von  
**Eva Katrin Fenrich**  
aus Waiblingen, Deutschland

Hauptberichterin: Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht  
Mitberichter: PD Dr.-Ing. Walter Marx  
Dr. Bettina Bockelmann-Evans

Tag der mündlichen Prüfung: 07. November 2017

Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung  
der Universität Stuttgart  
2018



Heft 257 **Entwicklung eines  
ökologisch-ökonomischen  
Vernetzungsmodells für  
Wasserkraftanlagen und  
Mehrzweckspeicher**

von  
Dr.-Ing.  
Eva Katrin Fenrich

**D93 Entwicklung eines ökologisch-ökonomischen Vernetzungsmodells für  
Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher**

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://www.d-nb.de> abrufbar

Fenrich, Eva Katrin:  
Entwicklung eines ökologisch-ökonomischen Vernetzungsmodells für  
Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher, Universität Stuttgart. -  
Stuttgart: Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, 2018  
  
(Mitteilungen Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität  
Stuttgart: H. 257)  
Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2018  
ISBN 978-3-942036-61-0  
  
NE: Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung <Stuttgart>: Mitteilungen

Gegen Vervielfältigung und Übersetzung bestehen keine Einwände, es wird lediglich um Quellenangabe gebeten.

Herausgegeben 2018 vom Eigenverlag des Instituts für Wasser- und Umweltsystemmodellierung

Druck: Document Center S. Kästl, Ostfildern

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen besonderen Dank den nachstehenden Personen entgegen bringen, ohne deren Mithilfe die Anfertigung dieser Promotionsschrift niemals zustande gekommen wäre:

Mein Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht für die Möglichkeit diese Dissertation am Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft anfertigen zu können sowie insbesondere auch für die kurzfristige Übernahme des Hauptreferats.

Für den Anstoß, mich mit diesem spannenden Thema zu beschäftigen, die vielen anregenden fachlichen Diskussionen und wertvollen Anregungen beim Anfertigen dieser Dissertationsschrift sowie die Übernahme des Mitberichts danke ich Herrn Privatdozent Dr.-Ing. Walter Marx.

Dr. Bettina Bockelmann-Evans danke ich für die langjährige gute kollegiale und freundschaftliche Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Meeresenergie, spannende gemeinsame Projekte und Veröffentlichungen und die Übernahme des externen Mitberichts.

Für die Ermutigung mich in dieses Forschungswagnis hinein zu begeben sowie für die interessierte Begleitung der Arbeit bin ich Prof. em. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Jürgen Giesecke sehr dankbar.

Dem internationalen Doktorandenprogramm ENWAT danke ich für die Unterstützung von Konferenz- und Kursbesuchen sowie die Möglichkeit des fachlichen Austausches.

Mein Dank geht weiterhin an die Kolleginnen und Kollegen des IWS für die angenehme Zeit am Institut. Ebenso möchte ich mich bei den Kolleginnen und Kollegen an der Cardiff University bedanken, die mich als Visiting Researcher freundlich aufgenommen haben. Auch an Brigitte Muschong und Maria Costa geht ein großes Danke für das Korrekturlesen des Manuskripts. Für die bedingungslose Unterstützung meines Studiums und der darauf folgenden Promotionszeit empfinde ich meinen Eltern gegenüber besonderen Dank. Allen meinen Freunden und meiner Familie danke ich für ihr Verständnis und ihre Ratschläge, die Hilfestellungen und den Rückhalt, welchen ich immer genießen konnte.





# Kurzfassung

Die Bereitstellung von Frischwasser für die Bewässerung, Trink- und Brauchwasser sowie umweltfreundlich produzierter elektrischer Energie ist eine der wichtigsten Grundlagen für die Entwicklung einer Region oder eines Landes. Viele unterschiedliche Nutzungsansprüche auf begrenzte Ressourcen sind zu beachten und abzuwägen. Die vernetzten Versorgungsrisiken im Nexus „Wasser, Energie, Nahrung“ sind gleichermaßen eine große Herausforderung für Politik und Ingenieure.

Wasserkraft stellt eine saubere, CO<sub>2</sub>-neutrale, regenerative Energiequelle dar. Jedoch sind aufgrund der Veränderung des Abflussregimes und der Querverbauung der Gewässer große Auswirkungen auf die lokale Ökologie zu erwarten. Diese Auswirkungen auf die lokale oder auch globale Flussökologie bedingen, dass bei der Planung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern auf ein komplexes System an Einflüssen eingegangen werden muss. Die Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Nutzungsarten einerseits und der Fluss- und Auenökologie andererseits müssen in ihrer Gesamtheit erfasst werden. Aufgrund der langen Lebensdauer der Anlagen ist es notwendig sehr eingehend die Auswirkungen eines Projekts in allen Bau- und Betriebsphasen zu untersuchen, da es sich hierbei nicht um kurzfristige Eingriffe, von denen sich das natürliche Gewässer wieder erholen kann, handelt.

Ebenso ist es bei Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern, wie bei allen großen Infrastrukturmaßnahmen wichtig, dass Entscheidungsträger die Möglichkeit bekommen, übersichtlich Einblicke in die Wirkungszusammenhänge zu gewinnen und Projektvarianten zu vergleichen. Dies ist insbesondere auch dann relevant, wenn verschiedene Interessengruppen oder Projektpartner eine Einigung über die Weiterverfolgung bestimmter Projektvarianten erzielen sollen.

Ausgehend von der vorgestellten Problematik wird eine ganzheitliche qualitative und quantitative Bewertung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern sowohl für die Planung als auch für den Betrieb vorgestellt. Hierzu

wurde ein Bilanzierungsmodell entwickelt, das auf Grundlage Leontief'scher Input-Output-Analyse als Entscheidungsunterstützung für Projektentscheidungen beim Neubau und der Erneuerung von Anlagen dienen kann.

Die Input-Output-Analyse, ein Verfahren der empirischen Wirtschaftsforschung, das für volkswirtschaftliche Analysen eingesetzt wird, ist ein geeignetes Werkzeug, um Verflechtungen zwischen verschiedenen Aspekten eines Systems zu beschreiben. Durch die Möglichkeit, Stoff- und Wirtschaftsströme in unterschiedlichen Einheiten miteinander zu verknüpfen, eignet sich die Input-Output-Analyse sehr gut zur Modellierung komplexer vernetzter Strukturen.

Zunächst wurden qualitative Modelle für die jeweiligen Anlagentypen aufgestellt und anschließend an die Bedingungen des betrachteten Projekts angepasst. Hierzu wurden die Systemgrenzen festgelegt und bestimmt, welche Nutzungsarten zum aktuellen Betrachtungszeitraum relevant sind. Mit Hilfe von Input-Output-Graphen werden die Gesamtsysteme anschaulich dargestellt. Traditionell stehen die Knoten des Graphen für die Sektoren einer Volkswirtschaft und die Kanten stellen die jeweiligen Verflechtungen dar. Produkte eines Sektors einer Volkswirtschaft werden zur Produktion von Gütern und Dienstleistungen anderer Sektoren benötigt. Die Richtung der jeweiligen Kante des Graphen stellt eine Lieferbeziehung dar. Bei der Bewertung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern werden an Stelle von Sektoren einzelne Aspekte innerhalb des Projektes, wie beispielsweise die Trinkwassergewinnung oder die Erzeugung elektrischer Energie, sowie als Primärinputs natürliche Ressourcen betrachtet.

Die Input-Output-Graphen können anschließend teilweise mit Hilfe graphentheoretischer Überlegungen vereinfacht werden. Beispielsweise können Teilgraphen zusammengefasst oder zirkuläre Abhängigkeiten aufgedeckt werden. Von besonderem Interesse sind häufig die indirekten Lieferbeziehungen zwischen Sektoren, die zunächst nicht direkt ersichtlich sind, im Input-Output-Modell aufgrund der Darstellung als Systemgraph jedoch deutlich erkennbar werden.

Ein wichtiger Grund, qualitative Modelle zu erstellen, kann unter anderem auch sein, verschiedene Projekte oder Projektvarianten zunächst aufgrund ihrer Struktur zu vergleichen, oder um schon vorhandene Projekte unterschiedlicher Größe als Grundlage für die Datenbeschaffung neu geplanter Projekte zu nutzen.

---

Dieses qualitative Modell wird jeweils für eine bestimmte Anlagengröße und Nutzungsart quantifiziert und anschließend werden iterativ Nutzungsszenarien evaluiert. Bei Bedarf kann als abschließende Untersuchung das so entwickelte Input-Output-Modell als Grundlage einer linearen Optimierung verwendet werden. Quantitative Gesamtmodelle und lineare Optimierungsmodelle sind jeweils stark abhängig von den betrachteten Projektvarianten. Durch eine vernetzte Formulierung ökonomischer und ökologischer Fragestellungen wird eine quantitative Bewertung der gegenseitigen Beeinflussung ermittelt.

Anhand von Fallstudien wurde die Anwendbarkeit der zuvor erarbeiteten Methodik auf verschiedene Anlagentypen und -größen verifiziert und das Modell weiterentwickelt. Um die grundsätzliche Anwendbarkeit der Input-Output-Analyse auf Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher zu untersuchen, wurde zunächst ein sehr einfaches schwach vernetztes System eines Ausleitungskraftwerks an der Drau in Österreich untersucht. Hierbei wurde vor allem auf die Vernetzung von Wasserdargebot, energetischer Nutzung und Flussökologie eingegangen. Die Integration von Bewässerung und Landnutzungsparametern in einem Input-Output-Modell wurde anhand eines Bewässerungssystems in Venezuela untersucht. Hierbei werden vor allem auch sozioökonomische Aspekte mit integriert. In einer weiteren Fallstudie wurde ein Ausleitungskraftwerk an der unteren Argen mit gleichzeitiger Wasserentnahme zur Bewässerung untersucht. Als sehr stark vernetztes System wird das Kandadji-Projekt am Niger, ein typisches Mehrzweckspeicher-Projekt mit Bewässerung, Wasserkraft und Trinkwassergewinnung, betrachtet. Schließlich wird, um die Bandbreite der Anwendbarkeit des entwickelten Modells darzustellen, eine Fallstudie für ein Gezeitenkraftwerk zusammen mit einer Landnutzungs-Wassergütemodellierung im Küstenbereich erstellt.

Die verschiedenen Fallstudien geben einen Überblick über die Bandbreite der Anwendungsbereiche des hier entwickelten Modells. Deutlich zu erkennen ist, dass qualitative Modelle und auch quantifizierte Teilmodelle jeweils übertragbar auf andere Projekte und Projektvarianten sein können. Damit wurde Ingenieuren und Entscheidungsträgern ein wertvolles Werkzeug in die Hand gegeben, um die Auswirkungen von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern in allen Planungs- und Betriebsphasen zu bewerten.



# Abstract

The provision of fresh water for irrigation, drinking and industrial water as well as an environmentally friendly production of electrical energy are an important base for the development of a region or a country. Many different user requirements towards limited resources have to be taken into consideration. The interconnected supply risks in the „water, energy, food“ nexus are a challenge for both policy and engineers.

Hydropower is a clean CO<sub>2</sub> neutral renewable energy source. However major impacts on the local ecology can be expected because of the changed flow regimes and transverse structures disturbing the longitudinal connectivity of streams. These implications on the local and global instream ecology make it necessary to take a complex system of influences into consideration when planning hydropower plants or multipurpose reservoirs.

The interactions between the different types of users on the one hand and the river and floodplain ecology on the other hand have to be taken into account in their entirety.

Due to the long life of the installations it is necessary to very closely investigate the effects of a project in all construction and operation phases as there are not short-term interventions of which the natural waters can recover.

At the same time similarly to other large-scale infrastructure projects it is necessary for hydropower and multipurpose storage projects to enable decision makers to easily gain insights into the interdependencies and compare project versions. This is especially relevant when different stakeholders or project partners need to agree about the further pursuit of certain project variants. On the basis of the presented issues an integrated qualitative and quantitative evaluation of hydropower plants and multipurpose storage is presented for both planning and operation.

For this purpose, an accounting model based on the Leontief type input-output analysis was developed, which can serve as a decision-support tool for project choices during building and renewal of equipment. The input-output analysis, a method in empirical economic research, which is used for macroeconomic analyses, is a suitable tool to describe links between different aspects of a system. Because of the possibility to link material and economic flows in different units the input-output analysis is well suited for modelling complex networked structures. In a first step qualitative models for different project types were developed and afterwards adapted to the specifics of the project investigated.

To this end system boundaries were defined and it was determined what types of uses are relevant to the current period under review. Using an input-output graph the overall systems are clearly illustrated. Traditionally the nodes of the graph represent the sectors of an economy, the edges represent their respective links. Products of one sector of an economy are needed to produce goods and services in other sectors. The direction of an edge demonstrates the supply relationship.

When evaluating hydropower and multipurpose storage plants individual aspects within the project, such as the drinking water or the generation of electrical energy, as well as for primary inputs natural resources, are considered instead of sectors. In some cases input-output graphs can be simplified by using graph theory. For example subgraphs can be grouped together or circular relationships can be revealed. Of particular interest are often the indirect supply relationships between sectors that are not directly visible initially, which are made clearly visible in the input-output model following the presentation as a system graph. Another important reason for developing qualitative modes can be the need to compare different projects or project variants structurally in the first place or to use already existing projects of different dimensions as a basis to source data for newly planned projects.

This qualitative model is then quantified for a certain size of a scheme or certain usages and then used to iteratively evaluate usage scenarios. Where feasible, developed model can then be used as a basis for linear optimization. Quantitative system modes and linear optimization modes are highly dependent on the evaluated project variants. Due to the networked formulation of economical and ecological aspects the mutual interference can be quantitatively assessed. Using case studies, the applicability of the previously developed methodology was verified for various plant types and sizes and the model further developed. Initially a very simple weakly

---

networked system for a diversion hydropower scheme at the river Drau in Austria was modelled to investigate the applicability in principle of the input-output model to hydropower plants and multipurpose storage . Especially the interlinkages between water resource availability, energetic usage and river ecology were considered. The integration of land use and irrigation parameters in an input-output model was tested for an irrigation scheme in Venezuela. Socioeconomic aspects were integrated here. A further case study at the lower river Argen combined a diversion hydropower scheme with water abstraction for irrigation. As an example for a highly networked system the Kandadji project on the Niger, a typical multipurpose storage project with irrigation, hydropower and drinking water was considered. Finally, to illustrate the range of applicability of the developed model, a case study for a tidal power plant combined with land use and water quality modeling in the coastal area was conducted.

The different case studies give an overview over the wide range of applications of the developed model. It can be clearly seen that qualitative models and quantified submodels can be transferred to other projects or project variants. The method provides a valuable tool for engineers and decision makers to evaluate the impacts of hydropower and multipurpose storage schemes in all planning and operation phases.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit . . . . .	3
<b>2 Mehrzweckspeicher und Wasserkraftanlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Arten der Mehrzwecknutzung von Speicherseen . . . . .	5
2.1.1 Wasserkraft . . . . .	6
2.1.2 Bereitstellung von Trink- und Brauchwasser . . . . .	7
2.1.3 Bereitstellung von Bewässerungswasser . . . . .	7
2.1.4 Hochwasserschutz . . . . .	8
2.1.5 Niedrigwasser-Aufhöhung . . . . .	9
2.2 Aspekte der wirtschaftlichen Bewertung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern . . . . .	10
2.2.1 Positive externe Effekte von Wasserkraftanlagen und Speicherseen . . . . .	11
2.2.2 Negative externe Effekte von Wasserkraftanlagen und Speicherseen . . . . .	12
2.3 Phasen der Planung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern . . . . .	13
<b>3 Bisherige Ansätze zur Modellierung und Bewertung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern</b>	<b>15</b>
3.1 Vorüberlegungen zu Modellen und Bewertungsverfahren für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher . . . . .	15
3.2 Qualitative Gesamtprojekt-Bewertungen . . . . .	16
3.2.1 ICOLD-Matrix . . . . .	16

3.2.2	ICID-Checkliste . . . . .	16
3.3	Hydro-ökologische Modelle . . . . .	17
3.3.1	Beispiele für hydro-ökologische Modelle . . . . .	17
3.4	Energiewirtschaftliche Modelle . . . . .	19
3.5	Wirtschaftliche Bewertung von Wasserressourcen . . . . .	20
3.5.1	Bestimmung von Wasserpreisen und Opportunitätskosten	20
3.5.2	Wirtschaftliche Bewertung von Wasserkraft . . . . .	20
3.6	Modellierung von Bewässerung . . . . .	21
3.6.1	ClimWat . . . . .	21
3.6.2	CropWat . . . . .	21
3.6.3	AquaCrop . . . . .	23
3.7	Modellierung von Wassergüteparametern . . . . .	24
3.7.1	Modellierung des Nährstoffeintrags in Gewässer . . . . .	24
3.7.2	Modellierung der Nährstoffverteilung und Nährstoffum- setzung in Gewässern . . . . .	26
3.8	Abschätzung von Fischerträgen in Seen und Stauseen . . . . .	26
3.9	Ökonomisch-ökologische Bewertungsverfahren . . . . .	27
3.9.1	Ökosystemleistungen . . . . .	27
3.9.2	Bewertung externer Effekte . . . . .	28
3.9.3	Systemmodellierung . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Input-Output-Analyse</b>	<b>31</b>
4.1	Makroökonomische Input-Output-Tabellen . . . . .	31
4.2	Das offene statische Input-Output-Modell von W. Leontief . . . . .	33
4.3	Qualitative Input-Output-Modelle . . . . .	35
4.4	Quantifizierung qualitativer Input-Output-Modelle . . . . .	40
4.5	Input-Output Analyse als Grundlage einer linearen Optimierung	41
4.6	Erweiterte Input-Output Modelle außerhalb der rein volkswirt- schaftlichen Betrachtung . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Anpassung von Input-Output-Modellen an wasserwirt- schaftliche Problemstellungen</b>	<b>47</b>
5.1	Entwicklung eines Input-Output-Modells für die Wasserwirtschaft	48
5.1.1	Grundlegende Erwägungen . . . . .	48
5.1.2	Vorgehensweise zur Erstellung eines Input-Output- Modells für eine wasserwirtschaftliche Fragestellung . . . . .	49
5.1.3	Zeitliche Auflösung der Modelle . . . . .	49
5.1.4	Substitutionsmechanismen . . . . .	50

5.2	Qualitative Verflechtungs-Beschreibung für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher . . . . .	51
5.2.1	Generelle Vorgehensweise zur Erstellung und Vereinfachung von Input-Output-Graphen für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher . . . . .	51
5.2.2	Ausleitungskraftwerk . . . . .	52
5.2.3	Mehrzweckspeicher . . . . .	56
5.2.4	Gezeitenkraftwerk . . . . .	58
5.3	Quantifizierung eines Input-Output-Modells für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher . . . . .	60
5.3.1	Bestimmung von Transformationskoeffizienten . . . . .	60
5.4	Erweiterung des klassischen Leontief-Modells . . . . .	65
5.4.1	Negative Effekte . . . . .	66
5.4.2	Mehrfachnutzen . . . . .	66
5.4.3	Kopplungseffekte von Wassergüte und Wassermengen . . . . .	68
5.5	Ablauf der Berechnung von Szenarien . . . . .	73
5.5.1	Generierung und Verifikation von Szenarien . . . . .	73
5.6	Optimierung . . . . .	75
<b>6</b>	<b>Fallstudien</b>	<b>77</b>
6.1	Fallstudie Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob an der Drau in Österreich . . . . .	78
6.1.1	Projektdaten für das Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob . . . . .	78
6.1.2	Ein qualitatives Modell für das Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob . . . . .	79
6.1.3	Quantifizierung der Modellparameter für das Kraftwerk Rosegg-St. Jakob . . . . .	84
6.1.4	Bestimmung von Transformationskoeffizienten . . . . .	84
6.1.5	Evaluation von Nutzungsszenarien . . . . .	87
6.1.6	Bewertung der Fallstudie Rosegg-St. Jakob . . . . .	87
6.2	Fallstudie Bewässerungssystem El Diluvio-Palmar . . . . .	89
6.2.1	Szenarien . . . . .	90
6.2.2	Bestimmung von qualitativen Modellen . . . . .	91
6.2.3	Quantifizierung . . . . .	94
6.2.4	Düngemittel . . . . .	96
6.2.5	Bestimmung von Anforderungsprofilen . . . . .	99
6.2.6	Evaluation von verschiedenen Landnutzungsszenarien . . . . .	102
6.2.7	Bewertung der Fallstudie Diluvio-Palmar . . . . .	102
6.3	Fallstudie Untere Argen . . . . .	103
6.3.1	Das Untersuchungsgebiet Untere Argen . . . . .	104
6.3.2	Ein qualitatives Input-Output-Modell für die Untere Argen	107

6.3.3	Quantifizierung des Modells Untere Argen . . . . .	111
6.3.4	Evaluation von Nutzungsszenarien der Unteren Argen .	117
6.3.5	Optimierung für das System Untere Argen . . . . .	117
6.3.6	Mögliche Bewirtschaftung der Unteren Argen . . . . .	118
6.3.7	Bewertung der Ergebnisse der Fallstudie . . . . .	119
6.4	Fallstudie Kandadji: Ein Mehrzweckspeicher am Niger . . . . .	120
6.4.1	Projekt-Hintergrund und Daten . . . . .	120
6.4.2	Qualitatives Input-Output-Modell für die Mehrzweckspeicheranlage Kandadji . . . . .	124
6.4.3	Bestimmung von Transformationskoeffizienten . . . . .	129
6.4.4	Modellierung verschiedener Szenarien . . . . .	132
6.4.5	Optimierung für das System Kandadji . . . . .	134
6.4.6	Bewertung der Fallstudie Kandadji . . . . .	136
6.5	Fallstudie Gezeitenkraftwerk am Severn Ästuar . . . . .	138
6.5.1	Bedingungen am Severn Ästuar . . . . .	138
6.5.2	Ein qualitatives Input-Output-Modell für den Severn Ästuar	139
6.5.3	Quantifizierung eines Modells für den Severn Ästuar . .	140
6.5.4	Evaluierung von Szenarien . . . . .	142
6.5.5	Bewertung der Fallstudie Gezeitensperre Severn Ästuar	143
6.6	Zusammenfassende Betrachtung der Fallstudien . . . . .	143
<b>7</b>	<b>Bewertung der Ergebnisse</b>	<b>145</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>147</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>149</b>

# Abbildungsverzeichnis

---

4.1	Qualitativer Input-Output-Graph für das im klassischen Grundmodell dargestellte System . . . . .	37
4.2	Qualitativer Input-Output-Graph für ein dreigliedriges Wirtschaftssystem . . . . .	38
4.3	Beispiel eines Systemgraphen bei dem verschiedene finanzielle Eingriffsmöglichkeiten dargestellt werden . . . . .	39
5.1	Ablauf einer Input-Output-Modellierung für ein wasserwirtschaftliches Problem . . . . .	49
5.2	Beispiel-Systemgraph für ein Ausleitungskraftwerk in Kombination mit Bewässerung . . . . .	54
5.3	Beispiel-Systemgraph für ein Ausleitungskraftwerk mit einer Feldfrucht in Kombination mit Bewässerung . . . . .	55
5.4	Beispiel-Systemgraph für ein Ausleitungskraftwerk - Verzicht auf Bewässerung oder Jahreszeit ohne Bewässerung . . . . .	56
5.5	Systemgraph für einen Mehrzweckspeicher . . . . .	57
5.6	Systemgraph für ein Gezeitenkraftwerk . . . . .	59
5.7	Koeffizientenbestimmung aus einem Modellergebnis-Graph . . . . .	63
5.8	Koeffizientenbestimmung aufgrund besonders hoch belasteter Punkte, hier für gelösten anorganischen Phosphor . . . . .	70
5.9	Iterativer Ablauf der Berechnung . . . . .	74
6.1	Input-Output-Graph für das Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob . . . . .	80
6.2	Input-Output-Graph für das Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob mit aufgeteilten physikalischen und ökologischen Ressourcen . . . . .	82
6.3	Input-Output-Graph für das Bewässerungsprojekt El Diluvio-Palmar für das Kooperativen-Szenario I mit den Anbauprodukten Tomaten, Maniok, Bananen für den lokalen Markt . . . . .	92

## Abbildungsverzeichnis

---

6.4	Input-Output-Graph für das Bewässerungsprojekt El Diluvio-Palmar für das Kooperativen-Szenario II mit den Anbauprodukten Baumwolle, Mais und Bananen für teilweisen Export . . .	93
6.5	Input-Output-Graph für das Bewässerungsprojekt El Diluvio-Palmar für ein Selbstversorger-Szenario . . . . .	94
6.6	Untersuchungsgebiet Untere Argen (Kennedy 2007) . . . . .	105
6.7	Qualitativer Input-Output-Graph für die Untere Argen für das Nutzungsszenario „Sommer 2003 - vollständig“ . . . . .	108
6.8	Qualitativer Input-Output-Graph für die Untere Argen ohne Grundwasserbrunnen . . . . .	109
6.9	Qualitativer Input-Output-Graph für einen kühlen Monat (Szenario ohne Grundwasserbrunnen und ohne Erdbeeren, da diese nur einen Teil der Sommer-Saison bewässert werden) . . .	110
6.10	Qualitativer Input-Output-Graph für ein teilbewässertes System (Äpfelplantagen unbewässert, Berücksichtigung von Niederschlagswasser) . . . . .	111
6.11	Koeffizientenbestimmung aus CASIMIR-Modellergebnissen durch stückweise Linearisierung mit Tangenten . . . . .	114
6.12	Formulierung des linearen Optimierungsmodells für die Anwendung des Simplex-Solvers QSOpt auf das System Untere Argen . . . . .	118
6.13	Input-Output-Graph angepasst an die Planungen des Mehrzweckspeichers Kandadji mit Wassernutzung für Eigenbedarf aus lokaler Landwirtschaft . . . . .	125
6.14	Input-Output-Graph angepasst an die Planungen des Mehrzweckspeichers Kandadji ohne Wassernutzung durch landwirtschaftlichen Eigenbedarf . . . . .	126
6.15	Input-Output-Graph angepasst an die Planungen des Mehrzweckspeichers Kandadji mit landwirtschaftlichem Eigenbedarf jedoch ohne Textilindustrie . . . . .	127
6.16	Input-Output-Graph angepasst an die Planungen des Mehrzweckspeichers Kandadji ohne Zuckerrohranbau und Zuckerherstellung mit Faserpflanzen (Kenaf und Baumwolle (BW)) und Weiterverarbeitung . . . . .	128
6.17	Input-Output-Graph angepasst an die Planungen des Mehrzweckspeichers Kandadji mit Auftrennung der Ressourcen zur Mehrfachnutzung . . . . .	129
6.18	Formulierung des linearen Programmiermodells für die Anwendung des Simplex-Solvers QSOpt für das System Mehrzweckspeicher Kandadji . . . . .	135
6.19	Input-Output-Graph für ein Gezeitenkraftwerk am Severn Ästuar	140

# Tabellenverzeichnis

---

3.1	Beispiele für Fuzzy-Regeln für die Bachforelle (nach Jorde u. a. (2001)) . . . . .	19
4.1	Input-Output-Tabelle mit zwei Sektoren (Marx 2003; Leontief 1966) . . . . .	32
5.1	Beispiele für die Bestimmung von Transformationskoeffizienten	65
6.1	Betriebsdaten des Ausleitungskraftwerks Rosegg-St. Jakob . .	79
6.2	Adjazenzmatrix des Input-Output-Graph für das Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob . . . . .	81
6.3	Adjazenzmatrix des Input-Output-Graph für das Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob mit aufgeteilten physikalischen und ökologischen Ressourcen . . . . .	83
6.4	Transformationsmatrix für das Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob . . . . .	86
6.5	Evaluation von Nutzungsszenarien . . . . .	87
6.6	Daten und Komponenten des El Diluvio-Palmar Bewässerungssystem (Odebrecht 2016; Italiano 2010) . . . . .	89
6.7	Transformationskoeffizienten für den Bewässerungswasserbedarf . . . . .	95
6.8	Transformationskoeffizienten für den Arbeitskräftebedarf . . .	96
6.9	Ernteerträge und Nährstoffbedarf ausgewählter Pflanzen (Halliday und Trenkel 1992) . . . . .	97
6.10	Exportkoeffizienten für unterschiedliche landwirtschaftliche Produkte (Haygarth u. a. 2003), dimensionslos . . . . .	97
6.11	Einflussfaktor der Bewässerung auf den Exportkoeffizienten, dimensionslos . . . . .	98
6.12	Geländebedingte Einflussfaktoren auf den Exportkoeffizienten, dimensionslos . . . . .	98
6.13	Transformationskoeffizienten landwirtschaftliche Produktion → Nährstoffaustrag $[t/kg]$ . . . . .	99
6.14	Portionsgrößen für verschiedene Lebensmittel (Fisterra 2016)	100



## Tabellenverzeichnis

---

6.15 Benötigte jährliche Lebensmittelproduktion . . . . .	101
6.16 Evaluation von Nutzungsszenarien . . . . .	102
6.17 Pflanzenkoeffizienten . . . . .	115
6.18 Transformationen für das System Untere Argen . . . . .	116
6.19 Nutzungsszenarien für das System Untere Argen (während der Monate Juni/Juli im Beispieljahr 2003) . . . . .	117
6.20 Projektdaten der geplanten Mehrzweckspeicheranlage Kand- adji am Niger (HC/BK 2002) . . . . .	121
6.21 Quantifizierung des Teilgraphen Landwirtschaft . . . . .	131
6.22 Quantifizierung des Teilgraphen Industrie . . . . .	132
6.23 Evaluation von Nutzungsszenarien für den Mehrzweckspeicher Kandadji . . . . .	133
6.24 Transformationskoeffizienten für das Modell Gezeitensperre Severn Ästuar . . . . .	142
6.25 Machbarkeit unterschiedlicher Nutzungsszenarien am Severn Ästuar . . . . .	143

# 1 Einführung

## 1.1 Problemstellung

Die Bereitstellung von Frischwasser für die Bewässerung, Trink- und Brauchwasser sowie umweltfreundlich produzierter elektrischer Energie ist eine der wichtigsten Grundlagen für die Entwicklung einer Region oder eines Landes. Viele unterschiedliche Nutzungsansprüche auf begrenzte Ressourcen sind zu beachten und abzuwägen. Das US National Intelligence Council (2012) bezeichnet die vernetzten Versorgungsrisiken im Nexus „Wasser, Energie, Nahrung“ als weltweiten Trend. Dies ist gleichermaßen eine große Herausforderung für Politik und Ingenieure. Wasserkraft stellt eine saubere, CO<sub>2</sub>-neutrale, regenerative Energiequelle dar. Jedoch sind aufgrund der Veränderung des Abflussregimes und der Querverbauung der Gewässer große Auswirkungen auf die lokale Ökologie zu erwarten.

Diese Auswirkungen auf die lokale oder auch globale Flussökologie bedingen, dass bei der Planung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern auf ein komplexes System an Einflüssen eingegangen werden muss. Die Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Nutzungsarten einerseits und der Fluss- und Auenökologie andererseits müssen in ihrer Gesamtheit erfasst werden.

Aufgrund der langen Lebensdauer der Anlagen ist es notwendig, sehr eingehend die Auswirkungen eines Projekts in allen Bau und Betriebsphasen zu untersuchen, da es sich hierbei nicht um kurzfristige Eingriffe, von denen sich das natürliche Gewässer wieder erholen kann, handelt.

Mehrzweckspeicher können, je nach Art des Projekts, zur Bereitstellung von Bewässerungswasser, Trinkwasser, zum Hochwasserschutz, Niedrigwasseraufhöhung sowie zur Erzeugung von Strom aus Wasserkraft genutzt werden. Neben diesen klassischen Nutzungsarten kommt es meist auch noch zu positiven externen Effekten der Speicherseen. So können Speicherseen

## 1 Einführung

---

positive Effekte auf den Tourismus (Anselm 2004) und die Freizeitnutzung haben oder der lokalen Fischwirtschaft zu Gute kommen (MRAG.Ltd 1995). Auch Laufwasserkraftwerke können sowohl positive als auch negative externe Effekte hervorrufen (Kohler 2006).

Ein Wassermangel kann zu Nutzungskonflikten zwischen den Verbrauchern führen. Wenn beispielsweise der Wasserbedarf von Industrie und Haushalt in Konkurrenz zur Landwirtschaft steht, müssen Lösungen gefunden werden, die Umwelt und das Ökosystem nachhaltig und genügend schützen. In vielen Gebieten ist es möglich und nötig, auf verschiedene Wasserressourcen zurückzugreifen, also beispielsweise Brunnen und Quellen in Kombination mit Flusswasser bzw. Talsperrenwasser für die verschiedenen Verbraucher zur Verfügung zu stellen. Da es sich insbesondere bei Mehrzwecknutzung aber auch schon bei der Abwägung ökologischer und ökonomischer Faktoren für eine Wasserkraftanlage um ein komplexes System handelt, ist es nötig Modelle zu entwickeln, die dabei helfen, Wirkungszusammenhänge zu verstehen. Schon seit den 1960er Jahren ist die Betrachtung von Umweltauswirkungen großer Infrastrukturprojekte wesentlicher Bestandteil der Planung. Die erste Normierung einer Umweltverträglichkeitsprüfung wurde 1969 in den USA mit dem National Environmental Policy Act (NEPA, oder U.S.Code, Titel 42, 4331 ff.) vorgenommen (NEPA 2016). Das dort etablierte Environmental Impact Statement (EIS) muss verfahrensbegleitend für alle größeren Maßnahmen von Bundesbehörden ausgearbeitet und bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden.

Zum Genehmigungsprozess von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern gehört heute in den meisten Ländern eine solche Umweltverträglichkeitsprüfung. Weiterhin ist bei Projekten im europäischen Raum die Europäische Wasserrahmenrichtlinie zu beachten (EU 2000). Die europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) wurde im Jahr 2000 beschlossen und zeigt sehr klar, dass neben einer Berücksichtigung ökologischer Aspekte auch die Ökonomie in die Wasserwirtschaft und im Planungs-, Management- und Entscheidungsfindungsprozess integriert werden soll.

Die europäische Wasserrahmenrichtlinie fordert die Anwendung und Berücksichtigung von wirtschaftlichen Grundsätzen (z. B. Verursacherprinzip), ökonomischen Verfahren und Werkzeugen (z.B. Wirtschaftsanalyse der Wassernutzungen, Kostenwirksamkeitsanalyse), sowie ökonomischen Instrumenten (z.B. Wasserpreisgestaltung) zur Erreichung der Umweltziele – den guten Wasserzustand für alle Gewässer – in der kostenwirksamsten Art und Weise (EU 2000).

Auch in anderen Ländern sind entsprechende Richtlinien schon implementiert oder ist es sinnvoll, analog zu den Festlegungen der WRR bei der wasserwirtschaftlichen Projektplanung entsprechende Untersuchungen durchzuführen. Hierfür ist es notwendig, integrierte Werkzeuge zu entwickeln, die die ökologischen und ökonomischen Anforderungen berücksichtigen können.

Ebenso ist es bei Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern, wie bei allen großen Infrastrukturmaßnahmen wichtig, dass Entscheidungsträger die Möglichkeit bekommen, übersichtlich Einblicke in die Wirkungszusammenhänge zu gewinnen und Projektvarianten zu vergleichen. Dies ist insbesondere auch dann relevant, wenn verschiedene Interessengruppen oder Projektpartner eine Einigung über die Weiterverfolgung bestimmter Projektvarianten erzielen sollen.

Dies macht es notwendig, dass die verwendeten Werkzeuge so vollständig wie möglich die Auswirkungen des Projekts aufzeigen, gleichzeitig aber klar verständlich Zusammenhänge darstellen.

## **1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit**

Ausgehend von der vorgestellten Problematik soll in der vorliegenden Forschungsarbeit eine ganzheitliche qualitative und quantitative Bewertung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern sowohl für die Planung als auch für den Betrieb vorgestellt werden. Hierzu soll ein Bilanzierungsmodell entwickelt werden, das auf Grundlage Leontief'scher Input-Output-Analyse als Entscheidungsunterstützung für Projektentscheidungen beim Neubau und der Erneuerung von Anlagen dienen kann.

Die unterschiedlichen Auswirkungen von Wasserkraft- und Mehrzweckspeicherprojekten müssen im Detail aber auch in ihrer Gesamtheit und Wechselwirkung erfasst werden. Durch eine vernetzte Formulierung ökonomischer und ökologischer Fragestellungen soll eine quantitative Bewertung der gegenseitigen Beeinflussung ermittelt werden.

Anhand von Fallstudien wird die Anwendbarkeit des zuvor entwickelten Modells auf verschiedene Anlagentypen und -größen nachgewiesen. Das in dieser Arbeit konzipierte Input-Output-Modell soll als Werkzeug für die

## 1 Einführung

---

Planung und Bewertung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern in unterschiedlichen Planungs- und Betriebsphasen dienen sowie eine Grundlage für eine Optimierung von Anlagen und Betrieb bilden.

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt aufgebaut:

- Zunächst werden in Kapitel 2 verschiedene Typen von Wasserkraftanlagen sowie unterschiedliche Nutzungsarten von Mehrzweckspeichern allgemein beschrieben.
- In Kapitel 3 werden unterschiedliche Methoden zur Bewertung verschiedener Aspekte von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern vorgestellt, wie sie nach dem aktuellen Stand der Technik in der Praxis verwendet werden.
- Kapitel 4 geht auf die makroökonomische Methode der Input-Output-Analyse ein und beschreibt verschiedene Anwendungsbereiche, die auch über eine reine wirtschaftliche Betrachtungsweise hinausgehen.
- In Kapitel 5 werden die in Kapitel 3 beschriebenen Bewertungsmethoden und -modelle mit dem Input-Output-Analyse-Ansatz aus Kapitel 4 zu einem Vernetzungsmodell für wasserwirtschaftliche Fragestellungen verbunden.
- Darauffolgend wird in Kapitel 6 in verschiedenen Fallstudien für unterschiedliche Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicherarten die Anwendbarkeit der in Kapitel 5 entwickelten Methodik untersucht.
- In Kapitel 7 werden die angewandte Methodik und die Ergebnisse der Fallstudien diskutiert.
- Kapitel 8 fasst die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammen und zeigt einen Ausblick auf mögliche weitere Forschungsarbeiten auf.

## **2 Mehrzweckspeicher und Wasserkraftanlagen**

In diesem Kapitel wird die Bedeutung verschiedener Wasserkrafttypen und unterschiedlicher Arten der Nutzung von Mehrzweckspeichern dargestellt sowie auf externe Effekte der unterschiedlichen Nutzungsarten eingegangen.

### **2.1 Arten der Mehrzwecknutzung von Speicherseen**

Um ein saisonal schwankendes Wasserdargebot oder tägliche sowie jahreszeitliche Schwankungen des Wasserbedarfs auszugleichen, werden Speicherseen angelegt. Das in Speicherseen aufgestaute Wasser wird für unterschiedliche Zwecke bereitgestellt. Diese Nutzungsarten könnten teilweise kombiniert werden. Hierbei ist zu unterscheiden, ob das Wasser auf verschiedene Verbraucher verteilt wird oder ob eine Mehrfachnutzung möglich ist, beispielsweise wenn Trink-, Bewässerungs- oder Brauchwasser turbinieren wird, bevor es für die jeweilige Nutzung entnommen wird. Dies ist jedoch nur in begrenztem Umfang möglich, da auch bei nicht energetischer Nutzung des Wassers die Energiehöhe des Speichers dazu beitragen sollte, das Wasser zum Verbraucher zu verteilen. Bei günstigen geographischen Gegebenheiten ist dies eine gute Möglichkeit, den Speicher optimal zu bewirtschaften. Um eine möglichst günstige Verteilung der Wasserressourcen auf die unterschiedlichen Nutzungsarten zu finden, ist es nötig, geeignete Werkzeuge zur Modellierung zu entwickeln. Ein Ansatz hierfür wird in der vorliegenden Arbeit dargestellt.

Einige kombinierte Nutzungsarten sind nicht nur für Speicherseen sondern auch direkt für einen Fluss möglich. Jedoch ist hierbei zu beachten, dass

die betrachtete Periode sehr viel kürzer ist, als beispielsweise bei einem saisonalen Speicher.

### **2.1.1 Wasserkraft**

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, dienen viele Speicher der Bereitstellung von Wasserkraft. Bei der Nutzung von Speicherseen kann im Gegensatz zur Laufwasserkraft immer dann Wasser turbinert werden, wenn hohe Energieanforderungen an das elektrische Netz gestellt werden. Ein Vorteil von Wasserkraftnutzung gegenüber anderen Kraftwerken ist hierbei, dass durch die geringen An- und Abfahrzeiten sehr schnell auf Bedarfsschwankungen eingegangen werden kann. Einen Spezialfall von Speicherkraftwerken stellen die Pumpspeicherwerke dar, bei denen Wasser in den oberen Speicher gepumpt wird, wenn ein Überangebot an elektrischer Energie vorhanden ist, und Wasser turbinert wird, wenn Energiebedarf im Netz vorhanden ist. Dadurch ist es möglich, Bedarfsschwankungen auszugleichen und die elektrische Energie der Grundlastkraftwerke (konventionelle thermische Kraftwerke, Atomkraftwerke, Laufwasserkraft) aber auch unregelmäßig anfallende regenerative Energie (Windkraft, Solarenergie) zu speichern und im Bedarfsfall abzugeben.

### **Typen von Wasserkraftanlagen**

Wasserkraftanlagen werden entsprechend ihrer Größe und nach der Betriebsart unterschieden (Giesecke u. a. 2014): Großwasserkraftanlagen sind Wasserkraftanlagen ab einer Leistung von 10 MW. Kleinwasserkraft sind Anlagen unter 1 MW (in manchen Ländern auch unter 0,5 MW oder 10 MW). Darunter gibt es noch Pico-Hydro-Anlagen unter 5kW, die beispielsweise in sehr entlegenen Gegenden zur Versorgung einzelner Haushalte mit elektrischer Energie verwendet werden. Nach Betriebsart kann man zwischen Speicher-, Pumpspeicher- und Laufwasserkraftwerken unterscheiden. Bei den Speicherkraftwerken ist ein saisonaler Ausgleich des Wasserdargebots möglich. Einen Sonderfall der Wasserkraft stellt die Nutzung von Meeresenergie dar, wobei hier Gezeitenenergiekraftwerke aufgrund der Betriebsweise sehr nahe an eine Laufwasserkraftanlage oder ein Speicherkraftwerk kommen.

### **2.1.2 Bereitstellung von Trink- und Brauchwasser**

Trinkwasser und Brauchwasser wird sowohl aus Brunnen als auch aus Gewässern entnommen. Je nach den regionalen Gegebenheiten können unterschiedliche Arten der Wassergewinnung eingesetzt werden. Bei der Wasserversorgung aus Gewässern sind Schwankungen des Wasserdargebots zu beachten. Um die Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser und die Versorgung der lokalen Industrie mit Brauchwasser zu gewährleisten, werden Speicherseen angelegt, aus denen dann unabhängig von saisonalen Schwankungen des Abflusses der Gewässer genügend Wasser entnommen werden kann. Neben der Nutzung von Brunnen bietet der Aufstau von Gewässern die Möglichkeit, größere Mengen Trink- und Brauchwasser zu gewinnen. Der Aufstau kann dazu beitragen, die zeitliche Verschiebung von Wasserdargebot aufgrund von Niederschlägen in der feuchten Jahreszeit und Wasserbedarf über das ganze Jahr verteilt, aber insbesondere in heißen trockenen Monaten auszugleichen. Ein spezielles Einsatzgebiet von Brauchwasser ist die Nutzung als Kühlwasser für thermische Kraftwerke, bei der der größte Anteil des ausgeleiteten Wassers wieder dem Gewässer zugeführt wird, allerdings mit einer höheren Wassertemperatur. Dies kann Auswirkungen auf die lokale Fischökologie haben.

### **2.1.3 Bereitstellung von Bewässerungswasser**

In ariden Gebieten macht Bewässerung eine landwirtschaftliche Nutzung von Flächen überhaupt erst möglich. In semiariden und gemäßigten Zonen kann Bewässerung dazu beitragen, die Ernteerträge zu steigern oder den Anbau hochwertigerer Produkte zu ermöglichen. Durch Speicherseen lässt sich Wasser in den regenreicheren Monaten aufstauen, um es dann in der trockenen heißen Jahreszeit, die häufig mit der Vegetationsperiode übereinstimmt, zur Steigerung der Erträge einzusetzen.

Ein Spezialfall der Bewässerung ist die sogenannte Fertigation, bei der dem Bewässerungswasser die von den Pflanzen benötigten Nährstoffe direkt beigemischt werden (Hassan u. a. December, 2010; Bozkurt u. a. 2009; Doltra und Munoz 2009). Fertigation ist eine besonders sparsame Methode der Düngung, da auch kleine Düngemittelmengen den Pflanzen direkt zugeführt werden können.



### **Bewässerungsmethoden**

**Oberflächenbewässerung** Die älteste Methode der Bewässerung ist eine direkte Oberflächenbewässerung, bei der aus Bewässerungskanälen die Felder überflutet werden. Diese Methode hat einen relativ geringen Wirkungsgrad, ist jedoch ohne große Investitionskosten möglich. Weiterhin ist die Oberflächenbewässerung mit einem geringen Technisierungsgrad auch mit wenig ausgebildeten Arbeitskräften möglich.

**Beregnung** Bei der Bewässerung mit Sprinklern wird das Wasser unter Druck über fest installierte oder mobile Anlagen auf den Feldern verteilt. Hierbei wird ein künstlicher Regen erzeugt. Durch die Betriebsweise, bei der das Wasser über Sprinkler fein verteilt wird, kommt es zu relativ großen Verdunstungsverlusten. Weiterhin kann dadurch, dass das Wasser nicht direkt an die jeweilige Pflanze gebracht wird, ein Verlust durch Versickerung bzw. Verdunstung aus dem Boden erfolgen, was wiederum zu Rückständen von Mineralien und somit zu einer Versalzung der Böden führen kann. Bei der Beregnung werden je nach Pflanzenart und Bewässerungswasserbedarf unterschiedliche Methoden mit feststehenden oder beweglichen Sprinklern eingesetzt. Weiterhin werden unterschiedliche Drücke verwendet.

**Tropfbewässerung** Bei der Tropfbewässerung wird das Bewässerungswasser möglichst nahe an die jeweilige Pflanzenwurzeln gebracht, um unnötige Wasserverluste und Verdunstung oder Oberflächenabfluss zu vermeiden. Es gibt verschiedene Arten, die Tropfer anzuordnen. Für Anbauprodukte wie Tomaten etc. werden die Tropfer in Reihen angeordnet, entweder jeweils in der Furche zwischen den Pflanzenreihen bei einer dichten Bepflanzung oder beidseitig zur Pflanzenreihe, bei Bäumen und anderen größeren Pflanzen jeweils in Wurzelnähe der einzelnen Pflanze.

### **2.1.4 Hochwasserschutz**

Durch den Klimawandel wird es nach aktuellen Prognosen (Hennegriff u. a. 2008; IPCC 2001, 2007) auch in gemäßigten Breiten zu extremeren Klimaereignissen kommen. Die Sommer werden häufiger heiß und trocken

## 2.1 Arten der Mehrzwecknutzung von Speicherseen

---

sein, was einen jahreszeitlichen Ausgleich von Wasserdargebot und Wasserverbrauch nötig macht. Es wird jedoch auch größere Starkniederschläge geben, daher ist der Hochwasserschutz ein wichtiger Vorteil von Speicherseen (IPCC 2012; Hennegriff u. a. 2006). Bei geeignetem Betrieb können Speicherseen hauptsächlich oder im Rahmen eines Mehrzwecknutzens dem Hochwasserschutz dienen (ICID 1999). Durch eine Absenkung des Stauspiegels vor der Regenperiode oder kurzfristiges Absenken des Wasserspiegels vor Eintreffen einer Hochwasserwelle kann ein Hochwasser entweder abgemildert oder das gesamte überschüssige Wasser gespeichert werden. Es kann dann entweder in Niedrigwasserperioden abgegeben oder für die Wasserkraft, Trinkwasser oder Bewässerung genutzt werden. Einige große Staudammprojekte, wie beispielsweise das Dreischluchtenprojekt in China, dienen in erster Priorität dem Hochwasserschutz (Hayashi u. a. 2008), die weiteren Nutzen sind, obwohl wirtschaftlich bedeutend, zunächst zweitrangig. Bei der Bestimmung geeigneter Betriebsmodi ist der Hochwasserschutz mit den anderen wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten abzuwägen. Durch die vorhergehende Teil-Entleerung der Speicher bei Speicherkraftwerken oder die Absenkung des Staus bei Flusskraftwerken geht ein gewisser Teil der sonst nutzbaren Energie oder des Wassers verloren.

### 2.1.5 Niedrigwasser-Aufhöhung

Durch den Aufstau und den Ausgleich saisonaler Schwankungen können Stauseen auch der Aufhöhung von Niedrigwasser dienen. Wenn beispielsweise durch den Klimawandel oder Entnahmen unterhalb des Stausees saisonal sehr niedrige Abflüsse zu erwarten sind, kann durch geeigneten Betrieb einer Stauanlage das Niedrigwasser auf ein für die lokale Ökologie erforderliches Maß erhöht werden. Ebenso kann durch diese Niedrigwasseraufhöhung in einigen Gebieten die Schiffbarkeit eines Flusses oder Kanals unterhalb des Aufstaus auch in sehr trockenen Zeiten erhalten bleiben oder auch Entnahmen unterhalb des Staus für andere Wassernutzungsarten ermöglichen (SOFRELEC 1980; Richter und Thomas 2007). Eine Niedrigwasser-Aufhöhung kann in ariden Gebieten auch aus sanitären Gründen notwendig sein. Auf diese Weise ist, vor allem in Entwicklungsländern, in denen teilweise eine durchgehende Behandlung von Abwässern noch immer nicht gegeben ist, zumindest eine gute Vermischung mit Frischwasser mit einer damit verbundenen Konzentrationsverdünnung gegeben. So ist eine natürlichen Klärwirkung durch das Gewässer überhaupt erst möglich,

weil die Schmutzlast je Volumeneinheit Flusswasser gering genug ist, um ein „Umkippen“ des Gewässers zu verhindern.

### **2.2 Aspekte der wirtschaftlichen Bewertung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern**

Für die oben beschriebenen Nutzungsarten sollten in der Planungsphase sowie für den Betrieb der Anlage detaillierte wirtschaftliche Betrachtungen durchgeführt werden. Diese können dazu dienen, eine möglichst optimale Ressourcenauslastung durch die verschiedenen Nutzungsarten zu bestimmen. Trotz ihres wichtigen Einflusses auf die regionale und überregionale Wirtschaft beschäftigen sich nur wenige ökonomische Abhandlungen mit den wirtschaftlichen Aspekten von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern (Forsund 2007).

Wichtig für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer Wasserkraftanlage oder eines Mehrzweckspeichers ist es, unterschiedliche Systemgrenzen für die verschiedenen Effekte zu definieren und die wirtschaftlichen Ergebnisse der Anlage als solche zu betrachten sowie deren Auswirkungen auf die regionale oder nationale Ökonomie.

Neben den dem Projekt zugeordneten Effekten einer Wasserkraftanlage oder eines Speichersees sollten auch nicht direkt in der Projektplanung einbezogene Effekte, sogenannte externe Effekte, in einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtungsweise verwendet werden (Kohler 2006). Nur eine solche gesamtwirtschaftliche Betrachtungsweise und eine sorgfältige Auswahl der Systemgrenzen kann zu einer sinnvollen Bewertung eines geplanten Wasserkraft- oder Mehrzweckspeicherprojekts führen oder einen optimalen Betrieb bestehender Anlagen unterstützen.

Eine Betrachtung von externen Effekten wird in den nächsten Abschnitten ausführlicher illustriert.

### **2.2.1 Positive externe Effekte von Wasserkraftanlagen und Speicherseen**

Welche Effekte als externe Effekte angesehen und welche Auswirkungen der Speicheranlage als interne Effekte einkalkuliert werden, hängt natürlich von der Betrachtungsweise und den Projektzielen ab. Zu den rein wasserwirtschaftlichen Aspekten von Speicherseen kommen auch positive externe Effekte. Beispielsweise können Fische im Speichersee von der lokalen Fischwirtschaft als weitere Erwerbsquelle genutzt werden. Eine touristische oder Freizeitnutzung der Speicherseen kann weiterhin zu einer Belebung der örtlichen Wirtschaft führen (Anselm 2004). Ist beispielsweise eine Anlage zur Gewinnung von Wasserkraft eingerichtet, so kann ein saisonaler Ausgleich der Wassermenge, die ans Unterwasser abgegeben wird, entweder intern in die Betrachtung eingehen oder aber als externer Effekt angesehen werden. Auch die unterschiedlichen Nutzungsarten der Ressource Wasser können weitere externe Effekte haben. Beispielsweise kann die Errichtung von Bewässerungsanlagen zu einer allgemeinen Erhöhung der Wasserverfügbarkeit führen und ein kleiner Teil des Wassers dann auch anderweitig verbraucht werden oder es kann zu einer Verbesserung der Grundwassersituation durch die Stauhaltung und Bewässerung kommen.

#### **Fischereiwirtschaft**

Während bei der Laufwasserkraft und den meisten europäischen Speicherseen die Fischerei bzw. die Fischwirtschaft eher von einem ökologischen Standpunkt aus betrachtet wird und der Einfluss der jeweiligen Staustufe oder des Speichersees mehr als negativer Effekt auf die natürliche Flussökologie bewertet wird, ist in einigen afrikanischen und asiatischen Speicherseen die Fischwirtschaft ein zentraler positiver Effekt (MRAG.Ltd 1995; ICOLD 1981). Die zu erwartende Biomasseproduktion eines Reservoirs kann somit auch in die Bewertung des Gesamtnutzens eines Mehrzweckspeichers integriert werden.

### **Aquakultur**

Neben der reinen Befischung von Stauseen können diese auch zur Fischzucht oder auch Aufzucht anderer Wasserorganismen verwendet werden (ICOLD 1981). Hierbei sollte die Wechselwirkung auf die Wassergüte im Reservoir beachtet werden. Die gewonnene Biomasse sollte in die ökologische und wirtschaftliche Betrachtung einer Mehrzweckspeicheranlage integriert werden. Ob es sich hierbei um einen „externen“ Effekt oder einen Teil des Projekts handelt, d. h., wie die Systemgrenzen gezogen werden hängt von der Projektplanung ab.

### **Freizeitnutzung**

Nach Anselm (2004) haben „Talsperren mit ihren großen Wasserflächen eine attraktive Landschaftscharakteristik, die von den Menschen gern zum Naturerleben genutzt wird“. Eine Freizeitnutzung der Talsperren ist deshalb meist ein positiver externer Effekt, der jedoch nicht immer mit einer ungestörten Betriebsweise in Einklang gebracht werden kann. Anselm (2004) beschreibt, wie solche Nutzungskonflikte entstehen können und welche Möglichkeiten des Ausgleichs es gibt.

### **2.2.2 Negative externe Effekte von Wasserkraftanlagen und Speicherseen**

Durch den Aufstau kommt es neben vielen positiven internen und externen Effekten auch zu negativen externen Effekten. Negative externe Effekte sind Auswirkungen der Speicheranlage auf ihre Umgebung, die nicht gewollt sind, die sich aber meist auch nicht vermeiden lassen. Zu den negativen externen Effekten gehören negative Umwelteinwirkungen aufgrund eines niedrigeren Durchflusses unterhalb des Speichers, insbesondere wenn Wasser aus dem Stausee für die Bewässerung oder Trinkwasser genutzt wird, ausbleibende saisonale Überschwemmungen, die in manchen Gegenden von der Landwirtschaft genutzt werden könnten, sowie in manchen Gebieten wasserbedingte Krankheiten, die durch Krankheitserreger, die auf stehende Gewässer angewiesen sind, ausgelöst werden. Die Umwandlung eines Fließgewässers in ein Stillgewässer-Ökosystem wird zumeist als

## 2.3 Phasen der Planung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern

---

eher negativer externer Effekt angesehen. Weiterhin sind negative Auswirkungen auf ökologische und sozioökonomische Faktoren unterhalb des Staudammes möglich (Richter u. a. 2010).

Bei Ausleitungskraftwerken ist als externer Effekt der geringere Durchfluss in der Restwasserstrecke und die daraus resultierenden Folgen zu betrachten.

Durch Strukturen wie Dämme, Wehre etc. wird die Durchgängigkeit der Gewässer für Wasserorganismen verschlechtert oder unterbrochen (Haws 1985).

Sowohl bei Speicherseen als auch bei Ausleitungsstrecken ist ein sehr häufig zu betrachtender externer Effekt, dass sich das Temperaturregime des Gewässers ändert. Insbesondere in den Sommermonaten kann ein geringerer Abfluss in der Restwasserstrecke zu ökologisch kritischen Temperaturen führen. Wird bei einem Mehrzweckspeicher Wasser als Trinkwasser oder Bewässerungswasser entnommen, kommt es zu ähnlichen Effekten im Unterwasser. Anders verhält es sich bei Speicherseen für die Wasserkraft, bei denen teilweise sehr geringe Wassertemperaturen im Auslauf zu beobachten sind, da durch die Schichtung im Stausee kaltes Tiefenwasser durch die Turbinen ins Unterwasser gelangt.

## **2.3 Phasen der Planung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern**

Für die Betrachtung und Bewertung von wasserwirtschaftlichen Projekten ist es meist sinnvoll, jeweils unterschiedliche Projektphasen zunächst getrennt zu betrachten. Auf Grundlage dieser Bewertungen sollte auch eine Betrachtung über den gesamten Planungs- Bau- und Lebenszeitraum angestellt werden.

Im Folgenden sollen die einzelnen Phasen der Planung und des Betriebs von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern beschrieben werden. Hierbei wird insbesondere auf die benötigten Modelle eingegangen.

## 2 Mehrzweckspeicher und Wasserkraftanlagen

---

Giesecke u. a. (2014) beschreiben die Projektplanungs- und Bauphasen wie folgt:

- Potentialstudie „Masterplan“
- Projektvorstudie „Machbarkeitsvorstudie“
- Projektstudie „Machbarkeitsstudie“
- Genehmigungsverfahren
- Ausschreibung und Vergabe
- Detailplanung - Ausführungsprojekt - Inbetriebsetzung - Abschlussarbeiten.

Über die gesamte Lebensdauer einer wasserwirtschaftlichen Maßnahme folgen dann noch die Projektphasen:

- Betrieb
- evtl. Renovierungsarbeiten bzw. Neukonzession
- Rückbau, Neubau.

Für alle Phasen des Lebenszykluses einer wasserwirtschaftlichen Maßnahme ist es nötig, Untersuchungen und Modelle zu verwenden, die einerseits detailliert genug sind, um den gewünschten Informationsgehalt zu umfassen, andererseits aber nicht unnötige Kosten für die Datenbeschaffung oder die Modellierung selber verursachen. Insbesondere für frühe Projektphasen ist es wichtig, Modelle zu benutzen, die nicht zu hohe Anforderungen an die Eingangsdaten stellen, jedoch die Basis für eine Verfeinerung in späteren Planungs- und Projektphasen bilden. Ebenso ist es von Bedeutung, schon früh einen Überblick über das Ausmaß und den Einfluss des Gesamtprojekts gewinnen zu können.

# **3 Bisherige Ansätze zur Modellierung und Bewertung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern**

In diesem Kapitel werden Modelle, wie sie zur Planung und zum Management von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern bisher genutzt werden, beschrieben. Um einige dieser Modelle später im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit in einer integrierten Modellierung und vernetzten Betrachtungsweise zu verwenden, wurden diese Bewertungsmethoden leicht modifiziert oder weiterentwickelt, damit sie für den Einsatz im Gesamtsystem passen.

## **3.1 Vorüberlegungen zu Modellen und Bewertungsverfahren für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher**

Für die Planung und den Betrieb von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern werden schon seit längerer Zeit Modelle oder formalisierte Bewertungsverfahren verwendet. Diese Modelle decken zumeist einen oder wenige Einzelaspekte sehr genau ab. Einige Bewertungsverfahren, wie beispielsweise die ICOLD Matrix (ICOLD 1982), zeigen qualitative Auswirkungen von Wasserkraft und Mehrzweckspeicherprojekten während andere Modelle Teilaspekte, wie beispielsweise die Ökologie oder die Energieproduktion quantitativ abbilden (Jorde 1997; Giesecke u. a. 2014). Die Auswahl der jeweiligen Modelle und Modellkombinationen muss genau auf die Fra-



gestellung und die jeweilige Datenlage abgestimmt werden. Für frühe Projektphasen und Vorstudien eignen sich oftmals zunächst qualitative Modelle.

## **3.2 Qualitative Gesamtprojekt-Bewertungen**

### **3.2.1 ICOLD-Matrix**

Die ICOLD-Matrix wurde von der Arbeitsgruppe Staudämme und Umwelt der ICOLD (International Commission on Large Dams) entwickelt, um Umweltauswirkungen sowie sozio-ökonomische Auswirkungen von Staudammprojekten darzustellen (ICOLD 1982). Bei der ICOLD-Matrix handelt es sich um ein System qualitativer Indikatoren, das auch Wirkungspfade liefern kann. Hierbei werden die einzelnen Teilbereiche eines Damms in einer Matrix verschiedenen Umweltkompartimenten und sozio-ökonomischen Auswirkungen gegenübergestellt. Die Einstufung der jeweiligen Auswirkung geschieht in Bewertungsstufen und als „positive“ oder „negative“ Auswirkung. Genaue Wirkungsweisen werden nicht betrachtet, ebensowenig veränderbare Größen wie beispielsweise eine genaue Wasserentnahmemenge oder der genaue Wert der Energieerzeugung. Aufgrund der fast ausschließlich qualitativen Beschreibung von Umweltauswirkungen kann die ICOLD-Matrix helfen, Wirkungspfade aufzuzeigen und Projektauswirkungen darzustellen. Sie sollte möglichst nur als Vorarbeit für später angewandte quantitative Modelle eingesetzt werden.

### **3.2.2 ICID-Checkliste**

Bei der ICID-Checkliste (Dougherty und Hall 1995) handelt es sich wie bei der ICOLD-Matrix um eine vorwiegend qualitative Bewertungsmethode, bei der Auswirkungen eines Projektes eingeschätzt werden können. Es wird hier in groben Klassen eingeteilt, wonach ein positiver, negativer oder kein Einfluss auf ein Schutzgut vorhanden ist. Dies genügt, um einen Überblick zu gewinnen, welche Schutzgüter genauer untersucht werden sollen und kann daher als Grundlage einer weiteren Untersuchung dienen. Hingegen

eignet sich diese Methode weniger, um unterschiedliche Projektvarianten zu vergleichen, da diese oftmals Einflüsse auf dieselben Kompartimente jedoch in unterschiedlicher Ausprägung haben.

### **3.3 Hydro-ökologische Modelle**

Zur Bestimmung ökologischer Auswirkungen von Wasserkraftanlagen, sonstiger Wasserentnahmen sowie zur Festlegung von Mindestwasserabflüssen werden von einer Anlage beeinflusste Flussstrecken mit hydro-ökologischen Modellen untersucht und bewertet (LFU 2005). Dies bietet die Möglichkeit, den Einfluss unterschiedlicher Abfluss-Szenarien auf das Habitatangebot verschiedener Organismen zu untersuchen. Durch den Bezug von Habitatbedingungen auf Abfluss-Szenarien kann eine quantitative Bewertung verschiedener Nutzungsansprüche vorgenommen werden. Als Zeigerorganismen für die ökologische Qualität von Fließgewässern werden häufig Makrozoobenthos oder auch Fische angesehen.

#### **3.3.1 Beispiele für hydro-ökologische Modelle**

Für die Modellierung von Habitatansprüchen und die Kombination verschiedener Größen werden unterschiedliche Strategien angewendet.

Entweder werden die Habitatansprüche der verschiedenen Organismen in hydro-ökologischen Modellen als Präferenzkurven wie beispielsweise bei PHABSIM (Stalnaker u. a. 1995) oder wie beispielsweise in CASiMiR als Expertenwissen durch Fuzzy-Regeln abgebildet (Schneider u. a. 2001). Ansprüche unterschiedlicher Organismen können entweder durch jeweils eine einzelne physikalische Größe dargestellt werden, sowie eine multivariate Kombination unterschiedlicher Ansprüche. In der Natur hängen die Habitatbedingungen häufig von einer Kombination von Gegebenheiten ab, wodurch Modelle, die unterschiedliche Ansprüche auf geeignete Weise kombinieren, zu einer besseren Abbildung tatsächlicher Gegebenheiten führen.

### 3 Bisherige Ansätze zur Modellierung und Bewertung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern

---

**PHABSIM** Das ökohydraulische Modell PHABSIM ist Teil des konzeptionellen und analytischen Framework „Instream Flow Incremental Methodology (IFIM)“ (Stalnaker u. a. 1995), das dem Wasserressourcenmanagement für Flüsse dient. Wie auch andere ökohydraulische Modelle ist es dazu konzipiert, in andere Modellsysteme eingebunden zu werden. PHABSIM beschreibt die Veränderung physikalischer Mikrohabitat-Bedingungen. Aufgrund Habitateignungskriterien (habitat suitability criteria, HSC) wird die jeweilige Eignung des physikalischen Habitats für eine bestimmte Spezies und ein Entwicklungsstadium bestimmt.

**CASiMiR** CASiMiR (Schneider u. a. 2002; Jorde 1997) ist ein physikalisches Habitatsimulationsmodell für Fische, das am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart entwickelt wurde. Zur Simulation von Habitateignungen verwendet CASiMiR einen ökohydraulischen Ansatz, in dem die Ansprüche von Gewässerorganismen mit den vorherrschenden Umgebungsbedingungen verknüpft werden. Diese Verknüpfung ist in CASiMiR über einen multivariaten fuzzy-logischen Ansatz realisiert. Die Schnittstelle zur Biologie sind Expertenregeln, die einerseits das Zusammenwirken von Habitatparametern, andererseits die Unschärfe der Kenntnisse über Fischhabitatsansprüche durch sprachliche Umschreibungen beinhalten. Die Möglichkeit, qualitatives Wissen somit numerisch verarbeiten zu können, entspricht der Beschreibung von ökologischen Zusammenhängen, die nur selten durch exakt definierte Funktionen abgebildet werden können. Das Ergebnis der Modellierung ist eine Vorhersage der Habitateignung mit einem Wert zwischen 0 (ungeeignet) und 1 (optimal geeignet). Diese variiert in Abhängigkeit vom Abfluss, aber auch je nach Veränderung der Eingangsparameter. Daher können Maßnahmen am und im Gewässer vor ihrer tatsächlichen Ausführung in ihrer Wirkung auf die Lebensräume simuliert werden (Schneider 2001; Jorde u. a. 1999). In Tabelle 3.1 wird ein Beispiel für Fuzzy-Regeln für die Bachforelle vorgestellt.

Durch den Bezug des Habitatangebots auf den Abfluss wird eine quantitative Basis geschaffen, die es erlaubt, ökologische Bewertungen den Nutzungsansprüchen gegenüberzustellen (Schneider u. a. 2001; Giesecke und Jorde 1998).

**Tabelle 3.1:** Beispiele für Fuzzy-Regeln für die Bachforelle (nach Jorde u. a. (2001))

WENN Geschwindigkeit	UND Wassertiefe	UND Substrat	DANN Habitateignung
Mittel	Tief	Groß	Niedrig
Mittel	Tief	Groß	Hoch
Mittel	Tief	Groß	Hoch
Mittel	Tief	Groß	Hoch
Mittel	Tief	Mittel	Niedrig
Mittel	Tief	Mittel	Hoch

### 3.4 Energiewirtschaftliche Modelle

Als Teilaspekt der Bewertung von Wasserressourcen sowie auch zum Vergleich mit anderen Möglichkeiten der Stromerzeugung, sollte eine energiewirtschaftliche Bewertung im Zusammenhang mit Strompreisen erfolgen.

Um vom zur Energieerzeugung zur Verfügung stehenden Durchfluss auf die mögliche Stromproduktion zu schließen, ist es nötig, die verschiedenen Wirkungsgradanteile der Anlage genauer zu untersuchen. Dies ist insbesondere deshalb erforderlich, weil man nicht immer die Anlage mit dem Bemessungsdurchfluss betreiben kann und daher die Wirkungsgrade durchflussabhängig sind. Soll aufgrund ökologischer Anforderungen oder auch anderer konkurrierender Nutzer bei einer bestehenden Anlage der Durchfluss geändert werden, muss daher die mögliche Energieproduktion erneut berechnet werden.

Eine Modellierung der Energieerzeugung einer Wasserkraftanlage, beispielsweise mit dem Modul WASKRA aus CASiMiR erlaubt es, eine Abschätzung der zu erwartenden Energieproduktion für Abfluss-Szenarien zu erhalten (Giesecke u. a. 2014).

Forsund (2007) beschreibt ein Verfahren, wie Wasserkraft modelliert und bewertet werden kann. Hierbei wird auf verschiedene wirtschaftswissenschaftliche Methoden der nachfragebestimmten Modellierung zurückgegriffen.

Olsson und Söder (2003) erläutern die energiewirtschaftliche Preisgenerierung für die Wasserkraft. Hierbei wird versucht, ein Optimum zwischen der Energieproduktion, dem Preis auf dem Regulierungsmarkt, dem Marktpreis

und dem Wert des gesparten Wassers herzustellen. Diese Zusammenhänge sind teilweise nichtlinear. Sollen die Ergebnisse für ein lineares Modell weiterverwendet werden, so ist eine stückweise Linearisierung nötig.

## **3.5 Wirtschaftliche Bewertung von Wasserressourcen**

### **3.5.1 Bestimmung von Wasserpreisen und Opportunitätskosten**

Liu u. a. (2009) beschreiben die Bestimmung von Opportunitätskosten sowie Wasserpreisen mit Hilfe der linearen Programmierung. Als Opportunitätskosten oder Schattenpreise bezeichnet man entgangene Gewinne, die dadurch entstehen, dass ein weiterer Gebrauch einer Ressource nicht stattfinden kann. Für die Bewertung einzelner Nutzungsarten ist es wichtig abzuwägen, welche Verwendung des jeweiligen Wasservolumens den besten Ertrag bringt. Hierbei sollte aber auch eine Bewertung von ökologischen oder sozialen Aspekten mit einfließen. Diese Aspekte müssen für einige Bewertungsverfahren monetarisiert werden. Da dies häufig nicht vollständig möglich ist, sollten in eine vernetzte Betrachtungsweise auch nicht-monetäre Größen eingegliedert werden können.

### **3.5.2 Wirtschaftliche Bewertung von Wasserkraft**

Heimerl (2002) stellt ein Modell zur wirtschaftlichen Bewertung von Wasserkraftanlagen dar. Hierbei wird eine schematische Vorgehensweise benutzt. Ein wichtiger Aspekt dieser Bewertungsmethode ist, dass alle maßgebenden, dem jeweiligen Stand der Projektplanungen entsprechenden Parameter permanent abgeändert werden können.

## **3.6 Modellierung von Bewässerung**

Ein wesentlicher Nutzen vieler Mehrzweckspeicherprojekte ist die Bereithaltung von Bewässerungswasser. Aufgrund klimatischer Gegebenheiten kann mit Modellen wie beispielsweise CROPWAT (FAO 2003) der Bedarf an Bewässerungswasser für ausgewählte Pflanzenarten bestimmt werden. Basierend auf dem Pflanzenwasserbedarf kann dann entweder der Wasserverbrauch für ein Anbauprodukt mit unterschiedlichen Bewässerungsmethoden bestimmt werden oder der Wert des Wassers als Bestandteil eines landwirtschaftlichen Produkts berechnet werden.

### **3.6.1 ClimWat**

ClimWat ist eine Klimadatenbank, die in Verbindung mit CropWat verwendet werden kann, um den Pflanzenwasserbedarf, die Bewässerungswassermengen und den Bewässerungszeitplan abzuschätzen. Hierfür stellt ClimWat Langzeitmittelwerte für mittlere maximale Tagestemperatur, minimale Tagestemperaturen, Durchschnittsfeuchte, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer, Sonneneinstrahlung, Monatsniederschläge, effektiven Niederschlag und die Referenzevapotranspiration berechnet nach Penman-Montheith zur Verfügung. In der Datenbank sind keine statistischen Parameter wie Varianz, Standardabweichung etc. mit aufgenommen, so dass die ClimWat-Werte nicht als Basis einer Zeitreihe angesetzt werden können.

### **3.6.2 CropWat**

CropWat wurde von der Land and Water Development Division der Food and Agriculture Organization der Vereinten Nationen (FAO) entwickelt. Es wurde dazu entworfen, als Entscheidungsunterstützungssystem (decision support system, DSS) einfache Berechnungen für die Evapotranspiration und den Wasserverbrauch der Feldfrüchte durchzuführen, sowie die Auswirkungen von Trockenheit, die Effizienz von Bewässerungssystemen und regenbasierter Produktion zu bewerten (FAO 2003; Allen u. a. 1998).

#### **Berechnung der Evapotranspiration**

Um den Wasserbedarf der Pflanzen zu berechnen, muss die Evapotranspiration bestimmt werden. Hierzu wird von CropWat der FAO-Ansatz der Penman-Monteith-Methode verwendet (Allen u. a. 1998; FAO 2003).

Zur Bestimmung der Evapotranspiration für eine bestimmte Pflanze wird ein empirischer „crop factor“ ( $k_c$ ) verwendet. Dieser Faktor hängt von der Pflanzenart und dem aktuellen Entwicklungsstadium ab.

Die benötigte Bewässerungswassermenge wird aus den folgenden Eingangsparametern berechnet:

**Klimadaten** Zur Berechnung benötigt CropWat die folgenden Klimadaten:

- Minimaltemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Maximaltemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Luftfeuchtigkeit (%)
- Windgeschwindigkeit ( $\text{km}/\text{d}$ )
- Sonnenscheindauer ( $h/\text{d}$ ).

Diese Daten werden von ClimWat für viele Messstationen zur Verfügung gestellt.

**Pflanzencharakteristik** Um die Evapotranspiration einer landwirtschaftlichen Pflanze zu bestimmen, sind verschiedene charakteristische Eigenschaften notwendig. CropWat stellt eine breite Datenbasis mit diesen Informationen zur Verfügung. Mit den Einzelinformationen können aber auch neue Pflanzenarten angelegt werden (FAO 2003). Zur Berechnung der Evapotranspiration werden die folgenden Faktoren benötigt:

- Pflanzenfaktor ( $K_c$ )

- Entwicklungsstadium (Tage)
- Verwurzelungstiefe (m)
- Kritischer Wassermangel
- Ertragsreaktionsfaktor ( $k_y$ )
- Pflanzenhöhe (m).

Sind Klimadaten und Pflanzencharakteristik bekannt, kann somit ein auf die jeweiligen landwirtschaftlichen Produkte und die Umweltbedingungen angepasster Faktor errechnet werden. Dies ist für die spätere Verwendung von Modellergebnissen in einer Systemmodellierung von Nutzen.

### 3.6.3 AquaCrop

Neben CropWat stellt das FAO-Modell AquaCrop eine Möglichkeit dar, den Zusammenhang zwischen Bewässerungswasser und Pflanzenproduktivität zu bestimmen (FAO 2016). AquaCrop simuliert, wie sich die Erträge von Pflanzen aufgrund des Wasserdargebots ändern. Insbesondere ist dieses Modell geeignet, wenn Wasser den limitierenden Faktor für die Pflanzen darstellt. Mit AquaCrop kann der Zusammenhang zwischen Bewässerungswassermenge und Erntemenge berechnet werden. Natürlicherweise hängt die Erntemenge nicht ausschließlich von der Wassermenge ab, jedoch kann auf diese Weise der Wert des eingesetzten Wassers bestimmt werden.

Ahrends u. a. (2008) zeigen, wie hydrologische und ökonomische Aspekte der Bewässerung miteinander verbunden werden können. Hierbei wird ein hydrologisches Modell mit einem ökonomischen Modell gekoppelt.



## **3.7 Modellierung von Wassergüteparametern**

Neben Wassermengen spielt bei der Nutzbarkeit und ökologischen Bewertung von Gewässern und Speicherseen die Wassergüte eine entscheidende Rolle.

### **3.7.1 Modellierung des Nährstoffeintrags in Gewässer**

Bei der Bewertung der Wassergüte spielt der Nährstoffeintrag eine entscheidende Rolle. Ein erhöhter Stickstoff und Phosphatgehalt eines Gewässers kann zur Eutrophierung bis hin zum „Umkippen“ des Gewässers führen. Während früher ein grosser Anteil des Nährstoff- und Schadstoffeintrags aus der Einleitung ungeklärter Abwässer stammte, sind heute Nicht-Punkt-Quellen von höherer Bedeutung. Insbesondere der Eintrag von Nährstoffen aus der Landwirtschaft spielt eine wichtige Rolle für den Eutrophierungsgrad von Gewässern. Diese Nicht-Punkt-Quellen von Nährstoffen stellt den bedeutendsten Anteil an Stickstoff- und Phosphateintrag. Die Höhe des Nährstoffeintrags ist direkt abhängig von der Nutzungsart landwirtschaftlicher Flächen (Johnes 1996; Burt und Johnes 1997; Bockelmann-Evans u. a. 2006).

#### **Düngemittel und Nährstoffeintrag**

Um einen guten Ertrag zu gewährleisten, benötigen Pflanzen bestimmte Makro- und Mikronährstoffe. Sind diese nicht natürlicherweise in ausreichender Menge im Boden vorhanden, müssen sie als Düngemittel eingebracht werden. Die Auswahl der Düngungsmethode hat jeweils einen Effekt auf den Austrag von überschüssigen Nährstoffen (Hassan u. a. December, 2010; Bozkurt u. a. 2009; Doltra und Munoz 2009). Wird Bewässerungslandwirtschaft betrieben, hängt der Nährstoffaustrag weiterhin auch von der Bewässerungsmethode ab. Als besonders günstig kann sich die Fertigation, d. h. das Einbringen von Düngemitteln zusammen mit dem Bewässerungswasser (Hassan u. a. December, 2010) erweisen.

#### Exportkoeffizienten-Methode

Johnes (1996) beschreibt mit der Exportkoeffizientenmethode ein Verfahren zur Bestimmung des Nährstoffaustrags aus landwirtschaftlichen Flächen. Dieser Austrag pro Fläche kann dann für ein Einzugsgebiet zur Bestimmung der Nitrat- und Phosphatkonzentrationen in den Gewässern genutzt werden. Die beim Exportkoeffizientenansatz nach Johnes betrachteten Einflussgrößen für Nährstoffquellen sind verschiedene landwirtschaftliche Flächennutzungsarten, die Anzahl verschiedener Tiere und die Anzahl von Menschen im Einzugsgebiet. Der Nährstoffinput der Quelle ist der Input an Stickstoff und Phosphor auf die jeweiligen Flächen durch Düngung, die Nährstoffe, die pro Tier der jeweiligen Tierart und die, die pro Mensch eingebracht werden. Für jede dieser Nährstoffquellen ist nun ein Exportkoeffizient zu bestimmen. Dieser beschreibt wie groß die Austragungsrate ist, die von der betrachteten Quelle ausgetragen wird.

$$L = \sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i \cdot I_i \quad (3.1)$$

- $n$  Gesamt-Anzahl von Teilflächen [ $n$ ]
- $i$  i-te Teilfläche [—]
- $E_i$  Exportkoeffizient für i-te Teilfläche [—]
- $A_i$  i-te Teilfläche mit bestimmtem Landnutzungs- bzw. Nährstoffquellentyp [ $ha$ ]
- $I_i$  Nährstoff-Input auf i-te Teilfläche [ $kg/ha$ ]
- $L$  Nährstoff-Gesamtexport aus Summe der n-Teilflächen [ $kg$ ]

Die Exportkoeffizienten werden für jeden Nährstofftyp getrennt bestimmt.

Für Flächen, die gleichzeitig gedüngt und bewässert werden, muss hierbei die Bewässerung mit in die Bestimmung der Austragungsraten integriert werden. Diese ist abhängig von der Bewässerungsmethode. In einer im Rahmen dieser Arbeit betreuten Diplomarbeit (Haas 2010) wurde ein Ansatz für die Erweiterung der Export-Koeffizienten-Methode mit Bewässerung weiterentwickelt. Die Exportkoeffizienten für verschiedene Landnutzungsarten werden hierbei mit verschiedenen Vorfaktoren in Abhängigkeit des Abstands zu einem Gewässer, der Steigung des Geländes sowie der Art der Bewässerung multipliziert. Diese Vorfaktoren werden genauer in Ka-

### 3 Bisherige Ansätze zur Modellierung und Bewertung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern

---

pitel 6 bei der Fallstudie Diluvio-Palmar erläutert, bei der sie dann weiter verwendet werden. Siehe hierzu auch Tabellen 6.10, 6.11, 6.12.

Wie Hassan u. a. (December, 2010) zeigen, kann durch eine günstige Düngemittelverwendung, beispielsweise durch Fertigation, also Bewässerung mit Düngemittelzudosierung, der Austrag und somit im weiteren Schluss der Export-Koeffizient erheblich reduziert werden. Wird anstatt einer normalen Bewässerung Fertigation betrieben, sollten bei einer Modellierung die Wassermenge und die Wassergüte direkt zusammen bewertet werden.

#### **3.7.2 Modellierung der Nährstoffverteilung und Nährstoffumsetzung in Gewässern**

Um die Auswirkung der Nähstoffeinträge auf ein Gewässer zu beurteilen, muss die Verteilung sowie die Umsetzung der verschiedenen Nähr- und Schadstoffe betrachtet werden. Dies ist vor allem wichtig, um die Selbstreinigung der Gewässer abzuschätzen. Eine einfache Methode für die Berechnung dieser Stoffumsätze ist das Modell QUAL2k des USGS (US-EPA 2016, 1987). Weiterhin ist es möglich, einen Stausee oder ein natürliches Gewässer als gut durchmischten Reaktor zu betrachten. Hierbei wird für das gesamte System eine Umsetzungsrate für die verschiedenen biochemischen Reaktionen bestimmt. Besonders wichtig für die ökologische Bewertung sind hierbei die Umsetzungen des Stickstoffkreislaufes sowie die Umsetzung von Phosphorverbindungen.

### **3.8 Abschätzung von Fischerträgen in Seen und Stauseen**

Während für die ökologische Habitatbewertung in den Restwasserstrecken und im Auslauf von Speicherseen Hydro-ökologische Modelle wie CASIMIR verwendet werden, stehen für die wirtschaftliche und ökologische Bewertung des Fischertrags in Speicherseen andere Methoden zur Verfügung. Mit Hilfe des Morpho-Edaphischen-Index (MEI) (MRAG.Ltd 1995; Schönborn 2003; Kolding und van 2011), kann ein relativ einfacher Zusammenhang zwischen chemischen und morphologischen Parametern des Sees und dem

zu erwartenden Fischertrag berechnet werden. Dieser Zusammenhang ist insbesondere bei tropischen Seen und Reservoirs gültig. Der MEI wird als Verhältnis zwischen elektrischer Leitfähigkeit, als Indikator für den Salz- bzw. Nährstoffgehalt des Wassers und der mittleren Wassertiefe berechnet. Wird in einem vorhergehenden Schritt der Nährstoffgehalt berechnet, kann nun die Reaktion des ökologischen Systems auf diese biochemischen Bedingungen bestimmt werden.

### **3.9 Ökonomisch-ökologische Bewertungsverfahren**

Für die Bewertung von positiven wie negativen Auswirkungen von Infrastrukturmaßnahmen, größeren Bauprojekten etc. werden in der ökonomischen Theorie verschiedene Bewertungsverfahren verwendet, die in angepasster Form für die Bewertung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern geeignet sind. Eine besondere Schwierigkeit stellt hierbei die Bewertung von externen Effekten auf Ökosysteme sowie auf das sozio-ökonomische System einer Region dar, da diese Auswirkungen nicht direkt monetarisierbar sind.

#### **3.9.1 Ökosystemleistungen**

Farber u. a. (2002) und Costanza u. a. (1997) beschreiben unterschiedliche Möglichkeiten, Werte und Bewertungssysteme auf ökologische Zusammenhänge zu übertragen. Auch die EU-Wasserrahmenrichtlinie erfordert eine integrierte Betrachtung wasserwirtschaftlicher Aspekte sowie eine wirtschaftliche Bewertung im Rahmen eines Einzugsgebietsmanagements (Heinz u. a. 2007). Es wird also immer wichtiger, geeignete Werkzeuge bereit zu stellen, die eine kombinierte und vernetzte Betrachtungsweise erlauben.

### **3.9.2 Bewertung externer Effekte**

Ein Ansatz zur Bewertung externer Effekte von Laufwasserkraftanlagen wurde von Kohler (2006) entwickelt.

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wurde diese Methodik etwas erweitert und auch auf Bewässerungssysteme angewendet. Teile hiervon wurden von Haas (2010) als Diplomarbeit bearbeitet. Eine strukturierte Betrachtung der externen Effekte ist wichtig, um diese in integrierte Modellsysteme einzubeziehen. Hierfür ist es beispielsweise nützlich, externe Effekte pekuniär zu bewerten. Darauf basierend können externe Kosten als benötigte externe Ressourcen und externe Nutzen als weitere Endverbraucher eines vernetzten Systems dargestellt werden.

### **3.9.3 Systemmodellierung**

Die oben beschriebenen Modelle und Bewertungsverfahren bilden oft einzelne Aspekte des Systems ziemlich genau ab. Jedoch beschränkt sich die Betrachtung häufig alleine auf ökologische oder Energie-Aspekte. Kombinierte Mehrzwecknutzungen oder komplexe Systeme werden durch die einzelnen Modelle schlecht abgebildet oder es müssen viele Einzelmodelle verwendet und anschließend Ergebnisse von Hand übertragen werden. Werden unterschiedlichste Nutzungsszenarien untersucht, ist es nötig, jeweils die einzelnen Modelle auf die neuen Gegebenheiten anzuwenden.

Häufig werden für die Verwendung dieser Modelle auch sehr genaue Eingangsdaten benötigt, die vor allem in frühen Planungsphasen oder bei Mehrzweckspeicher-Projekten in Entwicklungsländern oft kaum zu beschaffen sind. Deshalb ist es vielfach notwendig, die Modelle mit eher ungenauen Eingangsdaten zu betreiben. Die Genauigkeit, die vor allem bei der Modellierung in frühen Projektphasen erhalten wird, ist meist trügerisch. Somit ist eine stückweise Linearisierung der modellierten Zusammenhänge nur eine geringfügige Verringerung der Genauigkeit und Aussagekraft. Werden einzelne Aspekte der vernetzten Systeme - für bestimmte Szenarien - beispielsweise mit den oben genannten Modellen berechnet, können solche linearisierten Zusammenhänge jedoch dazu eingesetzt werden, ein vernetztes Modell aufzustellen, das die verschiedenen Teilbereiche des Systems integriert, Ergebnisse aus den „Vor-“Modellen einbezieht und einen Gesamtüberblick über die Wirkmechanismen zulässt.

### 3.9 Ökonomisch-ökologische Bewertungsverfahren

---

Hierzu wird in der vorliegenden Arbeit ein Input-Output-Modell vorgeschlagen, das auf stückweise linearisierten Modellergebnissen beruht. In den folgenden Kapiteln wird diese Integration in ein Input-Output-Modell näher beschrieben.



# 4 Input-Output-Analyse

In diesem Kapitel wird die Methode der Input-Output-Analyse, ein Verfahren der empirischen Wirtschaftsforschung, das für volkswirtschaftliche Analysen eingesetzt wird, erläutert. Zunächst werden quantitative und qualitative Input-Output-Modelle beschrieben und im Anschluss einige Anwendungsbereiche außerhalb der rein volkswirtschaftlichen Nutzung aufgezeigt. Abschließend wird eine lineare Optimierungsmethode, die auf Input-Output-Modellen basiert, dargestellt. Die in diesem Kapitel dargestellten Methoden werden dann in Kapitel 5 weiter auf die Anwendung in der Wasserwirtschaft angepasst.

## 4.1 Makroökonomische Input-Output-Tabellen

In den Wirtschaftswissenschaften werden Input-Output-Tabellen dazu verwendet, die Verflechtungen der verschiedenen Wirtschaftszweige einer Volkswirtschaft abzubilden und daraus beispielsweise Eingriffsmöglichkeiten zur Förderung eines Wirtschaftsraumes zu bestimmen. Holub und H. (1994) beschreibt die Eigenschaften dieser Methode folgendermaßen: „Die Input-Output-Analyse macht also Ernst mit der Feststellung, dass in modernen Volkswirtschaften vielfältige Abhängigkeiten bzw. Zusammenhänge existieren“.

In diesen Tabellen wird dargestellt, welche Anteile der Produktion eines Sektors und welche andere Sektoren und Endverbraucher geliefert werden. In Tabelle 4.1 wird nach einem Beispiel von Marx (2003) das klassische Beispiel einer Input-Output-Tabelle (Leontief 1966) mit nur zwei Wirtschaftssektoren und Haushalten als Endverbraucher dargestellt. Diese Art der Input-Output-Tabelle stellt sehr übersichtlich den Güterfluss in einer Volks-



## 4 Input-Output-Analyse

---

nach j → vom i ↓	Landwirtschaft	Industrie	Haushalte	Gesamt- produktion
Landwirtschaft	25	20	55	100
Industrie	14	6	30	50

**Tabelle 4.1:** Input-Output-Tabelle mit zwei Sektoren (Marx 2003; Leontief 1966)

wirtschaft dar.

Die Einheiten (z. B. Tonnen, MW, Euros) für unterschiedliche Sektoren können sich in den Input-Output-Tabellen unterscheiden. Dies ist besonders dann nützlich, wenn unterschiedlichste Nutzungsszenarien oder Projektvarianten verglichen werden sollen. Weiterhin ist dies eine wichtige Eigenschaft, wenn in um ökologische Aspekte erweiterte Tabellen und Modelle erstellt werden, die Sektorprodukte beinhalten, welche nur schwer monetär bewertbar sind.

Bei den Input-Output-Tabellen wird davon ausgegangen, dass ein Sektor jeweils nur ein Produkt hat. Werden mehrere verschiedene Produkte erzeugt, müssen diese zu einem Gesamtprodukt (Produktmix) zusammengefasst werden. Eine weitere Möglichkeit ist, die Sektoren so in Untersektoren aufzuteilen, dass dann jeweils nur ein Produkt erzeugt wird.

Die Zahlen innerhalb einer Zeile haben durch diese Festlegung die gleiche Dimension, daher können die Werte einer Zeile, nicht jedoch einer Spalte, sinnvoll addiert werden.

Die Tabelle gibt eine Bilanz an, wie der Output eines Sektors in den weiterführenden Industrien sowie bei den Endverbrauchern verwendet wird.

Im in Tabelle 4.1 beschriebenen Beispiel fließen beispielsweise aus der landwirtschaftlichen Produktion 25 Einheiten als Eigenbedarf wieder zurück in die Landwirtschaft, 20 Einheiten werden von der Industrie weiterverarbeitet, während 55 Einheiten direkt an Endverbraucher geliefert werden.

## 4.2 Das offene statische Input-Output-Modell von W. Leontief

Der russisch-amerikanische Ökonom Wassily Leontief entwickelte ein auf Input-Output-Tabellen basierendes Verflechtungsmodell (Leontief 1961, 1966; Schumann 1968), das die Lieferverflechtungen und Rückkopplungen zwischen verschiedenen Produktionssektoren eines Wirtschaftsraums darstellt. Dieses sogenannte Leontief-Modell, auch Input-Output-Modell genannt, kann als System linearer Gleichungen dargestellt werden.

Beim offenen statischen Input-Output-Modell wird angenommen, dass die Produktion eines Sektors durch die Nachfrage bestimmt wird, d. h. die Produktion eines Sektors entspricht ihrer Lieferung an alle Sektoren und an Endverbraucher. Im Grundmodell wird von einem exogenen Sektor, den privaten Haushalten ausgegangen. Diese stellen eine Endnachfrage nach den Gütern der einzelnen Sektoren dar. Die Betrachtung als statisches Modell erfordert, dass Güter in der gleichen Periode weiterverarbeitet werden, in der sie produziert werden. Eine Lagerwirtschaft wird explizit nicht betrachtet. Durch eine geeignete Wahl des Betrachtungszeitraums kann dies gewährleistet werden.

Als primäre Inputs werden im Grundmodell Arbeit und Kapital angesehen, in erweiterten Modellen können jedoch auch andere Ressourcen wie beispielsweise Grund und Boden, Wasser oder andere Rohstoffe als Primärintput eingegliedert werden. Dies macht es möglich, Modelle für unterschiedlichste regionale oder nationale Ökonomien aufzustellen, sowie die Methodik auf beliebige andere stark verflochtene Systeme zu übertragen.

Das Grundmodell kann wie folgt dargestellt werden:

$$X_i = \sum_{j=1}^n X_{ij} + U_i \quad (i = 1, \dots, n) \quad (4.1)$$

## 4 Input-Output-Analyse

---

- mit  $X_i$  Produktionsmenge des Sektors  $i$  [*Mengeneinheit/Zeiteinheit*]  
 $X_{ij}$  Lieferung des Sektors  $i$  an den Sektor  $j$   
[*Mengeneinheit/Zeiteinheit*]  
 $U_i$  Menge des Gutes, das vom Sektor  $i$  an Endverbraucher  
geliefert wird [*Mengeneinheit/Zeiteinheit*]  
 $n$  Anzahl der betrachteten Sektoren [—]

Aus dem Verhältnis eines Produkts zu jeweiligen Vorprodukten können sogenannte Transformationskoeffizienten  $a_{ij}$  bestimmt werden. Der Transformationskoeffizient  $a_{ij}$  gibt an, welche Menge eines Gutes  $i$  benötigt wird, um eine Einheit des Produkts  $j$  zu produzieren.

$$X_{ij} = a_{ij} \cdot X_j \quad (4.2)$$

$$a_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_j} \quad (4.3)$$

$$a_{ij} \geq 0 \quad (4.4)$$

$$i, j = 1, \dots, n, \quad (4.5)$$

- mit  $X_j$  Produktionsmenge des Sektors  $j$   
 $X_{ij}$  Lieferung des Sektors  $i$  an den Sektor  $j$   
 $a_{ij}$  Transformationskoeffizient

Das System kann auch in einer Matrixschreibweise dargestellt werden. Die Transformationskoeffizienten bilden dann eine Transformationsmatrix  $A$ .

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1n} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}, E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \ddots & 0 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

$$x = \begin{pmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix}, u = \begin{pmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

$$(E - A)x = u \quad (4.8)$$

mit  $a_{ij}$  Transformationskoeffizient  
 $E$  Einheitsmatrix  
 $A$  Transformationsmatrix  
 $x$  Vektor der sektoriellen Produktionsmengen  
 $u$  Endverbraucher-Anforderungsvektor

Es wird davon ausgegangen, dass Produktionsmengen der einzelnen Sektoren rein nachfragebestimmt sind. Durch die Festlegung von Endverbrauchsmengen kann somit das System eindeutig bestimmt werden. Die Endverbrauchs- und Produktionsmengen werden üblicherweise für einen festgelegten Zeitraum angegeben oder bestimmt.

Aus den Endverbrauchsmengen kann dann beim offenen Leontief-Modell die Menge der benötigten externen Inputs  $x$ , d. h. der sektoriellen Produktionsmengen, bestimmt werden indem man die Inverse der Transformationsmatrix bildet.

$$(E - A)^{-1}u = x \quad (4.9)$$

Mit dieser Leontief-Inversen können nun für verschiedenste Endverbraucher-Vektoren die benötigten Inputs von Primär-Ressourcen und die benötigten Produktionsmengen der einzelnen Sektoren bestimmt werden.

Eine Substitution verschiedener Primärintputs, also beispielsweise, dass Grundwasser statt Flusswasser verwendet werden kann, ist im Leontief'schen Grundmodell zunächst nicht vorgesehen, kann jedoch durch eine Erweiterung des Modells integriert werden.

## 4.3 Qualitative Input-Output-Modelle

Wenn nur die Struktur der Verflechtungen eines Wirtschaftsraumes interessiert, kann ein qualitatives Input-Output-Modell verwendet werden. Hierbei können die Verflechtungen verschiedener Wirtschaftszweige durch einen gerichteten Graphen dargestellt werden (Czaika 1972). Eine qualitative Darstellung ist immer dann sinnvoll, wenn dies für die Lösung bestimmter Aufgaben ausreichend ist oder wenn quantitative Aussagen aufgrund einer sehr schlechten Datenlage noch nicht oder nur bedingt gemacht werden können. Beispielsweise ist dies häufig in der ersten Planungsphase eines Großprojektes der Fall. Solch eine qualitative Beschreibung kann als

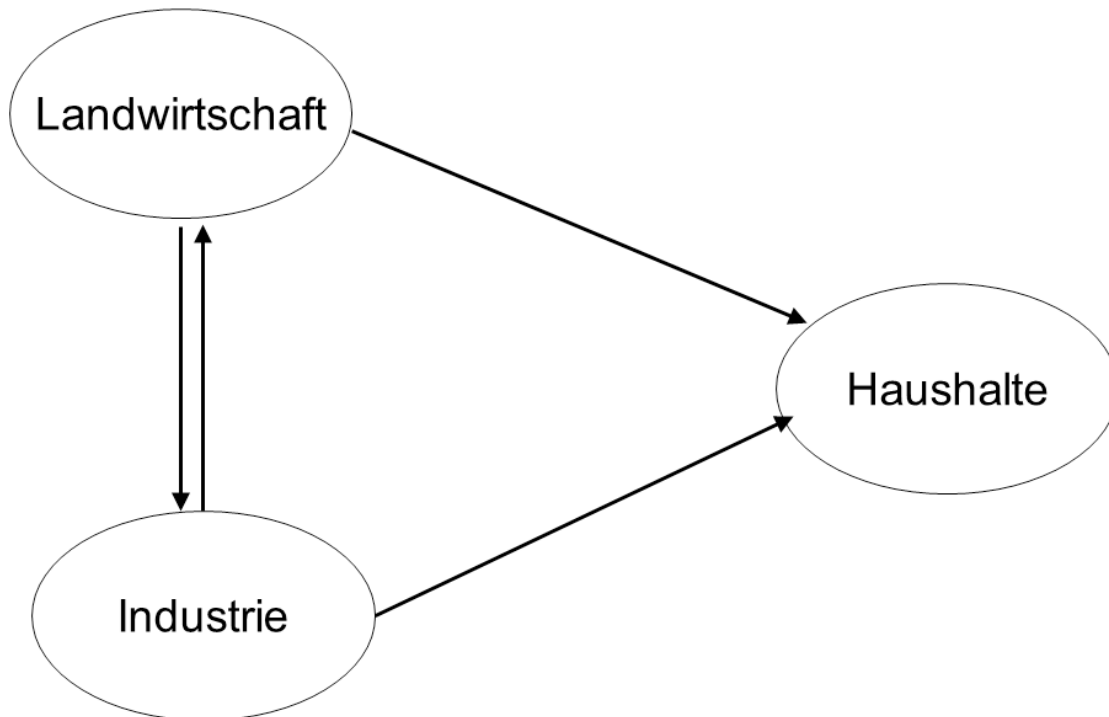
## 4 Input-Output-Analyse

---

Basis für die Entwicklung eines quantitativen Modells verwendet werden. Daneben ist die übersichtliche qualitative Darstellung und Modellierung vorteilhaft, um die technischen und ressourcenbedingten Zusammenhänge auch für Nicht-Fachleute verständlich darzustellen.

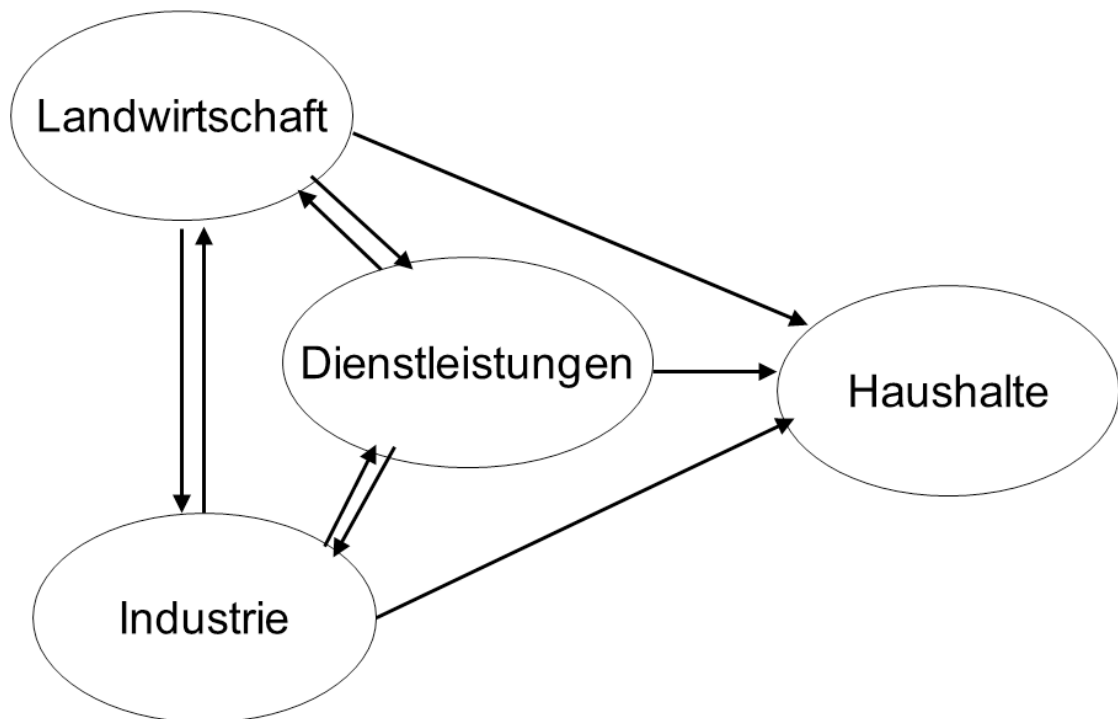
Die Knoten des Graphen stehen für die Sektoren einer Volkswirtschaft dar, die Kanten stellen die jeweiligen Verflechtungen dar. Produkte eines Sektors einer Volkswirtschaft werden zur Produktion von Gütern und Dienstleistungen von anderen Sektoren benötigt. Die Richtung der jeweiligen Kante des Graphen stellt eine Lieferbeziehung dar. Die Input-Output Graphen können anschließend teilweise mit Hilfe von graphentheoretischen Überlegungen vereinfacht werden (Czaika 1972). Beispielsweise können Teilgraphen zusammengefasst oder zirkuläre Abhängigkeiten aufgedeckt werden. Von besonderem Interesse sind häufig die indirekten Lieferbeziehungen zwischen Sektoren, die zunächst nicht direkt ersichtlich sind, im Input-Output-Modell aufgrund der Darstellung als Systemgraph jedoch deutlich erkennbar werden. Ein wichtiger Grund, qualitative Modelle zu erstellen, kann unter anderem auch sein, verschiedene Projekte oder Projektvarianten zunächst aufgrund ihrer Struktur zu vergleichen, oder um schon vorhandene Projekte unterschiedlicher Größe als Grundlage für die Datenbeschaffung neu geplanter Projekte zu nutzen.

Abbildung 4.1 zeigt, wie das im klassischen Grundmodell in Tabellenform dargestellte System als Input-Output-Graph realisiert werden kann



**Abbildung 4.1:** Qualitativer Input-Output-Graph für das im klassischen Grundmodell dargestellte System

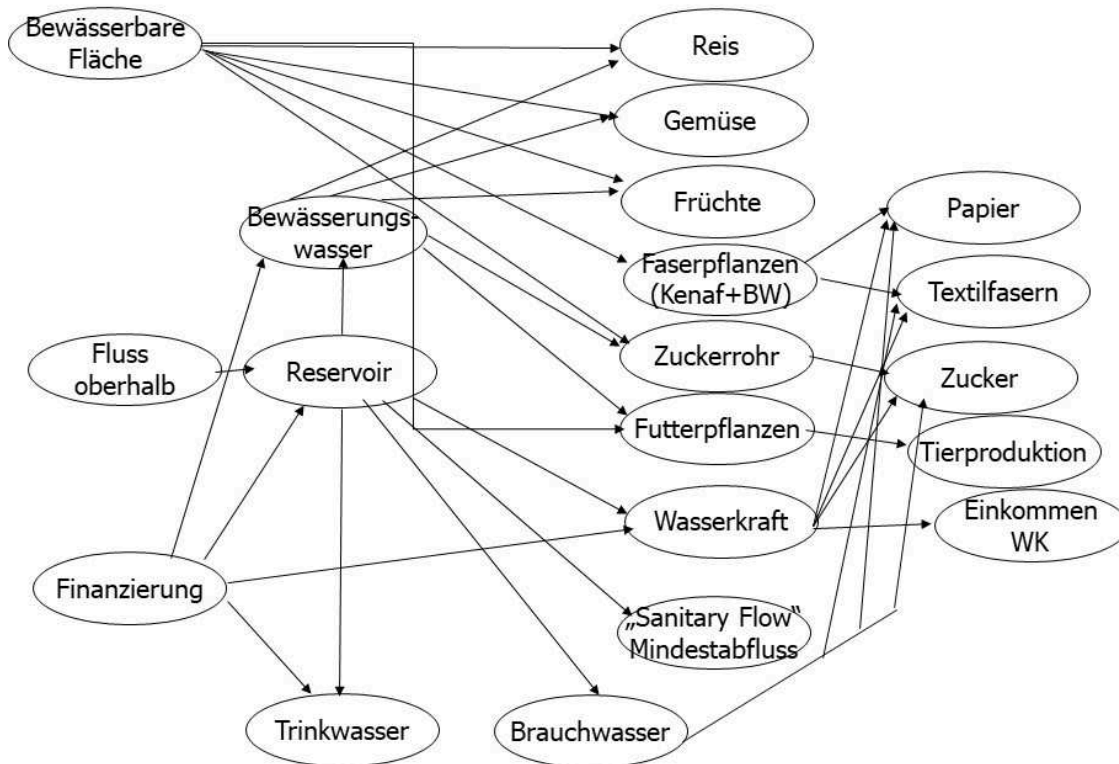
Ein einfaches dreigliedriges Wirtschaftssystem mit einem zusätzlichen tertiären Sektor (Dienstleistungen) kann beispielsweise durch einen Input-Output-Graphen wie in Abbildung 4.2 dargestellt werden. In diesem Beispiel ist zu erkennen, dass Lieferbeziehungen nicht gezwungenermaßen nur in eine Richtung gehen können, sondern dass auch zirkuläre Zusammenhänge vorhanden sein können.



**Abbildung 4.2:** Qualitativer Input-Output-Graph für ein dreigliedriges Wirtschaftssystem

Anhand von Input-Output-Graphen kann sehr anschaulich dargestellt werden, wie eng verschiedene Sektoren miteinander verknüpft sind. Bei komplexeren Systemen können hierbei beispielsweise dieselben Sektoren über mehrere verschiedene Zwischenstufen parallel miteinander verknüpft sein. Diese Darstellungsweise ist sehr gut geeignet, einen Überblick über das zu modellierende System zu schaffen. Insbesondere können Input-Output-Graphen auch Entscheidungsträgern, die Spezialisten auf einem Teil-Gebiet sind oder ganz fachfremd beispielsweise über die Finanzierung eines Projekts entscheiden müssen, helfen, einen Gesamtüberblick über das System und die Zusammenhänge des jeweiligen Wirtschaftsraumes oder Projekts zu gewinnen. Informationen zur Struktur eines Wirtschaftsraumes oder Projektes können dazu beitragen, Einflussmöglichkeiten für eine finanzielle Förderung oder beispielsweise ökologische Ausgleichsmaßnahmen zu identifizieren und vor allem gezielt einzusetzen. Aufgrund von Strukturinformationen kann z. B. ein Eingriffspunkt im System gewählt werden,

dessen Einfluss auf besonders viele oder besonders wenige andere Sektoren wirkt.



**Abbildung 4.3:** Beispiel eines Systemgraphen bei dem verschiedene finanzielle Eingriffsmöglichkeiten dargestellt werden

Abbildung 4.3 zeigt anschaulich, an welchen Stellen beispielsweise finanziell eingegriffen werden kann.

Weiterhin kann die Darstellung über einen Graphen helfen, Anforderungen an Informationen und Daten für ein Projekt zu spezifizieren. Werden zunächst ein Graph und evtl. die zugehörige Adjazenzmatrix, die die Kantenverbindungen abbildet, erstellt, kann anschließend die passende Information zu den Wirkungszusammenhängen der einzelnen gerichteten Kanten gezielt eingeholt oder generiert werden.

Qualitative Input-Output-Modelle können somit auch als Vorleistung für eine spätere Quantifizierung erstellt werden.



### **4.4 Quantifizierung qualitativer Input-Output-Modelle**

Quantitative Input-Output-Modelle können einerseits direkt aus Input-Output-Tabellen bestimmt werden, andererseits ist es jedoch auch möglich zunächst qualitativ aufgestellte Modelle zu quantifizieren. Dies ist insbesondere dann nützlich, wenn qualitative Modelle für den jeweiligen Systemtyp schon vorhanden sind. In den Wirtschaftswissenschaften werden die Transformationskoeffizienten meist empirisch aus den Input-Output-Tabellen hergeleitet (Schumann 1968). Wenn jedoch eine Vorhersage über zukünftige Wirkzusammenhänge getroffen wird, ist es meist nicht von Anfang an möglich, genau quantifizierte Lieferzusammenhänge darzustellen. Daher ist es oft sinnvoll, zunächst die Verflechtungen qualitativ herauszuarbeiten und im Anschluss die Transformationen zu quantifizieren. Anhand von Strukturüberlegungen werden zunächst die Systemgrenzen definiert und danach die Daten und Modelle für die Quantifizierung beschafft.

Dies ist insbesondere auch dann hilfreich, wenn durch ein Input-Output-Modell schon in einer frühen Planungsphase eines Infrastrukturprojekts, wie beispielsweise eine Mehrzweckspeicheranlage, Input-Output-Modelle dazu genutzt werden sollen, komplexe Wirkungszusammenhänge anschaulich darzustellen. Hierdurch kann die Datenbeschaffung für die quantifizierte Modellierung effizient gestaltet werden.

Für die Quantifizierung der Transformationen bieten sich unterschiedliche Methoden an, je nachdem, welche Art der Wirkungszusammenhänge vorliegt. Teilweise kann direkt aufgrund physikalischer oder sonstiger Zusammenhänge quantifiziert werden. Ansonsten muss, wenn keine „gemessenen“ (direkt beobachteten) Werte des modellierten Systems vorliegen, auf empirisch ermittelte Wirkzusammenhänge ähnlicher (Wirtschafts-)Systeme zurückgegriffen werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Anwendung numerischer Modelle, um beispielsweise physikalische Zusammenhänge so abzubilden, dass sie als Transformationskoeffizient eingesetzt werden können.

Sind die Wirkungszusammenhänge in physikalischer, ökonomischer, ökologischer oder sonstiger Weise als nicht linear zu betrachten, muss eine stückweise Linearisierung der jeweiligen Transformationsfunktion erfolgen, um einen einzelnen Transformationskoeffizienten für die jeweilige Lieferbeziehung zu generieren. Hierbei ist zu beachten, dass Transforma-

## 4.5 Input-Output Analyse als Grundlage einer linearen Optimierung

---

tionskoeffizienten neu bestimmt werden müssen, wenn sich im Verlauf der Modellierung die Größenordnungen im Endverbrauchervektor stark ändern.

Insbesondere gilt diese Verbindung verschiedener Methoden zur Generierung von Koeffizienten für die im nächsten Kapitel beschriebenen erweiterten Input-Output-Modelle.

Bei den in der vorliegenden Arbeit untersuchten wasserwirtschaftlichen Systemen ist es meist sinnvoll, eine Mischung aus direkt bestimmten, auf physikalischen Zusammenhängen basierenden, Koeffizienten und empirisch ermittelten wirtschaftlichen und ökologischen Koeffizienten zu verwenden.

### **4.5 Input-Output Analyse als Grundlage einer linearen Optimierung**

Während das statische offene Input-Output Modell den Wirkungszusammenhang zwischen Verbrauchsmengen, Produktionsmengen und benötigten Ressourcen darstellt und somit für verschiedene Verbrauchs- und Anforderungsszenarien die benötigten Ressourcen berechnet, stellt dieses Modell keineswegs sicher, dass die hieraus resultierenden Anforderungen an Ressourcen auch erfüllt werden können. Werden empirisch ermittelte Werte aus Input-Output Tabellen verwendet, ist diese Konsistenz natürlich automatisch gegeben; sollen jedoch zukünftige Nutzungsprofile bewertet werden, kann von einer solchen Konsistenz mit vorhandenen Ressourcen nicht ausgegangen werden. Daher ist es nützlich, entweder die Modellergebnisvektoren mit vorhandenen Ressourcen zu vergleichen oder, wenn das ermittelte Koeffizientensystem hinreichend genau ist, eine lineare Optimierung auf dieser Basis des entwickelten Input-Output-Modells durchzuführen. Auf das offene statische Input-Output-Modell lässt sich ein lineares Programmierungsmodell vom Walras-Leontief-Typ aufbauen. (Schumann 1968).

Bei der linearen Programmierung wird das Optimierungsproblem ausschließlich mit linearen Gleichungen und kontinuierlichen Variablen beschrieben.

## 4 Input-Output-Analyse

---

Hierzu wird das im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Modell, wie in Gleichung 4.10 dargestellt, umformuliert.

$$\sum_j (e_{ij} - a_{ij})X_j \geq F_i; \quad e_{ij} = \begin{cases} 1 & \forall i = j \\ 0 & \forall i \neq j \end{cases} \quad (4.10)$$

mit  $X_j$  Produktionsmenge des Sektors  $j$   
 $a_{ij}$  Transformationskoeffizient  
 $e_{ij}$  entsprechende Stelle der Einheitsmatrix  
 $F_i$  Anforderung

Um das statische offene Input-Output-Modell zu einem linearen Programmiermodell umzuformulieren, ist es erforderlich, dass die primären Inputs als integrierender Bestandteil des Modells betrachtet werden. In den Wirtschaftswissenschaften werden hierzu die Produktionsfunktionen vom Walras-Leontief-Typ verwendet und so umformuliert, dass sie als Nebenbedingungen des Programmiermodells verwendet werden können. Hierbei wird es nötig, Obergrenzen für die primären Inputs zu definieren.

$$l_j X_j \leq \bar{L}_j, \quad r_j Y_j \leq \bar{R}_j, \quad j = 1, \dots, n, \quad (4.11)$$

mit  $X_j$  Produktionsmenge des Sektors  $j$   
 $l_j$  Leistungsabgabe des Sektors  $j$   
 $\bar{L}_j$  Obergrenze der Leistungsabgabe des Sektors  $j$   
 $\bar{R}_j$  Obergrenze der Leistungsabgabe der Ressource  $j$

Weiterhin ist um sinnvolle Lösungen zu generieren, zu fordern, dass in der Lösung des Programmiermodells nur nichtnegative Werte vorkommen.

$$X_j \geq 0, X_i^d \geq 0, L_j^d \geq 0, R_j^d \geq 0 \quad (4.12)$$

mit  $X_j$  Produktionsmenge des Sektors  $j$   
 $L_j$  Leistungsabgabe des Sektors  $j$   
 $R_j$  Leistungsabgabe des Primärinputs/der Ressource  $j$   
 $d$  zeigt Schlupfvariable an, d.h. verfügbare aber nicht eingesetzte Faktorleistungen

## 4.5 Input-Output Analyse als Grundlage einer linearen Optimierung

---

Für Untersuchungen mit dem vom Schumann (1968) vorgeschlagenen Programmiermodell wird eine lineare Zielfunktion vorausgesetzt.

$$Z = \sum_i z_i^d X_i^d \quad (4.13)$$

mit  $Z$  Zielfunktion  
 $X_j$  Produktion Sektor  $j$   
 $z_j$  Verteilungskoeffizient (z.B. Preis)

Endnachfragemengen werden mit positiven Gewichten in die Zielfunktion integriert, ungenutzte Faktorleistungen, also beispielsweise überschüssige Wassermengen oder Arbeitskräfte, können mit einem stark negativen Gewichtungsfaktor in die Zielfunktion integriert werden, um möglichst eine Auslastung der Faktorbestände zu erzwingen, bzw. dass die Produktionsfaktoren wie beispielsweise der Faktor "Arbeit" voll ausgenutzt werden. Mindestens einer der Koeffizienten muss positiv angenommen werden.

Für die Zielfunktion wird das Maximum gesucht. Die Koeffizienten sind je nach System auch als Preise anzugeben. Somit kann in einem volkswirtschaftlichen Optimierungsmodell direkt eine Optimierung des Volkseinkommens berechnet werden. Für andere Systeme, die modelliert werden sollen, sind die einzelnen Gewichtungsfaktoren beispielsweise auch als politisch gewollte Schwerpunkte für die Produkte zu verstehen. Die Koeffizientenermittlung erfolgt üblicherweise nicht durch statistische Methoden sondern aufgrund von Interviews mit Wirtschaftspolitikern. Dieselbe Methodik kann bei anderen Anwendungen der Input-Output-Analyse in Form von Befragung von Experten oder den jeweiligen politischen Entscheidungsträgern erfolgen.

Um eine optimale Lösung eines linearen Optimierungsmodells zu ermitteln, wird die Simplexmethode von Dantzig (Dorfman u. a. 1958) verwendet. Hierzu stehen beispielsweise Simulationsmodelle wie QSOpt (Applegate u. a. 2016) oder phpsimplex (Granja und Ruiz 2016) zur Verfügung.

Das System enthält  $2n+1$  Gleichungen mit  $3n+1$  unbekanntem Aktivitätsniveaus. Es hat also  $n$  Freiheitsgrade.

Wurden Koeffizienten für ein Input-Output-Modell vorher empirisch oder durch Annäherung gewonnen, so kann diese "brauchbare Lösung" als Ausgangsbasis verwendet werden.

### **4.6 Erweiterte Input-Output Modelle außerhalb der rein volkswirtschaftlichen Betrachtung**

Ein Vorteil der Verwendung von Input-Output-Modellen für die Systembeschreibung ist, dass die Güter- und Stoffströme nicht alle in den gleichen Einheiten dargestellt werden müssen, sondern jedes Gut in der passenden Einheit verrechnet wird. Dies bietet die Möglichkeit, unterschiedliche Systeme in einem Modell miteinander zu koppeln. Schon recht früh wurde erkannt, dass Input-Output-Modelle Leontief'schen Typs nicht nur zur Beschreibung von Wirtschaftssystemen sondern auch zu vielen weiteren Systemmodellierungen geeignet sind.

Eine typische Erweiterung von Input-Output-Modellen ist die Verknüpfung und Erweiterung eines klassischen makroökonomischen Modells mit ökologischen Faktoren. Beispiele für Methoden zur Erweiterung von Input-Output-Modellen werden von Leontief (1970) und Hanssmann (1976) beschrieben.

Leontief erweiterte die ökonomische Input-Output-Analyse, um die Abhängigkeiten zwischen Güterproduktion und damit verbundenen Schadstoffemissionen sowie möglichen Minderungsmaßnahmen darzustellen (Leontief 1970). Um von der monetären Input-Output-Rechnung zu einem allgemeineren Ansatz zu gelangen, muss die Input-Rechnung nicht die Geldflüsse, sondern alle Energie- und Materialflüsse abbilden, die während einer definierten Zeitspanne in ein sozioökonomisches System einfließen. Als Output werden dementsprechend die Geld-, Energie- und Materialflüsse an die Natur und die Wirtschaft betrachtet.

Hanssmann (1976) stellt die Möglichkeit dar, wertvolle, knappe aber (noch) preislose Rohstoffe sowie in die Umwelt emittierte Residuen mit in die Betrachtungsweise einzubeziehen. Hierzu wird die Input-Output-Tabelle jeweils durch Schadstoff- und Rohstoff-Zeilen erweitert.

Mit dieser Betrachtungsweise ist es neben der Berechnung von Rohstoffen und Schadstoffen auch möglich, mehr als ein einziges Produkt als Output eines Sektors zu berechnen. Dies ist insbesondere dann interessant, wenn ein Produkt immer gleichzeitig zum Hauptprodukt entsteht.

#### 4.6 Erweiterte Input-Output Modelle außerhalb der rein volkswirtschaftlichen Betrachtung

---

Eine Erweiterung des Grundsystems kann nun durch Einführung weiterer Gleichungen für Emissionen und Rohstoffe erfolgen (Hanssmann 1976):

$$e_j = q_j \cdot X_j \quad (4.14)$$

$$r_j = d_j \cdot X_j \quad (4.15)$$

wobei  $q_j$  bzw.  $d_j$  als konstant angenommene technische Koeffizienten analog zu den Transformationskoeffizienten  $a_{ij}$  sind. Im Falle mehrerer Rohstoffe  $r_j$  oder Schadstoffe  $e_j$  werden diese Koeffizienten als Vektoren aufgefasst, deren Elemente sich jeweils auf einzelne Schadstoff- bzw. Rohstoffarten beziehen.

Hanssmann stellt diese Art der Erweiterung für ein ökologisches Branchenmodell basierend auf dem statischen offenen Input-Output-Modell dar. Typische erweiterte Input-Output-Modelle sind beispielsweise auch weitere ökologische Branchenmodelle, wie etwa ein Modell für die Textilindustrie (Mund 1980), oder die Anwendung solcher Modelle für die Abfallwirtschaft (Löschau 2006). Im Rahmen von Regionalmodellen, wie beispielsweise dem von Pfähler (2001) vorgestellten System, werden oft ebenso Verknüpfungen ökologischer und ökonomischer Faktoren in einem Input-Output-Modell verwendet. Weitere Autoren setzen eine angepasste Input-Output-Analyse zur Bewertung von Arbeitsplatzauswirkungen beispielsweise aufgrund vermehrter Nutzung erneuerbarer Energien (Ziegelmann u. a. 2000) ein. Als einer der Primärintputs kann der Anspruch an Arbeitsleistung aus einem Input-Output-Modell leicht errechnet werden, wenn die Anforderungen an die verschiedenen Produkte bekannt sind.

Anwendungsgebiete der Input-Output-Analyse ganz außerhalb der wirtschaftswissenschaftlichen Betrachtung sind beispielsweise auch ökologische Netzwerke und die Biotop-Modellierung, wie sie von Allesina und Bondavalli (2004) mit dem Modellierungs-Tool WAND angewendet wird.

Die Verwendung der Input-Output-Analyse in der Wasserwirtschaft wurde bisher hauptsächlich im Bereich der Wassergütewirtschaft verwendet (Faber u. a. 1983). Eine Übertragung der Methodik auf die Bewertung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern wurde von Marx (2003) skizziert. Diese Anwendung wird in der vorliegenden Arbeit im Kapitel 5 weiterentwickelt und in verschiedenen Fallstudien auf seine Anwendbarkeit überprüft.

Anhand der obigen Aufstellung wird deutlich, dass die Methode der Input-Output-Analyse sehr vielseitig nutzbar und kombinierbar ist.



# **5 Anpassung von Input-Output-Modellen an wasserwirtschaftliche Problemstellungen**

Aus der im vorigen Kapitel 4 beschriebenen Methode der Input-Output-Analyse wird nun in Verbindung mit einigen Ansätzen aus Kapitel 3 ein Verflechtungsmodell für die Wasserwirtschaft, insbesondere für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher, einwickelt.

Marx (2003) schlägt die Verwendung von Input-Output-Modellen für die Planung und den Betrieb von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern vor. Aus dem dort skizzierten Ansatz soll in der hier vorliegenden Arbeit ein Modell zur Planung und Betrieb von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern entwickelt werden. Hierzu wird in einem ersten Schritt eine qualitative Darstellungsweise für die Wirkzusammenhänge ermittelt und im nächsten Schritt ein quantitatives Modell entwickelt. Schwerpunktmäßig werden hier Wassermengen betrachtet, jedoch wird auch auf die Wassergüte eingegangen. Dabei wird eine Verknüpfung von Wassergüte und Wassermenge, Energieumwandlungen und ökologischen sowie ökonomischen Faktoren in einem einheitlichen Modell entwickelt.



## **5.1 Entwicklung eines Input-Output-Modells für die Wasserwirtschaft**

### **5.1.1 Grundlegende Erwägungen**

Durch die Möglichkeit, Stoff- und Wirtschaftsströme in unterschiedlichen Einheiten miteinander zu verknüpfen, eignet sich die Input-Output-Analyse sehr gut zur Modellierung komplexer vernetzter Strukturen. Wasserkraftanlagen und vor allem Mehrzweckspeicher haben eine große Anzahl an unterschiedlichen Wirkzusammenhängen innerhalb des Projekts und Auswirkungen auf den sie umgebenden Natur- und Wirtschaftsraum. Wichtig ist auch, dass bei der Untersuchung von großen Mehrzweckspeicherprojekten eine Auswirkung auf die regionale oder überregionale Ökonomie und auch Sozioökonomie betrachtet werden muss. Das Input-Output-Modell des jeweiligen Projekts kann als Teilmodell in ein größeres regionales oder nationales Modell integriert werden, sodass sich auch die Wechselwirkungen betrachten lassen.

Ein wichtiger Aspekt für die Verwendung von zunächst qualitativen oder eher grob strukturierten Modellen bei wasserwirtschaftlichen Fragestellungen ist neben der vergleichsweise geringen erforderlichen Datengrundlage auch die Möglichkeit, in einer sehr frühen Planungs- oder Machbarkeitsstudien-Phase Entscheidungsträgern die Möglichkeit zu bieten, sich einen Überblick über das Gesamtprojektvorhaben zu verschaffen. Vor allem bei Großprojekten in Entwicklungs- und Schwellenländern ist häufig zunächst die Datengrundlage für die Projektplanung nicht sehr tragfähig. Aufgrund eines zunächst qualitativen Modells können auch die Modellgrenzen für das zu quantifizierende Modell besser festgelegt werden, ohne dass hier bereits Restriktionen aufgrund einer schwachen Datenlage vorhanden sind. Das qualitative Modell kann aufzeigen, welche Daten überhaupt benötigt werden.

Bei Verwendung von Input-Output-Modellen können nicht nur Geld- und Güterströme dargestellt, sondern auch physikalische und ökologische Zusammenhänge abgebildet werden. Dies ist besonders dann vorteilhaft, wenn eine pekuniäre Bewertung von Auswirkungen (noch) nicht möglich ist. Eine zunächst qualitative Formulierung bietet außerdem die Möglichkeit, Wirkungsweisen sehr übersichtlich darzustellen und damit Entscheidungsträgern Eingriffsmöglichkeiten aufzuzeigen.

### 5.1.2 Vorgehensweise zur Erstellung eines Input-Output-Modells für eine wasserwirtschaftliche Fragestellung

Die folgende Vorgehensweise hat sich als besonders günstig für die Bearbeitung wasserwirtschaftlicher Fragestellungen mit Input-Output-Analyse herausgestellt: Zunächst wird ein qualitatives Modell für den jeweiligen Anlagentyp aufgestellt und an die Bedingungen des betrachteten Projekts angepasst. Hierbei werden beispielsweise die Systemgrenzen festgelegt und bestimmt, welche Nutzungsarten zum aktuellen Betrachtungszeitraum relevant sind. Dieses qualitative Modell wird für eine bestimmte Anlagengröße und Nutzungsart quantifiziert und anschließend werden iterativ Nutzungs-Szenarien evaluiert. Bei Bedarf kann als abschließende Untersuchung das so entwickelte Input-Output-Modell als Grundlage einer linearen Optimierung verwendet werden.



**Abbildung 5.1:** Ablauf einer Input-Output-Modellierung für ein wasserwirtschaftliches Problem

### 5.1.3 Zeitliche Auflösung der Modelle

Statische Input-Output Modelle beinhalten keine Betrachtung von Lagerhaltung oder die Verarbeitung von Gütern aus anderen Perioden. Daher muss insbesondere bei der Modellierung von Speichereinrichtungen der Betrachtungszeitraum günstig gewählt werden. Für Mehrzweckspeicher bietet sich hierfür beispielsweise die Betrachtung einer Periode von einem kompletten Jahr an, um eine saisonale Speicherung mit zu bewerten. Für die Laufwasserkraft oder bei Speichern für Fragestellungen, die saisonal unterschiedlich sind, kann es sich als günstig erweisen, einen kritischen Betrachtungszeit-

raum, beispielsweise Monate in der trockenen und heißen Jahreszeit zu wählen.

### **5.1.4 Substitutionsmechanismen**

Das Leontief'sche Grundmodell sieht zunächst nicht die Möglichkeit vor, verschiedene Primärinputs oder auch Inputs in die jeweiligen Sektoren durch andere Grundprodukte zu substituieren. Für die Wasserwirtschaft ist es jedoch notwendig, einen Ausgleich durch den Einsatz von alternativen Grundprodukten oder Technologien einzugliedern. Als Beispiel hierzu soll die Verwendung verschiedener Quellen für die Trinkwassergewinnung dienen. Wasser aus Tiefbrunnen kann durch die Verwendung von Flusswasser substituiert werden und umgekehrt (für dieses Beispiel wird hier nicht auf qualitative Unterschiede der Ressourcen eingegangen).

Schumann (1968) schlägt vor, für die Eingliederung von Substitutionsmechanismen statt der grundlegenden Produktionsfunktionen vom Leontief-Walras-Typ andere Produktionsfunktionen in das Modell aufzunehmen. Die benötigten Primärinputs können damit aus den benötigten Gesamtinputs berechnet werden, nachdem die jeweiligen Endverbrauchsmengen und Produktionsmengen ermittelt wurden.

Die jeweilige Substitutionsfunktion muss bei wasserwirtschaftlichen Problemstellungen von Fall zu Fall gesondert bestimmt werden. Meist kann eine Anforderung an eine Gesamt-Ressource direkt aus dem Modell hergeleitet werden, die dann anschließend linear durch eine einfache Aufsummierung aufgeteilt wird. Daher kann, wenn es sich beispielsweise nur um verschiedene Wasser- oder Landressourcen handelt und diese den gleichen Qualitätsansprüchen genügen, auf eine spezielle Verrechnung verzichtet werden.

## **5.2 Qualitative Verflechtungs-Beschreibung für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher**

Für die hier beschriebenen Systeme wurden zunächst qualitative Input-Output-Graphen aufgestellt um die Wechselwirkungen der verschiedenen „Sektoren“ zu beschreiben. Als „Sektoren“ im Sinne des Modells werden die unterschiedlichen Verwendungsarten des Wassers sowie alle wichtigen ökologischen Umwandlungs- und Nutzungsschritte betrachtet.

### **5.2.1 Generelle Vorgehensweise zur Erstellung und Vereinfachung von Input-Output-Graphen für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher**

Die qualitativen Modelle können jeweils für einen Anlagen-Typ aufgestellt werden. Anpassungen sind nur jeweils für die verschiedenen Teilaspekte nötig. Beispielsweise können aus einem allgemeinen Modell für einen Mehrzweckspeicher durch Herausnahme nicht benötigter Knoten des Graphen auch Modelle für Talsperren, die nur wenige Nutzungsarten haben, hergeleitet werden. Der Input-Output-Graph kann aber auch für ein spezifisches Projekt durch Verknüpfungen mit der weiteren Umgebung erweitert werden. Ein für eine einzelne Speicheranlage erstelltes Input-Output-Modell kann so auch in ein größeres regionales Input-Output-Modell integriert werden. Dies ist insbesondere auch für die Modellierung ganzer Kraftwerksverbände oder beispielsweise von Substitutionsmechanismen verschiedener Wasserressourcen interessant. Ebenso ist dies auch eine gute Möglichkeit, den Einfluss eines geplanten Projekts auf die sozio-ökonomische Entwicklung einer Region abzuschätzen.

Wichtig bei der Aufstellung des qualitativen, konzeptionellen Modells für die jeweilige Anlage ist die Definition der Systemgrenzen. Dabei ist zu beachten, wie die Außenwelt als „Zulieferer“ (Primärinputs) und „Kunde“ (Endabnehmer) eingebunden wird.

Da, wie oben beschrieben, die qualitativen Modelle nur vom Anlagentyp und den gewählten Nutzungsarten, nicht aber von der Anlagengröße abhängen, soll hier beispielhaft aufgezeigt werden, wie die IO-Graphen jeweils

aussehen könnten. Sollten bei einem Anlagentyp die Verflechtungen mit der Umgebung aufgezeigt werden, wurde die Systemgrenze weit gefasst. Als Anlagenkategorien werden hier Ausleitungskraftwerke bzw. Laufwasserkraftanlagen, Mehrzweckspeicher sowie als Sonderfall Gezeitenkraftwerke betrachtet. Prinzipiell kann auch ein Pumpspeicherwerk auf diese Weise dargestellt werden. Allerdings muss hier der zeitlicher Ablauf des Betriebes stärker berücksichtigt werden.

Aufgrund des besseren Überblicks über ein komplexes Projekt bzw. Projektkategorien mittels der Input-Output-Graphen ist es auch möglich, Transformationsprozesse zu klassifizieren oder zusammenzufassen sowie einzelne Teilbereiche der betrachteten Anlage durch graphentheoretische Erkenntnisse umzustrukturieren. Vorgänge mit geringer Bedeutung können so einfach zusammengefasst und anderen Transformationen zugeschlagen werden. Zirkuläre Lieferbeziehungen können erkannt werden. Durch diese Umstrukturierungen sowie die Möglichkeit, nach Erstellung eines qualitativen Modells die Systemgrenzen im Einzelfall noch einmal genau zu betrachten, kann die Datenbeschaffung für die Quantifizierung vereinfacht werden, da nur für wirklich zu betrachtende Lieferbeziehungen auch Daten benötigt werden. Die in diesem Kapitel dargestellten Input-Output-Graphen sind Beispiele für die jeweilige Projektart. Detailliertere Graphen und Graphenserien sind in Kapitel 6 zu finden. Dort wird auch auf die Quantifizierung eingegangen.

### **5.2.2 Ausleitungskraftwerk**

Ausleitungskraftwerke sowie andere Laufwasserkraftanlagen sind typischerweise nur in geringem Umfang mit einer Mehrzwecknutzung verbunden. Wesentlich zu betrachten ist hier meist die Konkurrenzsituation zwischen Mindestabfluss in der Restwasserstrecke und der Ausleitung zur Stromerzeugung. Jedoch sind oft auch neben dem Einfluss auf die Ökologie in der Restwasserstrecke noch andere externe Effekte zu beobachten (Kohler 2006). Um diese Effekte in ein Modell zu integrieren, bietet sich eine IO-Modellierung zur anschaulichen Beschreibung und Bewertung aller Interaktionen an. In Einzelfällen ist aber auch bei Ausleitungskraftwerken eine direkte Konkurrenz zu anderen Wasser-Nutzern vorhanden. Dies ist der Fall, wenn Flusswasser direkt oder als Uferfiltrat zur Bewässerung oder zur Aufbereitung als Trinkwasser entnommen wird. In manchen Fällen kann auch eine ökonomische Konkurrenzsituation zwischen dem Kraftwerksbetrieb

## 5.2 Qualitative Verflechtungs-Beschreibung für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher

---

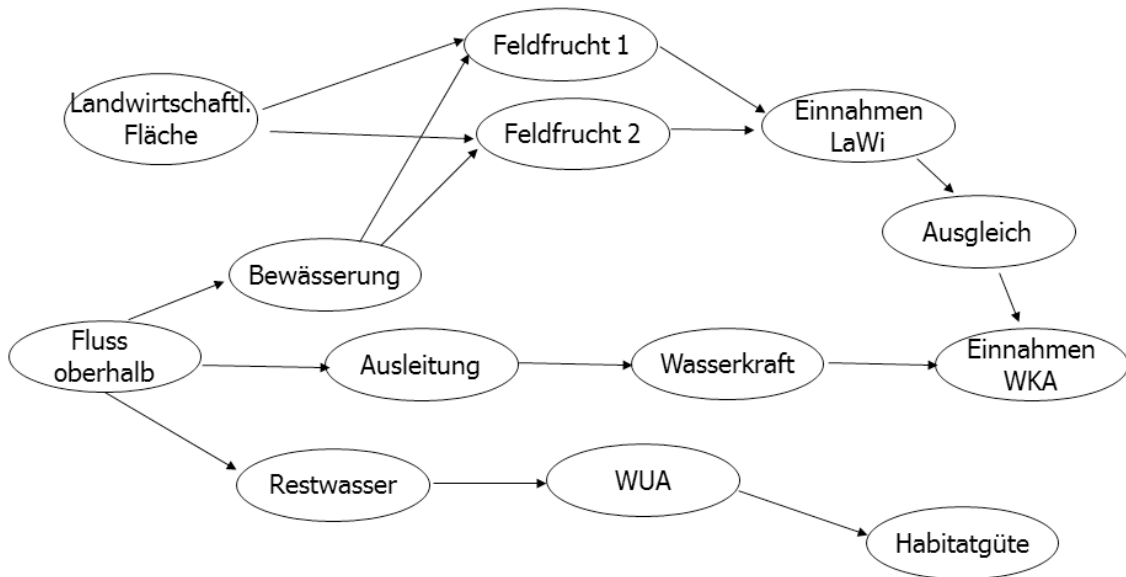
und der Fischerei entstehen. Hierbei könnte dann der wirtschaftliche Effekt auf die Fischerei auch direkt mit der ökologischen Situation verlinkt werden. Bei Ausleitungskraftwerken und anderen Laufwasserkraftanlagen ist nur in geringem Umfang eine zeitliche Puffer-Komponente vorhanden. Dadurch ist es sinnvoll, für die quantitative Modellierung als Betrachtungszeitraum einen recht kurzen Zeitabschnitt zu verwenden. Dieser ist je nach Nutzungsszenario und klimatischen Gegebenheiten zu wählen. Beispielsweise kann es sinnvoll sein als Betrachtungszeitraum eine Periode mit besonders geringen Abflüssen auszusuchen, da diese für die Flussökologie kritisch sein können. Sollen Ausgleichsmaßnahmen oder unterschiedliche Wasserrechte betrachtet werden, kann es jedoch auch sinnvoll sein, die Gesamtmengen über einen größeren Zeitraum, wie beispielsweise ein Jahr, auszuwerten.

Aus den Systemgraphen für ein Ausleitungskraftwerk (s. Abbildungen 5.2, 5.3, 5.4) lässt sich erkennen, dass je nachdem, welche konkurrierenden Wassernutzer vorhanden sind, unterschiedliche Systeme untersucht werden. Abbildung 5.2 zeigt die Anforderungen, die sich aus der Kombination zwischen Bewässerung mehrerer Feldfrüchte und Wasserkraft beispielsweise zu einer heißen trockenen Jahreszeit ergeben, während Abbildung 5.4 eine Situation in der keine Wasserentnahme zur Bewässerung stattfindet. In 5.3 wird eine Situation dargestellt, bei der nur die Bewässerung einer einzelnen Feldfrucht in Konkurrenz zur Wasserkraft und der Flussökologie steht.

Als Ressourcen sind das Flusswasser und die landwirtschaftliche Fläche vorhanden. Je nach Szenario wird Wasser für die Wasserkraft und die Bewässerung entnommen oder nur für die Wasserkraft.

## 5 Anpassung von Input-Output-Modellen an wasserwirtschaftliche Problemstellungen

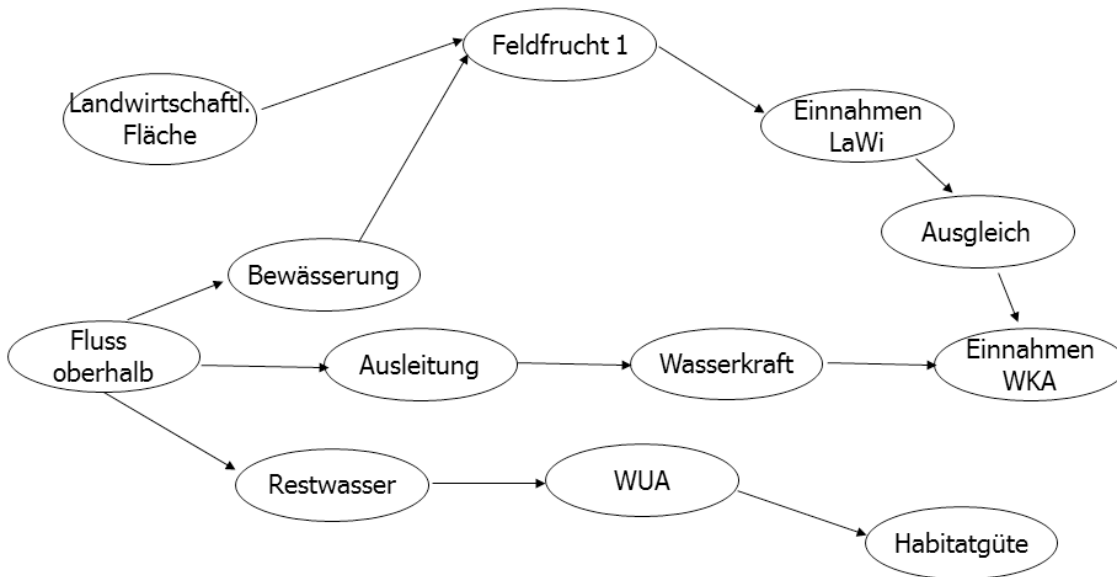
---



**Abbildung 5.2:** Beispiel-Systemgraph für ein Ausleitungskraftwerk in Kombination mit Bewässerung

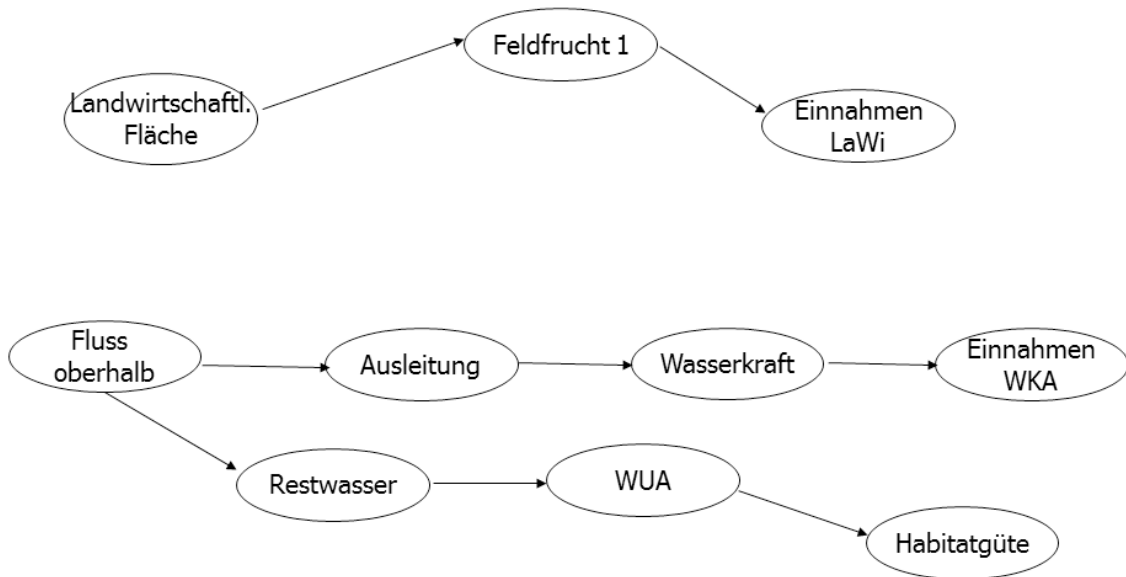
## 5.2 Qualitative Verflechtungs-Beschreibung für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher

---



**Abbildung 5.3:** Beispiel-Systemgraph für ein Ausleitungskraftwerk mit einer Feldfrucht in Kombination mit Bewässerung





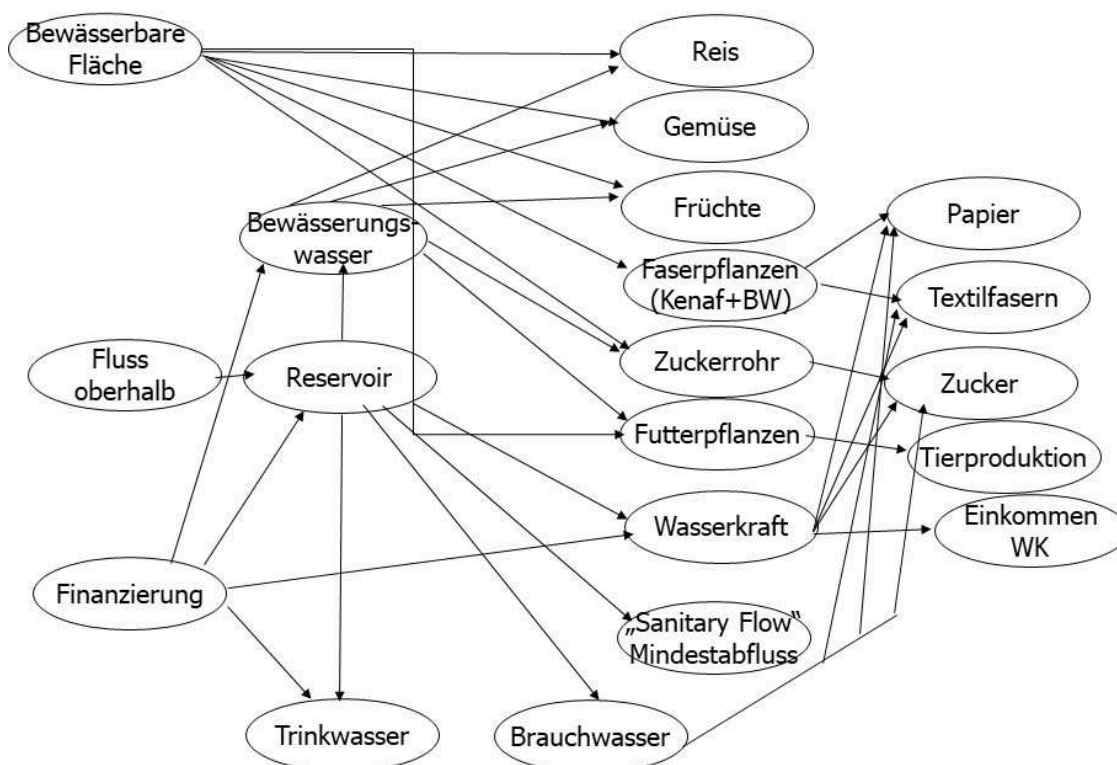
**Abbildung 5.4:** Beispiel-Systemgraph für ein Ausleitungskraftwerk - Verzicht auf Bewässerung oder Jahreszeit ohne Bewässerung

### 5.2.3 Mehrzweckspeicher

Mehrzweckspeicher werden für sehr unterschiedliche Nutzungsarten und Kombinationen von Nutzungsarten gebaut. Daher ist es schwierig, ein allgemeingültiges Modell für Mehrzweckspeicheranlagen aufzustellen. Allen Mehrzweckspeicher-Projekten gemein ist die große Vernetztheit des Systems, sowie bedingt durch die häufig eher großen Projekte auch die starken Wechselwirkungen mit der regionalen Ökologie und Ökonomie. Daher kann es sinnvoll sein, die Systemgrenzen weiter nach außen zu verlagern und einen Teil des Gesamtwirtschafts- oder Naturraumes zu betrachten. Sozioökonomische Auswirkungen wie beispielsweise auf den regionalen Arbeitsmarkt oder die öffentliche Gesundheit können hier in manchen Fällen ebenso eingegliedert werden.

## 5.2 Qualitative Verflechtungs-Beschreibung für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher

Da Speicher saisonale Unterschiede im Wasserdargebot puffern können, muss bei der Modellierung als Betrachtungszeitraum für die Modellierung ein ganzes Jahr bzw. die Periode für die der Speicher ausgelegt ist, angesehen werden. Daher sollen alle in einem Jahr vorkommenden Nutzungsarten und Ressourcen mit in den Systemgraph aufgenommen werden. In Einzelfällen sollte eine zeitliche Komponente durch Aufteilung in verschiedene saisonale Modelle betrachtet werden. Dies wäre dann von Nutzen, wenn sich die Zusammensetzung der Nutzungsarten innerhalb eines Jahres stark ändert, jedoch muss hierbei beachtet werden, ob implizit dann eine Speicherfunktion ins Modell zu integrieren ist. Eine weitere Möglichkeit ist es, einen kritischen Zeitraum für die unterschiedlichen Wasserge- und -verbraucher zu definieren, in dem die Systembetrachtung dann erfolgt. Häufige Kombinationen von Nutzungsarten sind Bewässerungswassergewinnung mit Wasserkraft und evtl. Hochwasserschutz sowie die Gewinnung von Trinkwasser mit Wasserkraft. Für diese häufigen Szenarien kann ein Standardmodell entwickelt werden, das je nach Projekt dann um weitere Aspekte ergänzt oder abgeändert werden kann.



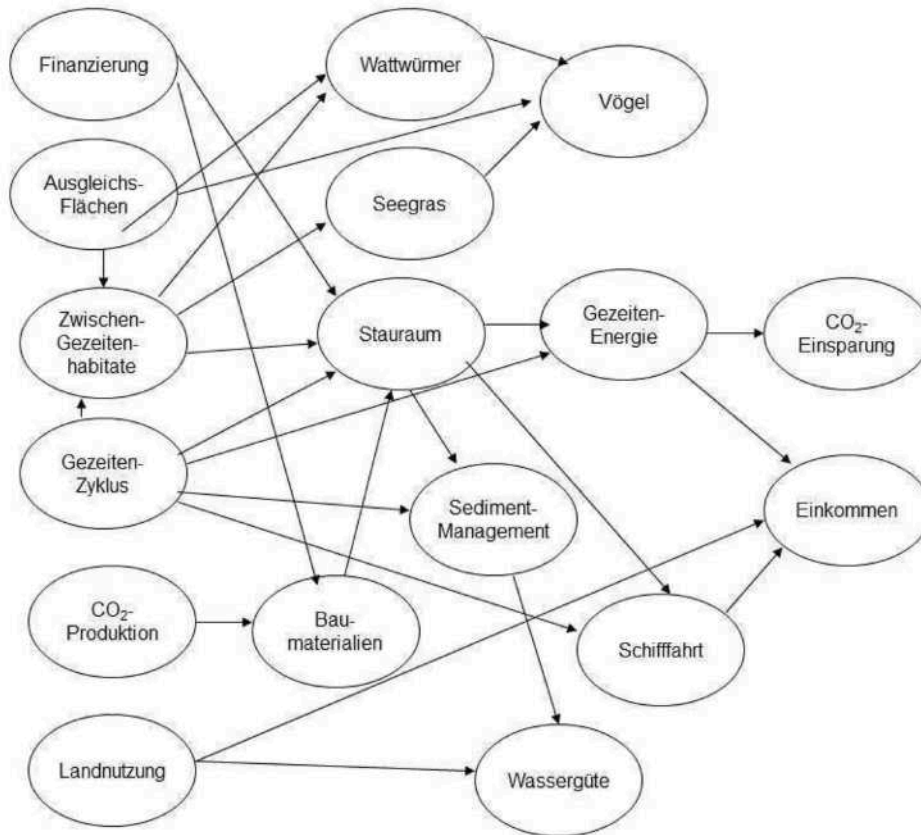
**Abbildung 5.5:** Systemgraph für einen Mehrzweckspeicher

Abb. 5.5 stellt beispielhaft einen Mehrzweckspeicher dar. Im betrachteten Fall werden gleichzeitig Trinkwasser und Bewässerungswasser entnommen sowie Wasserkraft produziert und ein Mindestwasserabfluss eingehalten. Saisonal bedingt könnte beispielsweise bei dem in Abb. 5.5 beschriebenen System durch Niederschläge oder Erntezyklen ein Teil der Bewässerungsansprüche wegfallen oder in einem sehr regnerischen Zeitraum der „Sanitary flow“ auch schon so erfüllt sein. Welche Komponenten und Ansprüche für den Untersuchungszeitraum angewendet werden können, muss für jede Fallstudie einzeln bestimmt werden. Siehe hierzu Kapitel 6.

### 5.2.4 Gezeitenkraftwerk

Als Spezialfall einer Wasserkraftanlage kann der Bau einer Gezeitensperre über die gesamte Breite eines Ästuars angesehen werden. Ähnlich wie im Fall einer Laufwasserkraftanlage sind hier hauptsächlich die Energiegewinnung und die Ökologie als Konkurrenz anzusehen. Jedoch können weitere Nutzungsansprüche in das System integriert sein wie beispielsweise die Schifffahrt oder Fischerei und Muschelzucht. Von einer gesamtsystematischen Betrachtung her ist hier das Modell-Vorgehen ähnlich einer Mischung von Laufwasserkraft und Speicherwirtschaft. Andere Arten der Meeresenergienutzung wie beispielsweise Gezeitenturbinen oder mit der Küste verbundene Gezeitenlagunen können in ähnlicher Weise behandelt werden. Da es sich bei Meeresenergieprojekten häufig um sehr große Systeme handelt, sollten bei der Modellierung auch weitergehende Auswirkungen betrachtet und daher die Modellgrenzen relativ weit gewählt werden.

## 5.2 Qualitative Verflechtungs-Beschreibung für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher



**Abbildung 5.6:** Systemgraph für ein Gezeitenkraftwerk

Bei dem in Abbildung 5.6 dargestellten System wurden die Systemgrenzen recht groß gewählt und es wird beispielsweise die Landnutzung der Einzugsgebiete und ihr Einfluss auf die Wassergüte sowie die Schiffahrt als durch eine Gezeiten Sperre beeinflusster Sektor mit einbezogen. Bei einem konkreten Projekt können diese und andere Einflussgrößen mehr oder weniger relevant sein. Wo die Systemgrenze gezogen wird, muss im Einzelfall entschieden werden.

## **5.3 Quantifizierung eines Input-Output-Modells für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher**

Aus den qualitativen Modellen können quantitative Beschreibungen hergeleitet werden. Hierzu werden für die Kanten des Input-Output-Graphen jeweils Transformationskoeffizienten bestimmt. Die Transformationskoeffizienten basieren z. B. auf physikalischen, ökologischen oder ökonomischen Wirkzusammenhängen oder werden aus vorhandenen Verhältnissen zwischen der „Lieferung“ und „Produktion“ empirisch bestimmt.

### **5.3.1 Bestimmung von Transformationskoeffizienten**

Für die Erstellung eines quantitativen Input-Output-Modells aus einem qualitativen Input-Output-Graphen müssen die Transformationskoeffizienten  $a_{ij}$  der Transformationsmatrix  $A$  bestimmt werden. Diese können, wie in Gleichung 4.2 beschrieben, aus den jeweiligen Ressourcen-Einsätzen und „Produktionsmengen“ berechnet werden, bzw. alternativ direkt aus physikalischen Abhängigkeiten oder Modellen erzeugt werden. Die Transformationskoeffizienten sind für das jeweilige Wasserkraft- oder Mehrzweckspeicher-Projekt spezifisch, sie können jedoch meist nach den gleichen Regeln generiert werden.

Für jede Kante des Input-Output-Graphen wird ein Transformationskoeffizient bestimmt. Einige Transformationen können empirisch aufgrund von Wirtschaftsdaten, Erfahrungswerten oder Auswertung von Input-Output-Tabellen ermittelt werden, andere Transformationen werden genauer über vorhergehende Modellierungen bestimmt.

#### **Empirische Bestimmung Transformationskoeffizienten**

Transformationen, die in Geldwerten ausgedrückt werden, basieren meistens auf empirischen Werten, die aufgrund der lokalen und globalen wirt-

### 5.3 Quantifizierung eines Input-Output-Modells für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher

---

schaftlichen Gegebenheiten so bestimmt werden können. Diese können beispielsweise aus volkswirtschaftlichen Input-Output-Tabellen ermittelt werden oder durch eine Marktstudie in der jeweiligen Region. Ein Beispiel für solche Transformationen ist die Eingliederung von Bau- und Betriebskosten als Inputs. Weitere Transformationen basieren auf Marktwerten für Zulieferungen, Arbeitsleistungen oder auch Produkten. Bei den hier betrachteten Systemen ist dies beispielsweise der Marktpreis für Trink- oder Bewässerungswasser oder der Preis für elektrische Energie. Oft können auch benötigte landwirtschaftliche Rohstoffmengen für ein weiterverarbeitetes Industrieprodukt nur empirisch aus Input-Output-Tabellen oder aus Daten einzelner Betriebe bestimmt werden. Wie in Kapitel 6 bei der Fallstudie Diluvio-Palmar dargestellt, kann beispielsweise auch eine Marktstudie zur Bestimmung von Transformationskoeffizienten für Gewinne aus dem Verkauf von landwirtschaftlichen Produkten erforderlich sein, sofern genaue Preise für eine Region nicht verfügbar sind.

Ebenso empirisch bestimmt werden Wasserverlustmengen eines Rohrleitungsnetzes, die als Eigenverbrauch dargestellt werden können. Hier wäre dann bei einem Verlust im Rohrleitungsnetz von 20 %  $\alpha_{ww}$  also der Transformationskoeffizient von Wasser nach Wasser 0,2, was soviel bedeutet, dass man 0,2 l Wasser in der Rohrleitung zusätzlich zum Wasser aus dem Speicher braucht um 1 l zu „produzieren“.

#### **Bestimmung von Transformationskoeffizienten durch die „Willingness to pay“-Methode**

Eine Möglichkeit der Bestimmung von Transformationskoeffizienten, die sich beispielsweise für die Wertigkeit von Hochwasserschutzmaßnahmen oder Renaturierungsmaßnahmen eignet, ist die Bestimmung der „Willingness to pay“ (Olsen und Donaldson 1998). Hierbei wird der Preis, den beispielsweise Anwohner für eine Verbesserung der Lebensqualität oder die Vermeidung von Überflutungen zu zahlen bereit sind, als Wertigkeit eingesetzt. Olsen und Donaldson (1998) beschreibt diese Methode, um die Wertigkeit von Hochwasserschutzdeichen für die Anwohner oder anliegende Industrie zu bestimmen, jedoch kann dieselbe Methode auch verwendet werden, um Stauraumbewirtschaftungsmaßnahmen im Rahmen des Hochwasserschutzes zu bewerten.

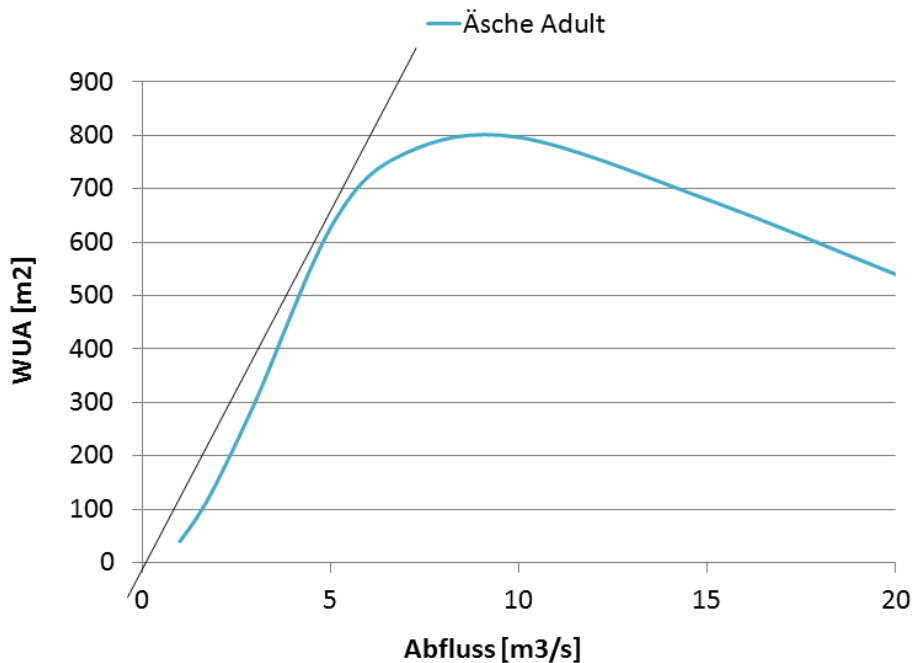
### **Modellbasierte Bestimmung von Transformationskoeffizienten**

Bei der Berechnung von Transformationen von physikalischen Größen nach physikalischen Größen ist es teilweise möglich, diese direkt aufgrund von Berechnungsvorschriften zu ermitteln oder aber durch eine numerische Modellierung anzunähern.

Beispiele hierfür sind die Transformation von Wassermenge und Fallhöhe nach elektrischer Energie, aber auch Rauheitsverluste oder Transformationen hin zu Habitatgüte-Parametern. Viele Transformationen, die auf physikalischen oder ökologischen Zusammenhängen beruhen, sind an sich nicht-linear. Daher müssen die Transformationskoeffizienten durch stückweise Linearisierung der nichtlinearen Gleichungen bestimmt werden. Für die Modellierung bedeutet dies, dass die Transformationsmatrix teilweise für den jeweiligen Endverbraucher-Vektor angepasst werden muss, um jeweils im richtigen Wertebereich die Linearisierung durchzuführen. Hierzu wird, wie in Abb. 5.7 dargestellt, an den Modellergebnis-Graph eine Tangente angelegt. In diesem Beispiel wäre also  $a_{ij} = \frac{\text{Abfluss}}{1WUA} = \frac{5m^3/s}{600m^2} = 0,0083 \left[ \frac{m^3/s}{m^2} \right]$ .

### 5.3 Quantifizierung eines Input-Output-Modells für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher

---



**Abbildung 5.7:** Koeffizientenbestimmung aus einem Modellergebnis-Graph

#### **Bestimmung ökologischer Transformationskoeffizienten**

Eine Möglichkeit, Transformationskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen Wassermengen und ökologischen Parametern zu bestimmen, ist eine vorhergehende Modellierung des Zusammenhangs mit einem ökohydraulischen Modell wie beispielsweise CASIMIR (Schneider 2001; Jorde u. a. 1999). Die ökohydraulische Modellierung mit CASIMIR wurde im vorhergehenden Kapitel 3 umrissen.

Üblicherweise werden die Ergebnisse solch einer Modellierung keinen linearen Zusammenhang zwischen Wassermengen und ökologischer Wertigkeit aufzeigen, jedoch ist es möglich, durch stückweise Linearisierung für einen bestimmten Wertebereich gültige Transformationskoeffizienten zu



## 5 Anpassung von Input-Output-Modellen an wasserwirtschaftliche Problemstellungen

---

bestimmen. Beispielsweise wird mit CASIMIR der Zusammenhang zwischen Abflussmenge und WUA berechnet und geplottet. Anschließend wird im passenden Wertebereich eine Tangente angelegt, deren Steigung dann als Transformationskoeffizient für einen kleinen Teilbereich dient (s. Abb. 5.7). Hierbei wäre dann die Abflussmenge äquivalent zur Lieferung  $X_{ij}$  in Gleichung 4.2 und das WUA die „Produktionsmenge“  $X_i$  wie im vorigen Abschnitt beschrieben.

### **Bestimmung von Transformationskoeffizienten für Bewässerung**

Die Zusammenhänge zwischen Bewässerungswassermengen und landwirtschaftlichen Erträgen können mit Hilfe von CROPWAT-Modellergebnissen bestimmt und als Transformationskoeffizienten dargestellt werden. Diese Transformationskoeffizienten sind hierbei sehr stark von lokalen klimatischen und hydrologischen Bedingungen abhängig. Die Modellierung mit CROPWAT wird in Abschnitt 3.6 beschrieben. Aus den Modellergebnissen wird anschließend der Zusammenhang zwischen Produktionsmenge und Wasserverbrauch ermittelt und stückweise linearisiert. Diese linearisierten Zusammenhänge können als Transformationkoeffizienten für die jeweiligen landwirtschaftlichen Produkte genutzt werden. Der Transformationskoeffizient gibt dann an, wieviel Bewässerungswasser in einem landwirtschaftlichen Produkt „weiterverarbeitet“ wurde. Ein Beispiel hierfür wäre

$$\alpha_{ij} = \frac{\text{Bewässerungswasser}}{\text{Kartoffeln}} = \frac{280l}{1kg}.$$

### **Direkt berechnete Transformationskoeffizienten**

Einige Transformationskoeffizienten basieren auf direkten physikalischen Zusammenhängen. Sind diese Zusammenhänge linear, kann direkt ein Transformationskoeffizient bestimmt, ansonsten muss wiederum durch Berechnung einer Tangente linearisiert werden. Ein typisches Beispiel für einen direkt berechenbaren Transformationskoeffizienten ist die Transformation von Wassermengen nach Produktion von elektrischem Strom. Diese Transformation kann als direkte Funktion von Fallhöhe und Wirkungsgrad des Kraftwerks dargestellt werden (s. Gleichung 5.2). Hierzu wird die Gleichung

für die Berechnung der Leistung (s. Giesecke u. a. (2014)) entsprechend umgestellt:

$$P = c_P \cdot h_f \cdot Q \quad (5.1)$$

$$a_{ij} = P/Q = c_P \cdot h_f \quad (5.2)$$

mit  $P$  = Leistung  
 $Q$  = Durchfluss  
 $c_P$  = Leistungsbeiwert  
 $h_f$  = Fallhöhe

In Tabelle 5.1 wird dargestellt, mit welchen Methoden Transformationskoeffizienten für verschiedene Aspekte einer wasserwirtschaftlichen Problemstellung berechnet werden können.

Startknoten	Endknoten	Berechnungsvorschrift	Linearisierung nötig?
Wasser aus Speicher	Bewässerungswasser	$1m^3/1m^3$	nein
Bewässerungswasser	Ernteertrag	vorhergehende Modellierung des Wasserbedarf (z. B. mit CropWat)	ja
Wasser aus Speicher	Mindestwasserabfluss	$1m^3/1m^3$	nein
Mindestwasserabfluss	Ökologische Wertigkeit	vorhergehende Modellierung (z. B. mit CASIMIR)	ja

**Tabelle 5.1:** Beispiele für die Bestimmung von Transformationskoeffizienten

## 5.4 Erweiterung des klassischen Leontief-Modells

Da in den in dieser Arbeit untersuchten Systemen die Verflechtungen nicht vollkommen analog zu einem klassischen Wirtschaftssystem sind, muss in dem hier verwendeten Modell der Leontief-Ansatz erweitert werden.

### 5.4.1 Negative Effekte

Bei der Betrachtung von Umweltauswirkungen gibt es Wirkungszusammenhänge, die invers miteinander verknüpft sind. Würde eine Transformation im Modell negativ, da die Beziehung zwischen Zulieferung von Produkt A und „weiterverarbeitetem“ Produkt B umgekehrt proportional ist, muss hier ein neuer Faktor eingeführt werden, mit dem stattdessen gerechnet wird, weil per Definition in Leontief-Gleichungssystemen negative Koeffizienten ausgeschlossen sind. Hierzu wird dann beispielsweise ein Einspar-Faktor eingeführt, in den transformiert werden kann. Ein Beispiel hierfür sind negative Wassergüteauswirkungen durch Nährstoff- und Schadstoffeinträge. Um diese als positive Effekte darzustellen kann ein Vermeidungsfaktor verwendet werden. Dies könnte dann folgendermaßen dargestellt werden:

$\alpha_{ij} = \frac{\text{Reinigungskosten}}{N\text{-Vermeidung}} = \frac{2000\text{€}}{1\text{mg/l}}$  für die Gesamtvermeidung in einem Gewässer in einer bestimmten Zeitperiode.

### 5.4.2 Mehrfachnutzen

Bei den klassischen Leontief-Modellen wird in jedem Sektor genau ein Produkt erstellt und dieses wird auch genau einmal genutzt, um weitere Produkte zu produzieren. Wird bei Systemen, bei denen Ressourcen einen Mehrzwecknutzen haben, dieser Ansatz gewählt, wird ein zu hoher Ressourcen-Einsatz errechnet. Um dieses Problem zu umgehen, gibt es verschiedene Möglichkeiten.

#### Einführung von Gleichungen außerhalb der Transformationsmatrix

Eine Variante Mehrfachnutzen darzustellen, ist in Anlehnung an die von Hanssmann (1976) verwendete Methode (s. Kap. 4), weitere Gleichungen für Schadstoffe oder Mehrzwecknutzen einzuführen.

$$e_j = q_j \cdot X_j \quad (5.3)$$

$$r_j = d_j \cdot X_j \quad (5.4)$$

Diese Gleichungen, die außerhalb der eigentlichen Transformationsmatrix  $A$  stehen, eignen sich besonders gut für die Berechnung von Nebenprodukten. Dies wäre beispielsweise dann der Fall, wenn ein Bewässerungssystem als Nebenprodukt die Erzeugung von elektrischer Energie durch Kleinwasserkraft hat. Hierbei wäre dann die Nutzung des Wassers für die Bewässerung als Transformation in der Hauptmatrix beschrieben, während die Energieerzeugung in einer zusätzlichen Gleichung als  $e_j$  darstellbar ist.

Sollen verschiedene Nutzungsarten derselben Ressource gleichberechtigt dargestellt werden, ist dies jedoch bei der Formulierung durch Gleichungen außerhalb der Hauptmatrix konzeptionell unübersichtlich.

### **Einführung einer virtuellen Ressourcen-Börse**

Um diese Unübersichtlichkeit zu verhindern und die direkten Zusammenhänge in einem Input-Output-Graph abzubilden, ist es oft besser, eine weitere Möglichkeit der Darstellung von Mehrzwecknutzung zu verwenden: Die Einführung von virtuellen Ressourcen-Börsen, in denen eine Ressource, die einen Mehrzwecknutzen hat, in Abhängigkeit des Verhältnisses der Endverbraucher vermehrt wird bzw. ihr ein Preis zugeordnet wird, der dem Mehrzwecknutzen entspricht. Die Ressource wird in dieser Börse virtuell vervielfacht und damit für die unterschiedlichen Nutzungsarten zur Verfügung gestellt. Es würde hier also eine zusätzliche Transformation  $x_{wasser} \rightarrow x_{virtuell}$  eingeführt.

Hierbei ist darauf zu achten, dass nicht unbeabsichtigterweise im Modell Ressourcen generiert werden, die so im realen System nicht vorhanden sind. Dies ist beispielsweise dadurch möglich, dass die jeweiligen Endverbrauchsmengen der verschiedenen Ressourcen im gleichen Verhältnis angelegt werden. Verschiebungen im Verhältnis der Endverbraucher zueinander müssen dann in der internen „Börse“ mit angepasst werden.

Wird beispielsweise Wasser erst nach der energetischen Nutzung durch Wasserkraft aus dem Fluss entnommen, kann dieses Wasser „doppelt“ verwendet werden. Hierzu kann in einer Ressourcenbörse Wasser in „Verrechnungswasser“ umgewandelt werden und dann in beiden Nutzungsarten verbraucht werden. Dabei ist es aber notwendig, die beiden Nutzungsarten proportional zueinander als Verbraucher anzulegen um sicherzustellen, dass keine Extra-Ressourcen „produziert“ werden.

### **Aufteilung einer Ressource in ihre einzelnen Eigenschaften**

Eine Weiterentwicklung der Ressourcenbörse ist die Aufteilung einzelner Ressourcen in ihre verschiedenen Eigenschaften. Bei der Mehrzwecknutzung einer Ressource werden unterschiedliche Eigenschaften dieser Ressource für unterschiedliche Zwecke verbraucht. So wird beispielsweise, wenn Wasser für die Wasserkraft sowie für die Bewässerung genutzt wird, die Eigenschaft „Energiehöhe“ separat von der Eigenschaft „stofflicher Nutzen“ verwendet. Für die Bewässerung wird dann ein Anteil beider Eigenschaften benötigt, die restliche Ressource „Energiehöhe“ kann dann durch Turbinen in elektrische Energie umgewandelt werden. Diese Aufteilung in verschiedene Eigenschaften einer einzelnen Ressource hat gegenüber der Ressourcen-Börse den Vorteil, dass besser sicherzustellen ist, dass es nicht zu einer unbeabsichtigten Vermehrung von Ressourcen entgegen dem abgebildeten System im Modell kommt. Wird beispielsweise Bewässerungswasser oder Trinkwasser durch Rohrleitungsturbinen zunächst energetisch genutzt, um dann stofflich der anderen Nutzung zugeführt zu werden, wird die Ressource Energiehöhe auf Wasserkraft und beispielsweise Bewässerung aufgeteilt während die stoffliche Nutzung alleine der Bewässerung zufällt.

### **5.4.3 Kopplungseffekte von Wassergüte und Wassermengen**

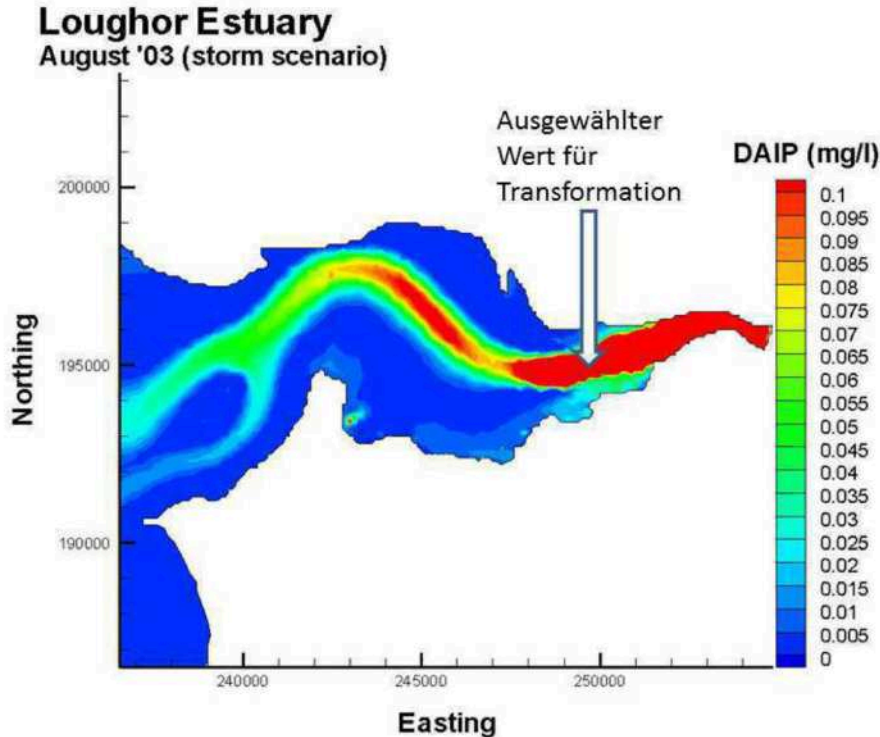
Nicht nur die Wassermengen sind bei einer Untersuchung von Mehrzweckspeichern oder ganzen Einzugsgebieten wichtig, auch die Qualität spielt je nach beabsichtigten Nutzungszwecken für das gespeicherte Wasser eine Rolle. Faber u. a. (1983) beschreiben die Anwendung der Input-Output Modellierung für die Wassergütewirtschaft. Wichtige Parameter sind beispielsweise der Gehalt an Nährstoffen im Wasser. Sind zu große Mengen an Phosphaten und Stickstoffverbindungen (Nitrat, Nitrit, Ammonium, organischer Stickstoff) im Wasser vorhanden kann es zu einer Überdüngung des Stausees bis hin zum „Umkippen“ kommen oder es können die Grenzwerte für die Verwendung des Wassers als Trink- oder Brauchwasser überschritten werden. Auch der Gehalt an Sauerstoff im Wasser kann als Wassergüteparameter in die Betrachtung eingehen.

### Bestimmung von Transformationskoeffizienten für Wassergüte

Bis das Wasser im Stausee ankommt, hat es meistens schon die verschiedensten „Transformationen“ mitgemacht. Beispielsweise gelangt es als Oberflächenabfluss in kleinere Gewässer und anschließend in den Stausee. In all diesen Stufen werden Nähr- und Schadstoffe eingetragen, abgebaut oder umgewandelt.

Ein Großteil der eingetragenen Nährstoffe stammt aus sogenannten Nicht-Punkt-Quellen d. h. die Stoffe gelangen aus Oberflächen oder Grundwassereintrag in die Gewässer. Die wichtigste Quelle solcher Nährstoffe sind landwirtschaftliche Flächen. Eine Möglichkeit, Transformationskoeffizienten für den Austrag von Nährstoffen aus landwirtschaftlichen Flächen zu bestimmen, besteht in dem in Kapitel 3 beschriebenen Export-Koeffizienten-Verfahren (Johnes 1996). Transformationskoeffizienten für die Veränderung der Nährstoffgehalte innerhalb von Zuflüssen sowie direkt im Stauraum können z. B. mit Hilfe des QUAL2K (US-EPA 2016, 1987) Standards (s. Kapitel 3) bestimmt werden. Es können auch die Ergebnisse anderer Wassergütemodelle zur Bestimmung der Transformationskoeffizienten verwendet werden. Wird ein räumlich verteiltes Modell zur Berechnung der Schad- und Nährstoffeinträge in einen Stausee genutzt, z. B. um gleichzeitig eine Visualisierung der Verteilung der Schadstoffkomponenten zu erstellen, kann für das Input-Output-Modell entweder eine Transformation zu einem besonders hoch belasteten Punkt oder z. B. der Schadstoffgehalt an der Stelle der Wasserentnahme benutzt werden oder wiederum ein Durchschnittswert berechnet werden. Ein Beispiel für die Bestimmung eines Transformationskoeffizienten aus den Modellergebnissen für einen besonders belasteten Punkt wird in Abb. 5.8 gezeigt. Zur Bestimmung des Transformationskoeffizienten  $a_{ij}$  werden hierbei die Einträge (Liefermenge  $X_{ij}$ ) ins Verhältnis zur ermittelten Punktkonzentration als Referenzwert (Produkt  $X_j$ ) gesetzt.

Im betrachteten Beispiel beträgt die Konzentration an einem besonders belasteten Punkt 0,1 mg/l anorganischer Phosphor. Als durchschnittlicher Export von Phosphor aus dem Einzugsgebiet wurde nach (Johnes 1996) 0,06 kg/ha·a bestimmt. Somit kann hier ein Transformationskoeffizient für „Düngemiteleintrag → P-Konzentration“ von 0,6  $[(kg \cdot l)/(mg \cdot ha \cdot a)]$  bestimmt werden.



**Abbildung 5.8:** Koeffizientenbestimmung aufgrund besonders hoch belasteter Punkte, hier für gelösten anorganischen Phosphor

Eine weitere Möglichkeit ist es, ein Gewässer oder einen Speicher als gut durchmischten Reaktor anzusehen. Hier können dann Durchschnittskonzentrationen zur Ermittlung der Transformationskoeffizienten „Konzentration im Zufluss“/„Konzentration im Speicher“ zu verwenden. Ein solcher „durchmischte Reaktor“ ist eine vereinfachende Annahme, die vor allem am Anfang einer Untersuchung oder für globale Abschätzungen ein geeigneter Ansatz ist.

Das jeweilige Selbstreinigungspotential des Gewässers wird als Eigenverbrauch modelliert. Wird Bewässerungslandwirtschaft betrieben, ist ein enger Zusammenhang zwischen Bewässerungswassermenge und im Drainagewasser vorhandenen Nähr- und Schadstoffen zu verzeichnen. Diese Verknüpfung ist weiterhin abhängig von Bodenparametern und verschiedenen Bewässerungsmethoden.

Da hohe Nähr- und Schadstoff-Konzentrationen nicht als "gut" definiert sind, muss im Wassergüte-Modell ein Einsparpotential als weiterer Sektor definiert werden. Dadurch werden negative Einflüsse positiv definiert.

Mit der so gewonnenen Transformationsmatrix kann anschließend beispielsweise ein Landnutzungsszenario aufgrund vorgegebener Wassergütestandards berechnet werden. Hierfür werden bestimmte Endstandards für die Konzentration von Schad- und Nährstoffen definiert, die dann als Endverbraucher des Input-Output-Modells gesetzt werden.

Auch können Vorschläge zum Ausgleich von Produktionseinbußen in der Landwirtschaft aufgrund der einzusparenden Nährstoffe ermittelt werden. Somit kann eine Substitution von landwirtschaftlichem Einkommen mit Ausgleichszahlungen bestimmt werden.

### **Kopplung von Wassergüte- und Wassermengen-Modell**

Beim Zusammenfassen des Wassergüte- mit dem Wassermengenmodell lässt sich zunächst grob eine Fallunterscheidung in drei grundsätzliche Fälle machen:

1. Wassermenge und Qualität sind unabhängig voneinander
2. Wassergüte hängt direkt von der Wassermenge ab
3. komplexere Verflechtungsbeziehungen zwischen Wassermenge und -güte (z. B. wenn die Wassermenge nur eine von vielen verschiedenen Einflussgrößen auf die Wassergüte ist oder bei komplex verflochtenen Entnahmen und Einleitungen).

### **Systeme, in denen Wassergüte und Wassermengen unabhängig voneinander sind**

Bestimmte Arten der Landnutzung oder Wassernutzung führen zu einem Qualitätsproblem, das aber nicht wassermengenabhängig ist. Hier können die unterschiedlichen Teilsysteme für Wassergüte und Wassermengen in unterschiedlichen Teilmatrizen derselben Transformationsmatrix dargestellt



werden. Die Berechnung erfolgt dann in einem einzelnen Berechnungsschritt. Die Belastung des Wassers mit Schadstoffen kann beispielsweise dann separat von Wassermengen betrachtet werden, wenn der Eintrag eines Schadstoffes an sich in seiner Gesamtmenge als problematisch angesehen wird und nicht wie beispielsweise bei Nährstoffeinträgen die jeweilige Verdünnung eine entscheidende Rolle spielt.

### **Systeme mit direkter Kopplung von Wassergüte und Wassermenge**

In einigen Systemen hängen Wassergüteparameter direkt von der Wassermenge ab. Beispielsweise kann ein direkter Zusammenhang zwischen Wassertemperatur und der im Fluss geführten Wassermenge bei hohen Außentemperaturen hergestellt werden. Ein Verdünnungseffekt kann einen weiteren direkten Zusammenhang zwischen Wassermenge und Wassergüte darstellen. In der Bewässerungswirtschaft ist ebenfalls ein direkter Zusammenhang zwischen Wassermenge und Wassergüte im Drainagewasser zu verzeichnen. Diese Effekte können wie eine Mehrfachnutzung des Wassers über eine kaskadierende Betrachtungsweise modelliert werden. Die Wassermenge geht also hierbei sowohl bei den physikalischen Habitatparametern als auch bei den Wassergüteparametern ein.

Eine Kopplung kann entweder über eine Gleichung außerhalb der Transformationsmatrix oder über die Einführung einer virtuellen Ressourcen-Börse erfolgen.

### **Komplexere Wirkzusammenhänge**

Beispielhaft für komplexere Wirkzusammenhänge soll hier ein Szenario erwähnt werden, bei dem der Parameter Wassermenge über zwei unterschiedliche Wirkpfade auf die Flussökologie einwirkt. Die Wassermenge steht über Abflussfaktoren direkt mit der Flussökologie in Verbindung. Sie wirkt jedoch auch indirekt über den Faktor Temperaturvermeidung. Bei solchen Konstellationen sollte die Verknüpfung über einzelne Eigenschaften der Wassermenge dargestellt werden.

Wassermenge → Flussökologie

Wassermenge → Temperaturvermeidungsfaktor

Temperaturvermeidungsfaktor → Flussökologie

In diesem Beispiel könnte die Eigenschaft „Wasser mit seiner Wärmekapazität“ und „Wasser als Lebensraum mit Fließgeschwindigkeit und Wassertiefe“ separat aufgeschlüsselt werden.

### **Weitere Verknüpfungen von Wassermenge und Wassergüte**

Eine weitere Verknüpfung kann über finanzielle Parameter stattfinden. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn aufgrund einer Verschmutzung bzw. deren Vermeidung Kosten entstehen (z. B. Reinigungskosten). Weiterhin ist eine Kopplung über landwirtschaftliche Produktionsmengen möglich, da Bewässerungswassermenge, Düngemiteleininsatz sowie Menge und Konzentration von Drainagewasser in einem direkten Verhältnis zur Erntemenge stehen. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass dies immer nur für einen kleinen Bereich der Werte gilt, da beim Pflanzenwachstum stets das Minimumprinzip gilt und somit bei Ausfall von Düngung oder Bewässerung überhaupt keine Produktion möglich ist, unabhängig davon, wieviel von der jeweils anderen Ressource zur Verfügung gestellt wird.

## **5.5 Ablauf der Berechnung von Szenarien**

### **5.5.1 Generierung und Verifikation von Szenarien**

IO-Modelle eignen sich sowohl zur Verifikation von vorhandenen Szenarien als auch zur Generierung von gültigen Szenarien durch Belegung des Endverbrauchervektors. Ein Szenario ist bestimmt durch die Nachfrage der Endverbraucher  $U_i$ .

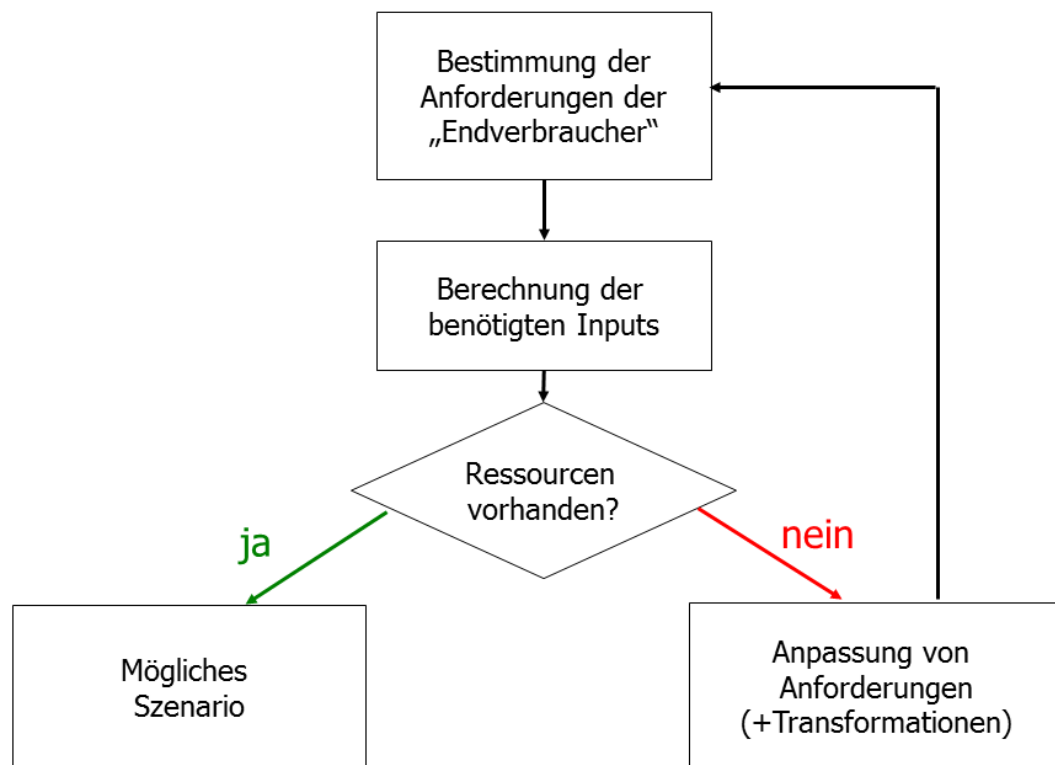
In volkswirtschaftlichen Modellen können so benötigte Produktionsmengen bestimmt werden. Bei der Modellierung mit natürlichen Ressourcen als Input ist jedoch eine Erhöhung der Input-Mengen nur bedingt möglich, daher müssen Szenarien, die größere Anforderungen haben als mit den

## 5 Anpassung von Input-Output-Modellen an wasserwirtschaftliche Problemstellungen

---

vorhandenen Ressourcen lieferbar, angepasst werden. „Maximal mögliche“ Ressourcennutzung kann demnach iterativ durch Anpassung des Anforderungsvektors bestimmt werden. Die Produktion ist hier durch die Menge der vorhandenen Primärintputs limitiert.

Die Endverbraucher im Anforderungsvektor können einerseits bestimmte Mindestanforderungen an das System, wie beispielsweise ein ökologischer Mindestwasserabfluss sein, andererseits aber auch eine gewünschte Verteilung von Ressourcen wie beispielsweise Nutzung als Trinkwasser, Brauchwasser etc. darstellen. Der Endverbrauchervektor stellt also so etwas wie ein „Wunschscenario“ dar, in dem gewünschte oder benötigte Produktionsmengen festgelegt werden. Im darauffolgenden Schritt wird dann evaluiert, ob die Ressourcen dafür überhaupt verfügbar sind.



**Abbildung 5.9:** Iterativer Ablauf der Berechnung

### Iterativer Modellablauf

Wie schon im obigen Abschnitt erwähnt, ist es bei der Verwendung natürlicher Ressourcen nicht immer möglich, alle Endverbraucher maximal mit ihren Inputs zu versorgen. Daher wird stets eine Abwägung verschiedener Nutzungsarten erforderlich sein. In einigen Fällen gibt es kein systemimmanentes Optimum, sondern es müssen die unterschiedlichen Nutzungsansprüche gegeneinander abgewägt werden. Bei stark vernetzten Systemen, wie es bei Mehrzweckspeichern der Fall ist, kann es daher von Vorteil sein, auf einfache Weise berechnen zu können, wie sich eine Veränderung einzelner Anforderungen auf das Gesamtsystem auswirkt, bzw. wo stattdessen ein Ausgleich geschaffen werden muss. Das hier entwickelte Modell soll helfen, mögliche Szenarien zu generieren. Die Auswahl eines Szenarios für die weitere Planung muss jedoch dann von Experten und den Entscheidungsträgern getroffen werden. Um automatisiert gültige Szenarien zu erzeugen, kann ausgehend von gewünschten Anforderungen durch schrittweise Modifizierung der einzelnen Anforderungen der Endverbrauchervektor  $U$  angepasst werden. Hierbei können einzelne Mindestanforderungen jeweils als fest angesehen werden, während die anderen Nachfragen schrittweise so verändert werden, dass ein mögliches Szenario entsteht. Durch diesen iterativen Modellablauf wird ein ganzes Feld möglicher Vektorbelegungen für die Verbraucher bestimmt. Dies gibt Entscheidungsträgern die Möglichkeit, aus den unterschiedlichen Nutzungsszenarien das für sie günstigste auszusuchen.

## 5.6 Optimierung

Sofern es für das jeweilige System (planerisch) sinnvoll und (mathematisch) möglich ist, kann auf Basis des oben beschriebenen Input-Output-Modells anschließend eine lineare Optimierung (s. Abschnitt 4.5) durchgeführt werden. Dies kann dazu dienen, optimale Szenarien nach bestimmten politisch vorgegebenen Verbraucher-Ansprüchen zu generieren. Eine Abwägung, wann eine lineare Optimierung sinnvoll ist und wann besser nur unterschiedliche Nutzungsszenarien generiert werden, muss vom jeweiligen Planer geleistet werden.

Wird eine lineare Optimierung durchgeführt, ist es wichtig, die Ressourcen, die für ein Projekt verfügbar sind, als Restriktionen für die Primärinputs zu

## 5 Anpassung von Input-Output-Modellen an wasserwirtschaftliche Problemstellungen

---

integrieren. Mindest- oder Höchstproduktionsmengen, beispielsweise für ökologische Habitatansprüche oder landwirtschaftliche Produktionsmengen, werden in den Ungleichungen angegeben. Bei einer Mehrproduktion eines Sektors wird davon ausgegangen, dass diese Menge entweder zusätzlich "verbraucht" wird z. B. bei ökologischen Faktoren, oder dass sie zum Export oder der Lagerhaltung dienen kann.

Zunächst wird aus einem durch das oben beschriebene iterative Verfahren eine "mögliche" Lösung des linearen Programmierproblems ausgesucht und als Ausgangsbasis gewählt, bzw. werden Produktionsaktivitäten sowie Aktivitäten ungenutzter Primärintputs festgelegt.

Aufgrund dieser möglichen Lösung kann dann mit dem Simplex Algorithmus eine optimale Lösung gesucht werden.

Eine Nutzung des Modells als Basis einer linearen Optimierung ist nur dann sinnvoll, wenn die Qualität der Ausgangsdaten des Modells ausreicht. Dies kann insbesondere in frühen Phasen der Planung schwierig sein. Daher ist immer abzuwägen, ob die Datenlage eine Optimierung der Szenarien schon erlaubt, oder ob es je nachdem sinnvoller ist, zunächst einmal Serien von möglichen Szenarien als Szenarienvektor zu berechnen und die Entscheidung über besonders positive Varianten, die dann weiter verfolgt werden, zunächst politisch oder zumindest „von Hand“ zu handhaben. In Kapitel 6 wurde daher eine Optimierung nur für die Fallstudien an der unteren Argen und für den Mehrzweckspeicher Kandadji beispielhaft durchgeführt.

## 6 Fallstudien

Um die in den vorigen Kapiteln erarbeitete Methodik an praktischen Beispielen zu verifizieren und das Modell weiterzuentwickeln, wurden Fallstudien zu unterschiedlichen Wasserkraftanlagentypen und Mehrzweckspeicher-Nutzungsarten durchgeführt.

Um die grundsätzliche Anwendbarkeit der Input-Output-Analyse auf Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher zu untersuchen, wurde zunächst ein sehr einfaches schwach vernetztes System eines Ausleitungskraftwerks an der Drau in Österreich untersucht. Hierbei wurde vor allem auf die Vernetzung von Wasserdargebot, energetischer Nutzung und Flussökologie eingegangen.

Die Integration von Bewässerung und Landnutzungsparametern in einem Input-Output-Modell wurde anhand eines Bewässerungssystems in Venezuela untersucht. Hierbei werden vor allem auch sozioökonomische Aspekte mit integriert.

In einer weiteren Fallstudie wurde ein Ausleitungskraftwerk an der unteren Argen mit gleichzeitiger Wasserentnahme zur Bewässerung untersucht.

Als sehr stark vernetztes System wird das Kandadji-Projekt am Niger, ein typisches Mehrzweckspeicher-Projekt mit Bewässerung, Wasserkraft und Trinkwassergewinnung, betrachtet. Schließlich wird, um die Bandbreite der Anwendbarkeit des entwickelten Modells darzustellen, eine Fallstudie für ein Gezeitenkraftwerk zusammen mit einer Landnutzungs-Wassergütemodellierung im Küstenbereich eingegangen.

Für diese unterschiedlichen System- und Anlagenarten wurden jeweils qualitative Modelle aufgestellt, die dann für die einzelne Fallstudie quantifiziert wurden.

## **6.1 Fallstudie Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob an der Drau in Österreich**

In einer ersten Fallstudie sollte die prinzipielle Anwendbarkeit der Input-Output-Analyse auf Wasserkraftanlagen gezeigt werden. Hierzu wurde zunächst ein recht einfaches, nur schwach vernetztes System ausgewählt. Neben den Speicherkraftwerken sind Laufwasserkraftwerke die häufigste Art der Wasserkraftgewinnung. Sie sind als Grundlastkraftwerke ausgelegt. Eine häufige Art der Laufwasserkraftwerke ist das Ausleitungskraftwerk.

Das Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob ist eine der Staustufen, die die österreichische Verbund AG an der Drau betreibt. Für dieses Draukraftwerk liegen aus vorhergehenden Studien (Petschunik u. a. 2002b, a) bereits sehr viele Daten zum Betrieb und der Ökologie vor. Daher konnten die einzelnen Modellparameter für diese Fallstudie sehr genau bestimmt werden. Hauptsächlich konkurrieren hier die Flussökologie und die energetische Nutzung.

Da es hier aber nur wenige konkurrierende Nutzungsarten gibt, sind die Input-Output-Matrix und der Anforderungsvektor recht klein.

### **6.1.1 Projektdaten für das Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob**

Das Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob ist eines von 10 Kraftwerken, die die VERBUND Austrian Hydro Power AG an der Drau in Kärnten betreibt. Die Anlage wurde in den Jahren 1970-1974 erbaut (Petschunik u. a. 2002b). Innerhalb der Draukette ist es die einzige Anlage, die als Ausleitungskraftwerk konzipiert ist. Vom Wehr St. Martin bis zum Kraftwerk besteht eine 6,5 km lange Ausleitungsstrecke. Tabelle 6.1 zeigt einige Anlagen- und Betriebsdaten.

## 6.1 Fallstudie Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob an der Drau in Österreich

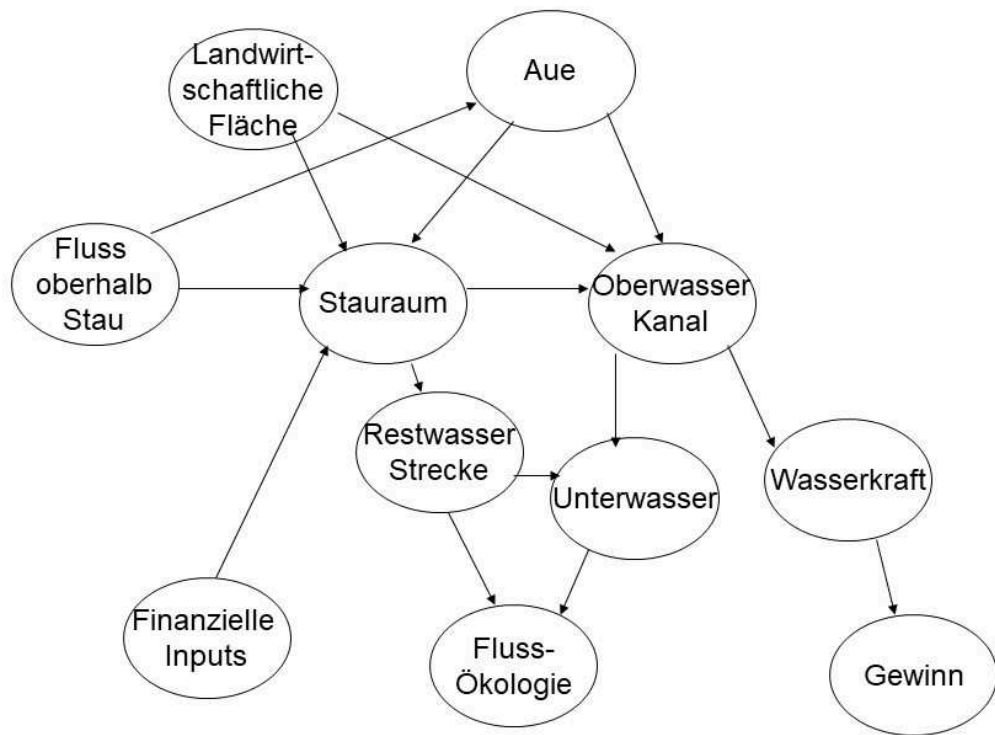
Ausbauabfluss	395 $m^3/s$
Mittlerer Jahresabfluss	205 $m^3/s$
$HQ_{100}$	bis zu 2300 $m^3/s$
Fallhöhe	22.7 m
Mittlere Jahresproduktion	338 Mio kWh
Leistung	80 MW
Leistungsüberschlagbeiwert $c_p$	8,1 $kg/s^2 \cdot m^2$
Ausleitungsstrecke	6.5 km

**Tabelle 6.1:** Betriebsdaten des Ausleitungskraftwerks Rosegg-St. Jakob

### 6.1.2 Ein qualitatives Modell für das Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob

Zunächst wurden die Systemgrenzen festgelegt und die Anlage und ihre Umgebung als einzelne Kompartimente aufgeteilt. Sodann wurden die verschiedenen Stoff-, Energie- und Geldströme zwischen diesen betrachtet. Daraus wurde dann ein Input-Output-Graph (s. Abb. 6.1) erstellt. Die dazugehörige Adjazenzmatrix ist in Tabelle 6.2 dargestellt.





**Abbildung 6.1:** Input-Output-Graph für das Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob

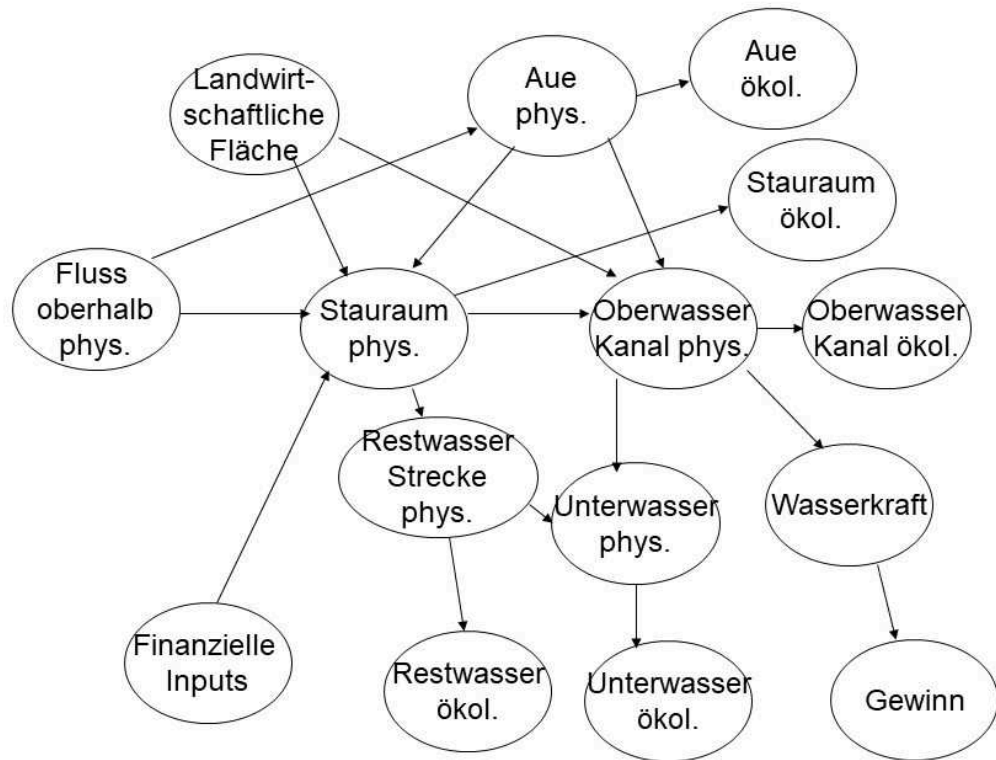
## 6.1 Fallstudie Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob an der Drau in Österreich

	$F_{ob}$	LaFl	Aue	$M_{in}$	$F_{sr}$	$F_{rw}$	$F_{ow}$	$F_{uw}$	WK	$M_{out}$	$F_{oekol}$
$F_{ob}$	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
LaFl	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
Aue	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
$M_{in}$	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
$F_{sr}$	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
$F_{rw}$	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1
$F_{ow}$	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
$F_{uw}$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
WK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
$M_{out}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
$F_{oekol}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$F_{ob}$  Fluss oberhalb      LaFl    Landwirtschaftliche Fläche  
 $M_{in}$     Finanzielle Inputs     $F_{sr}$     Stauraum  
 $F_{rw}$     Restwasserstrecke     $F_{ow}$     Oberwasserkanal  
 $F_{uw}$     Unterwasser      WK      Wasserkraft  
 $M_{out}$     Gewinn               $F_{oekol}$     Flussökologie

**Tabelle 6.2:** Adjazenzmatrix des Input-Output-Graph für das Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob

Wenn man auf verschiedene Teilaspekte pro Ressource aufteilt, kann der Input-Output-Graph für das Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob (s. Abbildung 6.2) durch die Adjazenzmatrix in Tabelle 6.3 dargestellt werden.



**Abbildung 6.2:** Input-Output-Graph für das Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob mit aufgeteilten physikalischen und ökologischen Ressourcen

## 6.1 Fallstudie Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob an der Drau in Österreich

	$F_{ob}$	$L$	$A^p$	$A^{oe}$	$M_{in}$	$F_{sr}^p$	$F_{sr}^{oe}$	$F_{rw}^p$	$F_{rw}^{oe}$	$F_{ow}^p$	$F_{ow}^{oe}$	$F_{uw}^p$	$F_{uw}^{oe}$	$WK$	$M_{out}$
$F_{ob}^p$	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$L$	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
$A^p$	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$A^{oe}$	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$M_{in}$	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0
$F_{sr}^p$	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$F_{sr}^{oe}$	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$F_{rw}^p$	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0
$F_{rw}^{oe}$	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0
$F_{ow}^p$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
$F_{ow}^{oe}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
$F_{uw}^p$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
$F_{uw}^{oe}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
$WK$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$M_{out}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

- |                             |                                |
|-----------------------------|--------------------------------|
| $F_{ob}$ Fluss oberhalb     | $L$ Landwirtschaftliche Fläche |
| $A$ Aue                     | $M_{in}$ Finanzielle Inputs    |
| $F_{sr}$ Stauraum           | $F_{rw}$ Restwasserstrecke     |
| $F_{ow}$ Oberwasserkanal    | $F_{uw}$ Unterwasser           |
| $WK$ Wasserkraft            | $M_{out}$ Gewinn               |
| $X^p$ Sektor X physikalisch | $X^{oe}$ Sektor X ökologisch   |

**Tabelle 6.3:** Adjazenzmatrix des Input-Output-Graph für das Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob mit aufgeteilten physikalischen und ökologischen Ressourcen

### **6.1.3 Quantifizierung der Modellparameter für das Kraftwerk Rosegg-St. Jakob**

Wie aus dem qualitativen Modell ersichtlich ist, sind als „Endverbraucher“ hier die elektrische Energie bzw. der Gewinn aus dieser Stromgewinnung sowie eine ökologische Mindestwassermenge zu betrachten. Primäre Inputs sind der Wasserzufluss, Flächen und finanzielle Inputs. Eine weitere Möglichkeit ist es, ökologische Ausgleichsflächen als „Endverbraucher“ zu quantifizieren. Für die Quantifizierung der verschiedenen Transformationskoeffizienten wurden Ergebnisse einer Studie der Verbund AG (Petschunik u. a. 2002a, b) als Ausgangsparameter genutzt.

### **6.1.4 Bestimmung von Transformationskoeffizienten**

Eine wichtige „Währung“ im System Rosegg-St. Jakob ist die im jeweiligen Teilsystem umgewandelte Energie.

#### **Flussökologie**

Die im jeweiligen Flussabschnitt umgewandelte Energie kann als Input in das jeweilige ökologische System gewertet werden, da beispielsweise die Turbulenz und die Sohlschubkräfte eine wichtige Rolle für die im Fluss vorhandenen Spezies darstellen. Der ökologische Wert kann entweder in WUA oder in Punkten dargestellt werden.

#### **Wasserkraft**

Für die Bestimmung der Transformationskoeffizienten für die Wasserkraft wird die Fallhöhe sowie der Leistungsbeiwert oder der Wirkungsgrad benutzt. Die Berechnung erfolgt analog zu Gleichung 5.2.

$$a_{ij} = P/Q = c_P \cdot h_f \quad (6.1)$$

Für die Energieinputs wurde davon ausgegangen, dass der Staauraum für 2/3 und der Oberwasserkanal für 1/3 der Rohfallhöhe von 24 m

verantwortlich ist (Petschunik u. a. 2002b).

Fluss oberhalb	→	Stauraum mechanisch	152 [kW·s/m <sup>3</sup> ]
Stauraum mechanisch	→	Oberwasserkanal	1,45 [kW/kW]
Oberwasserkanal	→	Wasserkraft	0,81 [kW/kW]

## Aue

Für die ökologische Bedeutsamkeit der Aue ist ein gewisser Energieeintrag nötig. Dieser Energieeintrag kann für die Transformation Energie → ökologische Wertigkeit verwendet werden. Die Bewertung der ökologischen Bedeutsamkeit erfolgt in Punkten.

## Stauraum und Oberwasserkanal

Ehemalige Aue und landwirtschaftliche Flächen werden durch den Stauraum und den Oberwasserkanal benutzt. Hierbei wird eine durchschnittliche Fläche pro Kubikmeter angesetzt. Die Gesamtwasserfläche wird in (Petschunik u. a. 2002a) mit 387 ha angegeben. Allerdings ist dies ungenau, da hier auch die Flächen, die schon immer zum Fluss gehört haben, mit in die Berechnung eingehen. Daher wurden aus den Lageplänen in Petschunik u. a. (2002a) die entsprechenden Flächen abgeschätzt. Es kann etwa von 220 ha neu überfluteten Flächen ausgegangen werden. Das Stauvolumen beträgt ca. 32 Mio. m<sup>3</sup>. Aufgrund der in Petschunik u. a. (2002a) angegebenen Flächen und Volumina wurde ein Transformationskoeffizient von 0,07 bestimmt.

## Finanzielle Inputs

Finanzielle Inputs gehen einerseits in den Bau der Anlage, andererseits in den Unterhalt des Staus (Baggerkosten) sowie die Förderung ökologischer Massnahmen. Baukosten können über die Betriebsdauer verteilt als Abschreibung pro produzierter Energie eingehen. Insgesamt wurde für den Stauraum eine Transformation von 0,34 Euro/m<sup>3</sup> angesetzt. Für ökologische

## 6 Fallstudien

Maßnahmen wurde ein Preis von 20 Euro pro m<sup>2</sup> Ausgleichsfläche angesetzt (Turner u. a. 2007). Sollen nur einzelne Maßnahmen finanziell unterstützt werden, können auch weit niedrigere finanzielle Inputs angesetzt werden.

### Gewinn

Die Transformation Wasserkraft nach Gewinn wird aufgrund von aktuellen Marktpreisen errechnet. Die Presse.com (2012) gibt einen Durchschnittspreis von 56 Euro/MWh an.

### Transformationsmatrix

Mit den in den vorherigen Abschnitten bestimmten Transformationskoeffizienten wurde aus der Adjazenzmatrix eine Transformationsmatrix erstellt (s. Tab. 6.4).

	$F_{ob}$	LaFl	Aue	$M_{in}$	$F_{sr}$	$F_{rw}$	$F_{ow}$	$F_{uw}$	WK	$M_{out}$	$F_{oekol}$
$F_{ob}$	0,1	0	1	0	152	0	0	0	0	0	0
LaFl	0	0,14	0	0	0,15	0	1	0	0	0	0
Aue	0	0	1	0	0,14	0	0	0	0	0	0
$M_{in}$	0	0	0,05	0	1	0	0,34	0	0	0	0
$F_{sr}$	0	0	0	0	0,02	1	1,45	0	0	0	0
$F_{rw}$	0	0	0	0	0	0,1	0	1	0	0	0
$F_{ow}$	0	0	0	0	0	0	0,01	1	0,81	0	0,18
$F_{uw}$	0	0	0	0	0	0	0	0,02	0	0	0,22
WK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0178	0
$M_{out}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
$F_{oekol}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

$F_{ob}$	Fluss oberhalb	LaFl	Landwirtschaftliche Fläche
$M_{in}$	Finanzielle Inputs	$F_{sr}$	Stauraum
$F_{rw}$	Restwasserstrecke	$F_{ow}$	Oberwasserkanal
$F_{uw}$	Unterwasser	WK	Wasserkraft
$M_{out}$	Gewinn	$F_{oekol}$	Flussökologie

**Tabelle 6.4:** Transformationsmatrix für das Ausleitungskraftwerk Rosegg-St. Jakob

### 6.1.5 Evaluation von Nutzungsszenarien

Für die Bewertung unterschiedlicher Nutzungsszenarien wurden verschiedene Kombinationen von Nutzungsanforderungen als Vektor aufgestellt. Aus diesen Endverbrauchervektoren wurden die für diese Nutzungsart benötigten Ressourcen berechnet. Anschliessend wurden diese Ansprüche mit den vorhandenen Ressourcen verglichen und damit die Szenarien evaluiert.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Wasserkraft	300 Mio kWh/a	338 Mio kWh/a	338 Mio kWh/a
Ökologie Fluss	8	8	6
Aue	6	6	5
Mögliches Szenario?	ja	ja	nein

**Tabelle 6.5:** Evaluation von Nutzungsszenarien

Die Modellergebnisse in Tabelle 6.5 deuten darauf hin, dass mit einer geringfügigen Einschränkung der Energieproduktion die ökologische Wertigkeit von Fluss und Aue erheblich erhöht werden kann.

### 6.1.6 Bewertung der Fallstudie Rosegg-St. Jakob

In dieser Fallstudie konnte prinzipiell der Einsatz der Input-Output-Analyse für Wasserkraftanlagen evaluiert und verifiziert werden. Die hier entwickelte Methodik eignet sich daher sehr gut als Vorstudie für Untersuchungen über Ausleitungskraftwerke, bei denen für die Wassernutzung eine stärkere Konkurrenzsituation besteht. Das qualitative System, das hier entwickelt wurde, kann für die Bearbeitung anderer Fallbeispiele als Grundlage genutzt werden. Hier könnte das Modell als Kernsystem gesehen werden, an das die anderen konkurrierenden Nutzungsarten angebaut werden können.

Da beim Kraftwerk Rosegg-St. Jakob nur ein sehr einfaches vernetztes System besteht, ist für eine realistische Projektbewertung vermutlich der Einsatz verschiedener genauerer Einzelmodelle besser, da dann auf eine Linearisierung verzichtet werden kann. Es zeigt sich, dass bei sehr einfachen Systemen die Verwendung der Input-Output-Analyse nur in Einzelfällen sinnvoll ist. Dennoch ist es möglich, das in dieser Fallstudie entwickelte System als Grundlage zu verwenden, um darauf aufbauend komplexere Sys-



## 6 Fallstudien

---

teme weiter zu untersuchen. Weiterhin wäre die Input-Output-Modellierung eines solchen einfachen Systems auch dann sinnvoll, wenn das Modell in ein komplexeres regionales oder nationales Input-Output-Modell integriert werden sollte. Hier würde sich eine genaue Aufstellung des ökologisch-ökonomischen Systems anbieten.

## 6.2 Fallstudie Bewässerungssystem El Diluvio-Palmar

Neben der in der vorigen Fallstudie betrachteten Wasserkraft ist die Bewässerung ein häufiger (Mehrzweck-)nutzen von Stauseen oder Ausleitungen von Gewässern. Anders als bei der Wasserkraft, wo hauptsächlich das Gewässer selbst sowie die Aue betrachtet werden, muss hier die Systemgrenze wesentlich weiter gesteckt werden. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Bewässerungs- und Anbauszenarien herausgearbeitet. Insbesondere wurden hier sozioökonomische und ökonomische Effekte verschiedener Szenarien untersucht, um passende Transformationskoeffizienten zu gewinnen.

Weiterhin wurde, basierend auf der Export-Koeffizienten-Methode nach Johnes (1996) (s. Abschnitt 3.7.1, Seite 25), ein System von Transformationskoeffizienten für die Wassergüte in der Bewässerungslandwirtschaft entwickelt.

Das Bewässerungssystem El Diluvio - Palmar besteht aus einem Mehrzweckspeicher, der auch Trinkwasser für die Nachbarstädte, insbesondere Maracaibo, zur Verfügung stellen soll, sowie einem System von Pipelines und Kanälen für die Bewässerung (Odebrecht 2016; Italiano 2010; Haas 2010). In Tabelle 6.6 sind einige Betriebsdaten und Komponenten des Systems dargestellt.

**Tabelle 6.6:** Daten und Komponenten des El Diluvio-Palmar Bewässerungssystems (Odebrecht 2016; Italiano 2010)

El Diluvio Damm	Erddamm
Höhe	75 m
Überflutete Fläche	750 ha
Nutzbares Volumen	180 Millionen $m^3$
Hauptpipeline	9 km
Kanal	39 km
Ausbaudurchfluss $Q_a$	11,4 $m^3/s$
Bewässerbare Fläche	10000 ha
Verteilungssystem	kleinere Pipelines

Auf Grundlage der hier vorhandenen Ressourcen sollen in einem ersten Schritt 3000 ha bewässerte landwirtschaftliche Fläche zur Verfügung gestellt werden, später sollen weitere 7000 ha an die Bewässerung angeschlossen werden (Odebrecht 2016).

### **6.2.1 Szenarien**

Zunächst wurde ein Untersuchungsgebiet von 500 ha ausgewählt, für das verschiedene Landnutzungsszenarien und Bewässerungsmethoden evaluiert werden sollten. Das Gebiet wurde so ausgewählt, dass es als relativ typisch für das Gesamtprojekt gelten kann. Dabei wurde darauf geachtet, dass die hier vorhandenen Flächen qualitativ für verschiedene landwirtschaftlichen Nutzung geeignet sind.

Es wurden drei Hauptszenarien aufgestellt:

- Aufteilung in 200 Selbstversorgerfarmen, die jeweils eine Familie versorgen
- Aufteilung in 3 Kooperativen, die jeweils ein Produkt für den lokalen/regionalen Markt anbauen
- industrieller Anbau eines Produkts für den überregionalen oder Weltmarkt.

#### **Selbstversorgerfarmen**

In dem Gebiet Diluvio-Palmar wurden als soziales Projekt sogenannte „Communal Towns“ eingerichtet, die aus einzelnen Selbstversorgerfarmen oder Kooperativen bestehen (Odebrecht 2016). Im hier betrachteten Szenario wird das Land in 2,5 ha große Farmen unterteilt, auf denen jeweils eine fünfköpfige Familie ihr Auskommen hat. Die angebauten Produkte wurden auf der Grundlage einer „2000 kcal/Person · Tag“-Diät bestimmt.

Der Produktmix wurden nach ortsüblichen Ernährungsgewohnheiten ausgewählt.

Es gelte die Annahme, dass bei den Selbstversorgen die Bewirtschaftung und die Bewässerung einen eher geringeren Technisierungsgrad haben.

### **Kooperativen**

Die Gesamtfläche wird von drei Kooperativen unabhängig voneinander bewirtschaftet. Ausgangspunkt ist wiederum, dass hier insgesamt 200 Familien versorgt werden sollen. Das Einkommen aus dem Verkauf der landwirtschaftlichen Produkte wird gleichmässig unter den Familien aufgeteilt. Jede der Kooperativen baut auf ihrer gesamten Fläche ein spezialisiertes Produkt an. Zum Vergleich wurden zwei unterschiedliche Produktkombinationen betrachtet. Im ersten Szenario werden Tomaten, Bananen und Maniok angebaut, im zweiten Baumwolle, Mais und Mango. Diese Szenarien wurden gewählt, da das erste zumindest teilweise für einen lokalen Markt innerhalb der Region produziert, während das zweite aus Produkten für einen globaleren Markt besteht.

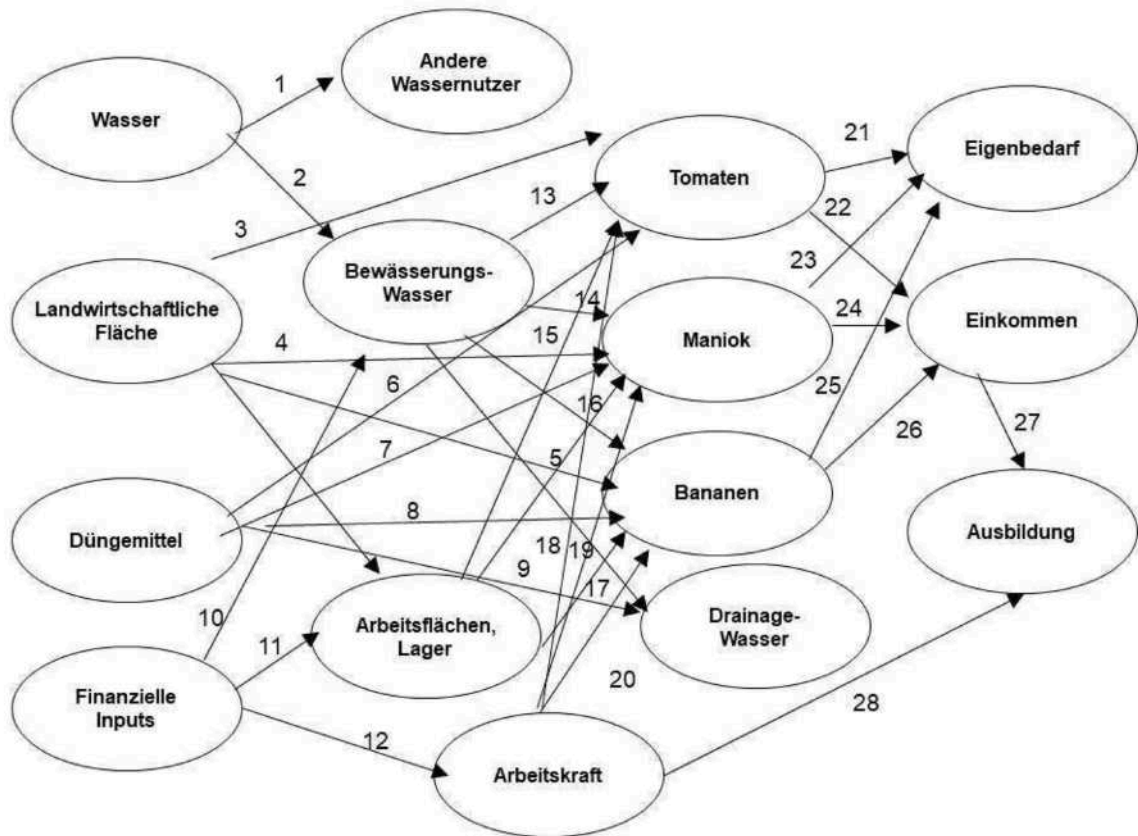
### **Industrielle Bewirtschaftung**

Die Grundannahme bei der industriellen Bewirtschaftung ist, dass auf der gesamten Fläche nur ein einziges landwirtschaftliches Produkt angebaut wird, das sich auch zu Weltmarktpreisen lohnt. Es wurde die Produktion von Mais, Baumwolle und Bananen betrachtet. Bei der industriellen Bewirtschaftung wurden auch effizientere Bewässerungsmethoden wie beispielsweise die Tropfbewässerung betrachtet. Auf dem industriellen Farmbetrieb arbeiten Landarbeiter auf Lohnbasis. Daher muss im Anforderungsvektor nicht nur das Einkommen der Arbeiter sondern auch ein Gewinn für das Unternehmen enthalten sein.

### **6.2.2 Bestimmung von qualitativen Modellen**

Zunächst wurde ein allgemeiner Graph für die Bewässerung aufgestellt, der sich für verschiedenartige Szenarien genauer ausdifferenzieren lässt. Je nach gewünschten Outputs und Produkten wurde ein gesonderter Graph aufgestellt. Für die Fallstudie wurden die Systemgrenzen recht eng gehalten,

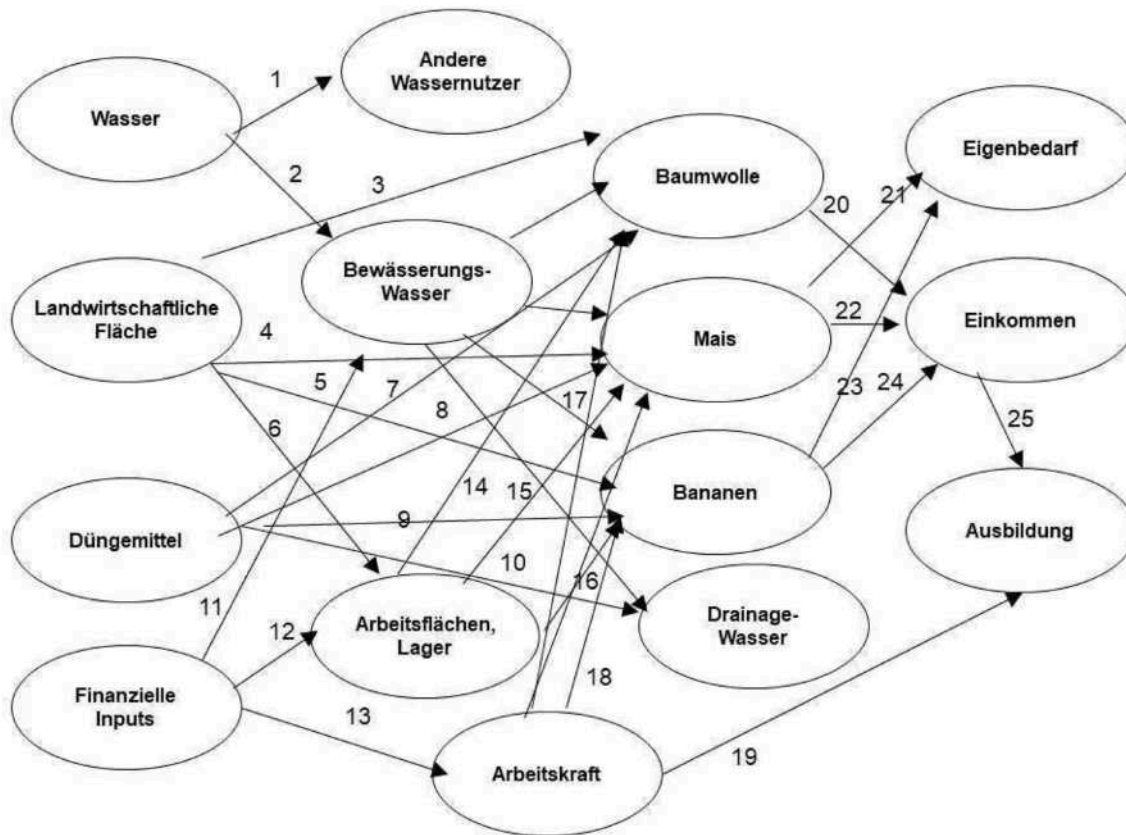
so dass nur das 500 ha große Untersuchungsgebiet zu betrachten war und etwaige weitere großskaligere Einflussfaktoren keine Rolle spielten.



**Abbildung 6.3:** Input-Output-Graph für das Bewässerungsprojekt El Diluvio-Palmar für das Kooperativen-Szenario I mit den Anbauprodukten Tomaten, Maniok, Bananen für den lokalen Markt

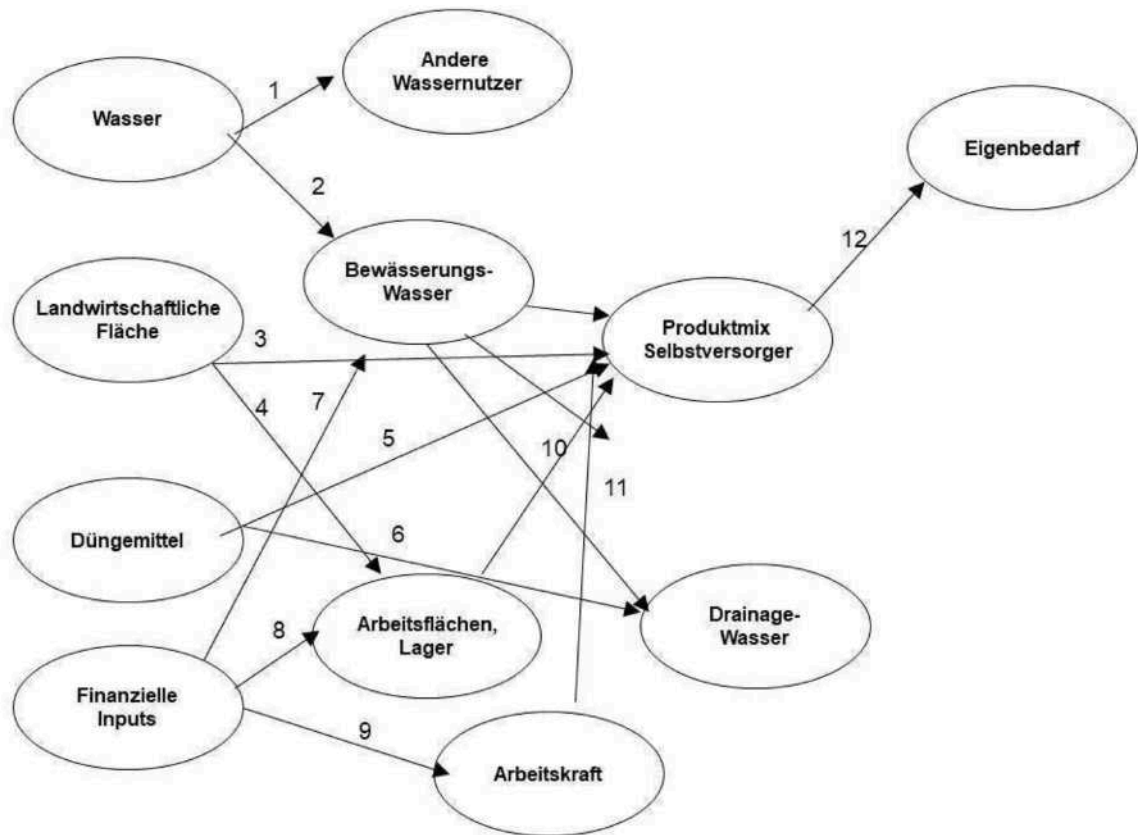
Das in 6.3 dargestellte System zeigt ein Szenario mit Produkten, die für den lokalen Markt von drei unabhängigen Kooperativen angebaut werden.

## 6.2 Fallstudie Bewässerungssystem El Diluvio-Palmar



**Abbildung 6.4:** Input-Output-Graph für das Bewässerungsprojekt El Diluvio-Palmar für das Kooperativen-Szenario II mit den Anbauprodukten Baumwolle, Mais und Bananen für teilweisen Export

Das in 6.4 dargestellte System zeigt ein Szenario mit Produkten, die für den Export von drei unabhängigen Kooperativen angebaut werden.



**Abbildung 6.5:** Input-Output-Graph für das Bewässerungsprojekt El Diluvio-Palmar für ein Selbstversorger-Szenario

### 6.2.3 Quantifizierung

Für die Quantifizierung der Transformationskoeffizienten wurden zunächst Untersuchungen zu unterschiedlichen Teilaspekten durchgeführt.

#### Bestimmung der Preise

Für die eher lokal verkauften Produkte wie Tomaten oder Maniok wurde im Rahmen einer Masterarbeit (Italiano 2010) eine Marktstudie durchgeführt. Für Produkte wie Baumwolle wurden aktuelle Weltmarktpreise angenommen (Finanzen.net 2016). Soll das quantifizierte Modell zu einem anderen

Zeitpunkt verwendet werden, müssen die Transformationen entsprechen angepasst werden, wenn sich das Preisniveau für landwirtschaftliche Produkte geändert hat.

### Energiebedarf

Der Energiebedarf für die Produktion und Weiterverarbeitung von Baumwolle wurde aus Wiegmann (2002) ermittelt: Für technisierten Anbau wird 41,19 MJ/kg entkörnte Baumwolle benötigt, bei Handarbeit 21,37 MJ/kg.

### Bestimmung des Bewässerungswasserbedarfs

Der Zusammenhang zwischen angebauten Produkten und Wasserbedarf wurde wie in Kapitel 3.6 beschrieben mit CropWat berechnet. Für den Bewässerungswasserbedarf von Baumwolle wurden Daten aus Bednarz u. a. (2003) benutzt.

Die auf dieser Grundlage bestimmten Transformationskoeffizienten sind in Tabelle 6.7 aufgelistet.

Kanten-ID	Startknoten	Endknoten	Transformationskoeffizient $a_{ij}$
13	Bewässerungswasser	Tomaten	10,4 $m^3/t$
14	Bewässerungswasser	Maniok	4,75 $m^3/t$
15	Bewässerungswasser	Bananen	10,95 $m^3/t$
15	Bewässerungswasser	Mais	1,29 $m^3/t$
16	Bewässerungswasser	Mango	17,2 $m^3/t$
17	Bewässerungswasser	Baumwolle	4,13 $m^3/t$

**Tabelle 6.7:** Transformationskoeffizienten für den Bewässerungswasserbedarf

### Bestimmung des Bedarfs an Arbeitskräften

Für die unterschiedlichen landwirtschaftlichen Produkte besteht in Abhängigkeit von der Bewässerungsmethode ein Bedarf an Arbeitskräften. Bei



der Modellierung werden diese Arbeitskräfte als einer der Primärinputs gehandhabt.

Bei der Ermittlung für die Erhöhung der Arbeit im Agrarsektor wird zum Einen von einer benötigten Arbeitszeit von 164 h/ha · a für die Bewässerung ausgegangen (Albayrak u. a. 2010), auf das Gesamtgebiet ergibt sich damit eine Mannstundenzahl von 65600 h/a. Durch intensiveren Anbau bei Bewässerung kommt es noch zu einer Erhöhung der Arbeit pro Hektar von 0,2 Arbeitern pro Hektar (Nationmaster 2016) auf 0,6 Arbeiter pro Hektar. Dies ergibt bei 2340 Arbeitsstunden pro Jahr und Arbeiter eine zusätzliche Mannstundenzahl von 187200. Damit werden insgesamt 109 Arbeiter pro Jahr benötigt und ausgehend von einem Durchschnittslohn von 800 \$ pro Monat (GTAI, 2010) berechnet sich der weiter transformierte Nutzen zu 1046400 \$/a, da in diesem Fall Arbeitslöhne und Beschäftigung hauptsächlich als Nutzen für die Region angesehen werden.

Für die Transformationen wurde davon ausgegangen, dass je nach angebautem Produkt unterschiedliche Arbeitsleistungen für die Pflege der angebauten Kultur sowie die Ernte benötigt werden, da manche landwirtschaftlichen Flächen eher durch Handarbeit gepflegt werden müssen, während für andere Kulturen ein hoher Maschineneinsatz möglich ist.

Kanten-ID	Startknoten	Endknoten	Transformationskoeffizient $a_{ij}$
16	Arbeitskraft	Tomaten	1,7 [Arbeiter/t]
17	Arbeitskraft	Maniok	0,83 [Arbeiter/t]
18	Arbeitskraft	Bananen	1,7[Arbeiter/t]
18	Arbeitskraft	Mais	0,45[Arbeiter/t]
19	Arbeitskraft	Mango	1,2 [Arbeiter/t]
20	Arbeitskraft	Baumwolle	0,19 [Arbeiter/t]

**Tabelle 6.8:** Transformationskoeffizienten für den Arbeitskräftebedarf

### 6.2.4 Düngemittel

#### **Bestimmung des Nährstoffaustrags mit der Export-Koeffizienten Methode**

Der Nährstoffaustrag wurde mit der Export-Koeffizienten Methode nach Johnes (1996) bestimmt. Diese Methode stellt einen Zusammenhang zwi-

## 6.2 Fallstudie Bewässerungssystem El Diluvio-Palmar

	Ertrag [t/ha]	N [kg/ha]	P2O5 [kg/ha]
Baumwolle	2,3	156	36
Bananen	60	283	78
Mais	9	129	71
	6,3	100	40
Maniok	40	62	23
	18	32	8
	9	13	2
Paprika	19	70	16
Tomaten	21	177	46

**Tabelle 6.9:** Ernteerträge und Nährstoffbedarf ausgewählter Pflanzen (Halliday und Trenkel 1992)

schen der Landnutzung und dem Nährstoffaustrag her, der in Gleichung 3.1 beschrieben wird.

Exportkoeffizient E	N	P2O5
Getreide	0,12	0,05
Wurzelgemüse	0,25	0,05
Feldgemüse	0,25	0,05
Obst	0,01	0,005
Rinder	0,161	0,0285
Geflügel	0,153	0,027

**Tabelle 6.10:** Exportkoeffizienten für unterschiedliche landwirtschaftliche Produkte (Haygarth u. a. 2003), dimensionslos

Die in Tabelle 6.10 angegebenen Exportkoeffizienten gelten für saure undurchlässige Böden im Hochland, wie sie im Untersuchungsgebiet meist vorkommen.

Um bessere Ergebnisse zu erzielen, wurde die Methode an die Bedingungen der Bewässerungswirtschaft angepasst. Hierzu wurde ein Vorfaktor in Gleichung 3.1 integriert, der von der Bewässerungsart abhängig ist.

## 6 Fallstudien

Bewässerungssystem	Oberflächen	Beregnung	Tropfbewässerung	Keine Bewässerung
	1,3	1,2	1,1	1

**Tabelle 6.11:** Einflussfaktor der Bewässerung auf den Exportkoeffizienten, dimensionslos

Steigung	flach [0-10 %]	moderat [10-50 %]	steil [> 50 %]
	0,8	0,9	1
Durchlässigkeit	durchlässig	undurchlässig	
	0,9	1	
Abstand	< 50 m	> 50 m	
	2	1	

**Tabelle 6.12:** Geländebedingte Einflussfaktoren auf den Exportkoeffizienten, dimensionslos

Mit den oben bestimmten Faktoren kann Gleichung 3.1 erweitert werden:

$$L = \sum_{i=1}^n B_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot I_i \quad (6.2)$$

- $L$  Nährstoffexport [kg]
- $E$  Exportkoeffizient für Nährstoffquelle  $i$  [–]
- $B$  Faktor für den Bewässerungstyp [–]
- $A$  Fläche mit Landnutzungstyp  $i$  [ha]
- $I$  Nährstoff-Input aus Quelle  $i$  [kg/ha]

Aus den so bestimmten Exportkoeffizienten können nun Transformationskoeffizienten für das System Landwirtschaft-Nährstoffaustrag bestimmt werden.

Startknoten	Endknoten	$a_{ij}$ [t/kg]
Baumwolle	Nitrat	0,0098
Baumwolle	Phosphat	0,232
Bananen	Nitrat	0,693
Bananen	Phosphat	0,4
Tomaten	Nitrat	0,027
Tomaten	Phosphat	0,107

**Tabelle 6.13:** Transformationskoeffizienten landwirtschaftliche Produktion  
→ Nährstoffaustrag [t/kg]

Der Nährstoffaustrag durch die landwirtschaftliche Nutzung kann im Gesamtsystem am besten mit der von Hanssmann (1976) vorgeschlagenen Methode integriert werden, da es sich systemanalytisch gesehen um ein Beiprodukt handelt. Die in Tabelle 6.13 aufgelisteten Transformationen beschreiben den Austrag/Produkt.

### 6.2.5 Bestimmung von Anforderungsprofilen

Um sinnvolle Endverbrauchervektoren für die verschiedenen Szenarien zu identifizieren, wurden durchschnittliche Anforderungen ermittelt. Für alle Szenarien wurde die Anforderung, dass 200 Familien im Untersuchungsgebiet leben und arbeiten können angenommen.

#### **Bestimmung der benötigten Produktion für die Selbstversorger-Szenarien**

Für die Selbstversorgerfarmen wurde davon ausgegangen, dass pro Person mindestens 2000 kcal in Form von selbst angebauten landwirtschaftlichen Produkten vorhanden sein müssen. Hierzu wurden Lebensmittel, die in Venezuela üblicherweise verzehrt werden, ausgewählt. Eine Tagesration wird folgendermaßen zusammengestellt (Fisterra 2016):

- Milch = 0,40 l
- Brot / Arepa = 260 g

## 6 Fallstudien

---

- Käse = 70 g
- Gemüse = 2 Portionen (s. Tab. 6.14)
- Stärkehaltige Gemüse/Cerealien = 2 Portionen (s. Tab. 6.14)
- Protein = 2 Portionen (s. Tab. 6.14)
- Früchte = 2 Portionen (s. Tab. 6.14)

Art	Gruppe	Menge	Sorten
Gemüse	A	300g	Rote Beete, Sellerie, Aubergine, Broccoli, Kürbis, Pilze, Kohl, Salat, Spargel, Spinat, Gurke, Rettich, Tomate, Blumenkohl
	B	200g	Brunnenkresse, Frühlingszwiebel, Grüne Bohnen, Rüben, Lauch
	C	100g	Artischocken, Zwiebeln, Grünkohl, Möhren
Stärkehaltige Gemüse	A	120gr	Erbsen, frische Bohnen
	B	100g	Kartoffeln, Süßkartoffeln
	C	40g	Kichererbsen, trockene Bohnen, Linsen
	D	30g	Reis, Pasta, Mehl
Protein	Fleisch	100gr	Huhn, Pute, Hase, Kaninchen, Wild, Rind, Schwein
	Fisch	130g	Fisch
	Eier	2 Stück	Eier
Früchte	A	300g	Melone, Grapefruit, Mango
	B	150gr	Beeren, Pflaumen, Zitrusfrüchte
	C	120gr	Apfel, Birne, Pfirsich
	D	75gr	Cherimoya, Kirsche, Banane, Trauben

**Tabelle 6.14:** Portionsgrößen für verschiedene Lebensmittel (Fisterra 2016)

Tabelle 6.15 zeigt den typischen Jahresbedarf einer fünfköpfigen Familie.

**Tabelle 6.15:** Benötigte jährliche Lebensmittelproduktion

Produkt	Menge
Milch	720 l
Brot/Arepa	468 kg
Käse	126 kg
Tomaten	360 kg
Bohnen	240 kg
Sonstiges Gemüse	120 kg
Maniok	264 kg
Mais	188 kg
Soja	150 kg
Fleisch	96 kg
Geflügel	144 kg
Eier	2400 Stück
Melone	243 kg
Mango	67 kg
Bananen	1673 kg

Für einen Tagesbedarf von 2000 kcal ergibt sich somit insgesamt ein Bedarf pro fünfköpfiger Familie und Jahr von 1,57 t Getreide, 0,72 t Gemüse, 0,26 t Maniok und 1,98 t Obst. Zusätzlich zu diesen aus dem Acker- und Obstbau gewonnen Nahrungsmitteln werden pro Familie 1 Kuh und 5 Hühner zur Milch-, Eier- und Fleischgewinnung benötigt.

### **Bestimmung des benötigten Einkommens pro Familie für die Industrie und Kooperativen-Szenarien**

Für die Kooperativen- und Industrieszenarien wurde davon ausgegangen, dass für die jeweiligen Familien ein Mindest-Warenkorb benötigt wird, bzw. dass ein bestimmtes Mindesteinkommensniveau erreicht werden muss.

### 6.2.6 Evaluation von verschiedenen Landnutzungsszenarien

	Selbstversorger-Szenario	Kooperative-Szenario	Industrie-Szenario
Produktmix	1050 t	-	-
Tomaten	-	500t	-
Maniok	-	800t	-
Bananen	-	600t	500t
Baumwolle	-	-	1000t
Mögliches Szenario?	ja	ja	ja

**Tabelle 6.16:** Evaluation von Nutzungsszenarien

### 6.2.7 Bewertung der Fallstudie Diluvio-Palmar

In der Fallstudie Dilluvio-Palmar wurde ein System für den Vergleich unterschiedlicher Landnutzungsszenarien entwickelt, das basierend auf den lokalen Gegebenheiten, wie beispielsweise Marktpreise oder auch bestimmte traditionelle landwirtschaftliche Produkte auch an Projekte anderer Standorte angepasst werden kann. Grundsätzlich konnte gezeigt werden, dass alle angesetzten Szenarien für Selbstversorger, Kooperativen und industriell landwirtschaftliche Nutzung der Flächen mit den vorhandenen Ressourcen möglich sind. Als besonders günstig für das Einkommen der Familien sowie eine optimale Ressourcen-Ausnutzung stellten sich die unterschiedlichen Kooperative-Szenarien dar. Es konnte in dieser Fallstudie gezeigt werden, dass die Methode geeignet ist, um unterschiedliche Bewässerungs- und Landnutzungsszenarien abzubilden.

## 6.3 Fallstudie Untere Argen

In der hier betrachteten Fallstudie handelt es sich ebenso wie beim Draukraftwerk Rosegg-St. Jakob um ein Ausleitungskraftwerk. Jedoch ist hier im Gegensatz zur vorhergehenden Studie auch noch ein weiterer Nutzungszweig, die Bewässerungslandwirtschaft, vorhanden. Aufgrund extremer Klima-Ereignisse wie zum Beispiel der trockene und heiße Sommer 2003 (BFG 2006) stellt sich die Frage, ob die aktuellen Wasserwirtschaftsstrategien an der Unteren Argen auch in Zeiten längerer Trockenheit und globaler Erwärmung noch nachhaltig sind. Im Untersuchungsgebiet Untere Argen besteht eine Konkurrenzsituation zwischen Gewässerökologie, Wasserkraft und Bewässerungswasserbedarf des lokalen Obstbaus.

Die beiden externen Nutzer stehen in direkter Konkurrenz zu einer genügend hohen Wasserführung im Fluss für die Ökologie. Hier stehen wie auch in anderen Beispielen verschiedene Nutzer in Konkurrenz zu Habitatansprüchen. Bei den momentan festgelegten Entnahmeregelungen wird der Wasserkraft der Vorzug gegeben, da hier ein Wasserrecht besteht. An heißen trockenen Sommertagen kommt es zu einer starken Konkurrenzsituation, da dann, wenn am meisten Bewässerungswasser verbraucht wird, das Wasser auch für die Ökologie des Flusses benötigt wird. Eine geringere Entnahme für die Wasserkraft stellt finanzielle Einbußen für den Wasserkraftbetreiber dar, jedoch hat eine geringere Entnahme hier nur unmittelbare Folgen für die aktuelle Energieerzeugung, während fehlendes Wasser für die Restwasserstrecke oder fehlendes Wasser für die Bewässerung über einen längeren Zeitverlauf Folgen hat.

Um eine möglichst sinnvolle Verteilung von Wasser zu ermöglichen, ist es notwendig, verschiedene Szenarien zu verifizieren. Hierzu wurde das in den vorigen Kapiteln entwickelte Input-Output-Analyse-Modell verwendet. Grundlage für das hier angepasste Modell sind Daten aus einer vorhergehenden Studie (Kennedy 2007; Marx u. a. 2005). In diesen vorausgegangenen Arbeiten wurde untersucht, wie sich der Klimawandel auf das System Untere Argen auswirkt und es wurden alternative Bewirtschaftungskonzepte vorgeschlagen. Durch den Klimawandel sind extrem heiße und trockene Sommer immer häufiger, daher wird es nötig, alternative Bewirtschaftungskonzepte zu entwickeln, um eine ökologische Mindestwasserführung bei gleichzeitig möglichst günstiger ökonomischer Ausbeute zu bekommen. Zur Evaluierung verschiedener Bewirtschaftungskonzepte



wird ein Input-Output-Modell entwickelt, das Ergebnisse vorhergegangener Untersuchungen miteinander verknüpft.

### **6.3.1 Das Untersuchungsgebiet Untere Argen**

#### **Die Argen**

Die Argen, mit einem Einzugsgebiet von 639 km<sup>2</sup>, hat einen durchschnittlichen Jahresniedrigwasserabfluss von 4,87 m<sup>3</sup>/s am Pegel Gießen, 5,8 km oberhalb der Mündung (Landesanstalt für Umwelt 2016). Die Argen, die zwischen Langenargen und Kressbronn in den Bodensee mündet, ist der drittgrößte Zufluss des Bodensees. Sie entspringt in den Ausläufern der Allgäuer Alpen in Bayern. Der Oberlauf des Flusses ist in zwei Zuflüsse unterteilt, die Obere und die Untere Argen, die in weiten Strecken immer noch relativ natürlich und unberührt sind. Zwischen dem Pegel Gießen und der Mündung wurde der Fluss begradigt und Betonwehre zur Hochwasserkontrolle gebaut. Zusätzlich sind die Ufer hier mit Steinblöcken und teilweise Beton befestigt. Bei einer „Renaturierung“ im letzten Jahrzehnt wurden Betonwehre durch Steinrampen ersetzt und an anderen Stellen Kiesbänke eingeführt, um eine natürlichere Morphologie wiederherzustellen.

# Argen Study Area



**Abbildung 6.6:** Untersuchungsgebiet Untere Argen (Kennedy 2007)

Die Untersuchungsstrecke, die untersten 5,8 km der Argen, hat zwei wesentliche Entnahmen, ein Wasserkraftwerk und die saisonale Entnahme zur Bewässerung.

### **Energetische Nutzung**

Über einen Ausleitungskanal wird Wasser für die Wasserkraft entnommen. Dabei handelt es sich um eine Kette kleinerer Wasserkraftanlagen, die hier für die Berechnungen jedoch zu einer Anlage zusammengefasst werden. Nach der momentanen Verteilung der Wasserrechte wird der energetischen Nutzung Vorrang vor der Bewässerungslandwirtschaft gegeben.

Für die Wasserkraftanlage werden 3,3 km unterhalb des Pegels Gießen ca. 4250 l/s aus dem Fluss umgeleitet. Für die Untersuchungsstrecke ist momentan festgeschrieben, dass mindestens 1940 l/s im Fluss unterhalb der Ausleitung erhalten bleiben müssen. Dies ist wenig mehr als ein Drittel des mittleren Abflusses. Daher bekommt das Wasserkraftwerk bei einem Abfluss unter 6190 l/s nur einen reduzierten Zufluss. Zum Vergleich: Der Sommer 2006 hatte 24 Tage mit einem Abfluss unter 6190 l/s, der heiße und trockene Sommer 2003 hatte 73 Tage mit einem Abfluss unter 6190 l/s.

### **Bewässerungslandwirtschaft - Obstbau**

Die Obstplantagen an der Argen mit einer Gesamtfläche von etwa 500 ha liegen westlich von Oberdorf und östlich von Kressbronn. Etwa 80 % dieser Fläche sind Apfelplantagen, auf den restlichen 20 % werden Hopfen und Erdbeeren erzeugt. Die Vegetationsperiode beginnt wie üblich in nördlichen gemäßigten Klimaten im April und endet im Oktober. Das örtliche Klima ist im Sommer meistens heiß und trocken, wodurch eine Bewässerung nötig wird, um den Wasserbedarf der Pflanzen zu decken. Hierfür entnehmen die Landwirte Wasser aus der Argen. Eine weitere Quelle für Bewässerungswasser sind einige Grundwasserbrunnen im Untersuchungsgebiet. Im Jahr 2003 kamen extreme Klimabedingungen mit sehr niedriger Wasserführung in der Argen zusammen, was zu Konflikten zwischen dem Wasserbedarf für Bewässerung und für die Ökologie führte. Durch den Klimawandel ist zu erwarten, dass solche Konflikte in Zukunft häufiger auftreten.

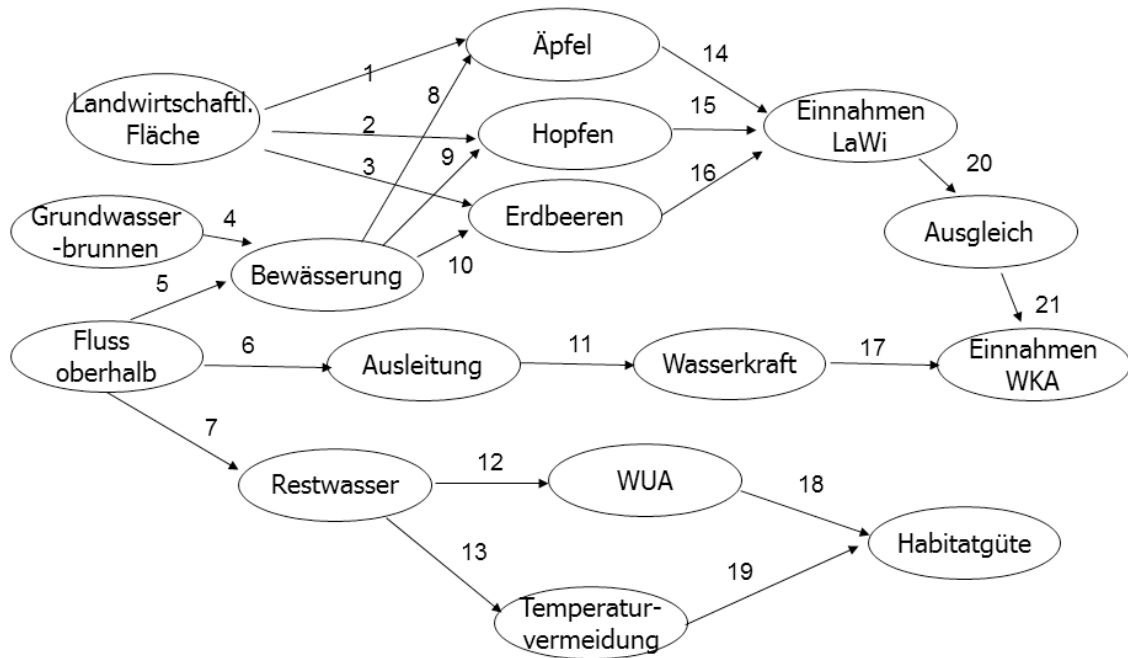
### **Restwasserstrecke**

Die vorliegende Fallstudie hat ihren Schwerpunkt auf den letzten 5,8 km der Argen zwischen dem Pegel Gießen und der Flussmündung in den Bodensee. Diese Flussstrecke ist besonders wichtig, da hier Wasser sowohl für die Wasserkraft (über einen Ausleitungskanal) als auch für die Bewässerung entnommen wird und daher in den heißen Sommermonaten sehr niedrige Wasserstände aufweisen kann. Die LUBW hat diese Strecke außerdem als besonders wichtig für die Wanderung der Seeforelle ausgewiesen (LUBW 2016). Der baden-württembergische Wasserkrafterlass empfiehlt einen Mindestwasserabfluss, der im Fluss unterhalb der Ausleitung erhalten bleiben muss, von etwa einem Drittel des durchschnittlichen Jahresabflusses, was für die Argen 1620 l/s wäre. Dieser Wert wird als Orientierungswert verstanden, der an die örtlichen Bedingungen anzupassen ist. Manche Flüsse brauchen einen höheren Abfluss, während andere mit einem niedrigeren auskommen. Wasserkraftbetreiber verstehen diesen Wert als maximal nötigen Wert während Umweltschützer diesen Wert als Minimum ansehen.

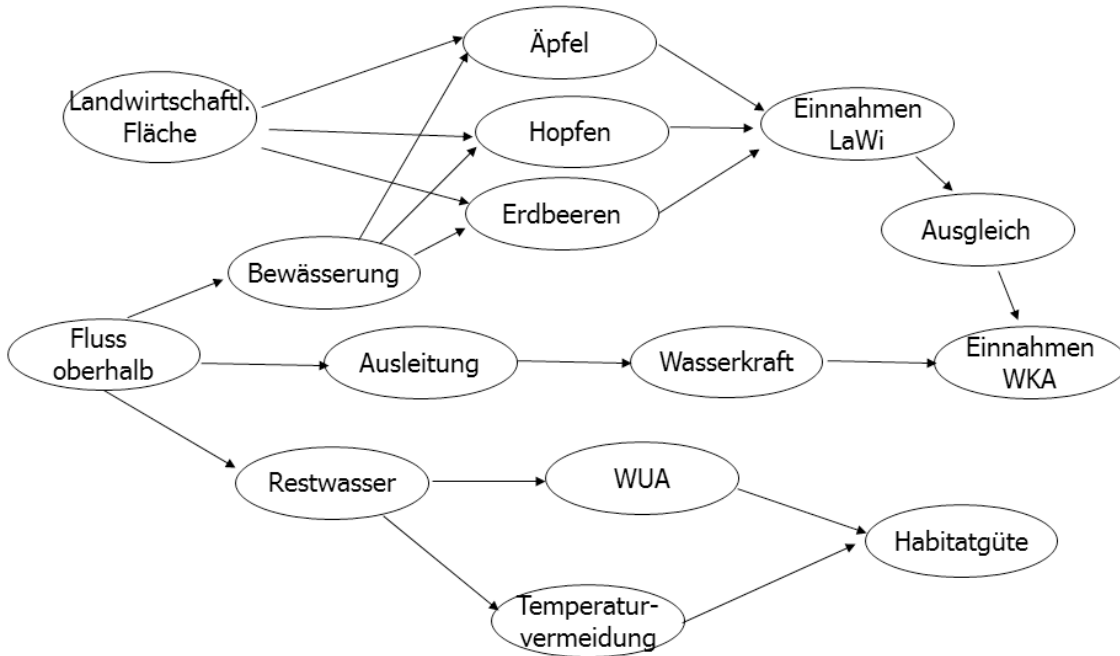
### **6.3.2 Ein qualitatives Input-Output-Modell für die Untere Argen**

Zunächst wurde ein qualitatives Modell in Form eines Input-Output-Graphen erstellt. Qualitative Input-Output-Modelle können immer für einen bestimmten System- oder Anlagentyp verwendet werden unabhängig von der Größe und Größenverteilung der Sektoren. Somit kann das hier entwickelte Modell für Ausleitungskraftwerke, die in Konkurrenz zu anderen Entnahmen stehen, verwendet werden.

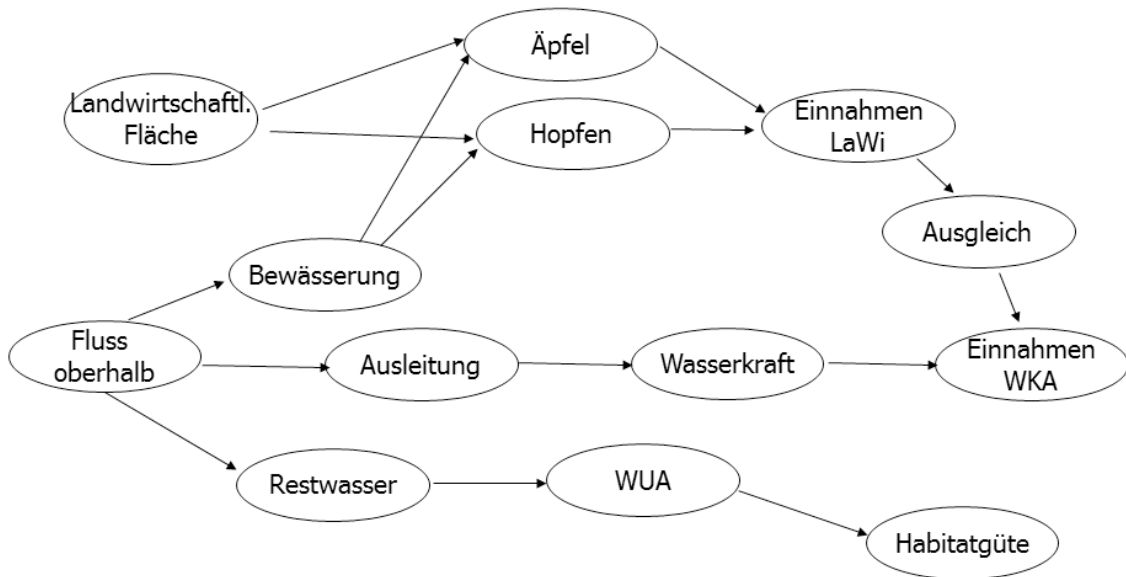
Bei dem hier betrachteten Fall ist jedoch als Sonderfall zu berücksichtigen, dass das Entnahmewasser direkt in den Bodensee eingeleitet wird und somit Auswirkungen unterschiedlicher Nutzungsarten des Wassers auf das Unterwasser nicht gesondert anzusetzen sind. Bei einer Anlage, bei der Entnahmen zur Bewässerung oder als Trinkwasser in Konkurrenz zu einer Ausleitungsstrecke stehen, wäre dies jedoch mit zu bewerten. Abbildung 6.7 zeigt einen Input-Output-Graphen für ein Nutzungsszenario, wie es im Sommer 2003 betrieben wurde,



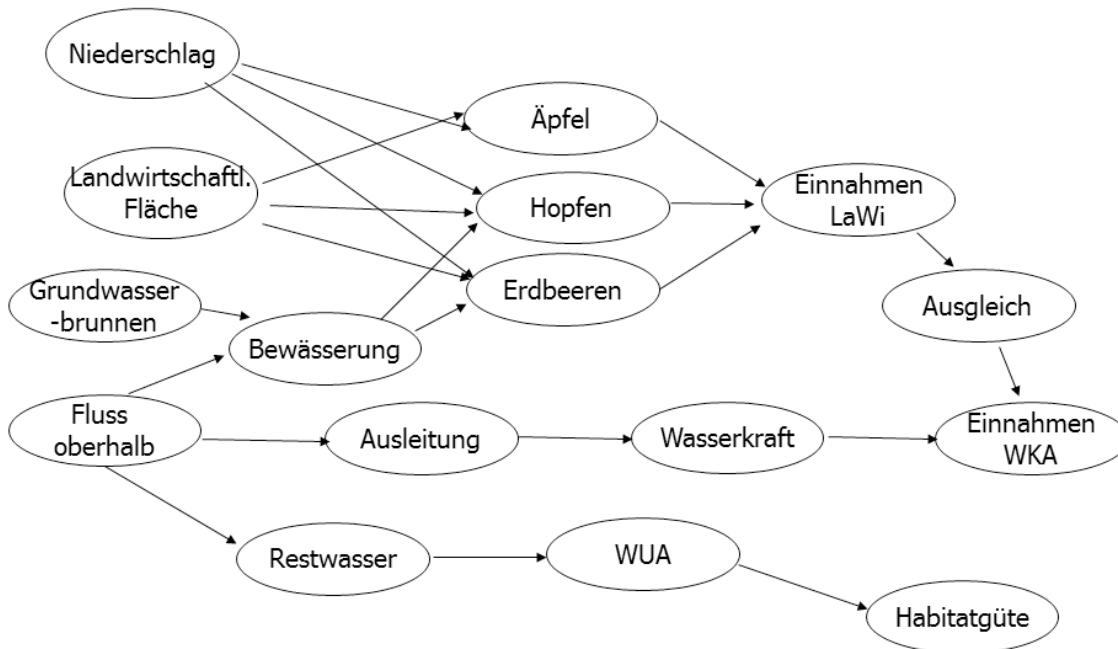
**Abbildung 6.7:** Qualitativer Input-Output-Graph für die Untere Argen für das Nutzungsszenario „Sommer 2003 - vollständig“



**Abbildung 6.8:** Qualitativer Input-Output-Graph für die Untere Argen ohne Grundwasserbrunnen



**Abbildung 6.9:** Qualitativer Input-Output-Graph für einen kühlen Monat (Szenario ohne Grundwasserbrunnen und ohne Erdbeeren, da diese nur einen Teil der Sommer-Saison bewässert werden)



**Abbildung 6.10:** Qualitativer Input-Output-Graph für ein teilbewässertes System (Äpfelplantagen unbewässert, Berücksichtigung von Niederschlagswasser)

### 6.3.3 Quantifizierung des Modells Untere Argen

Aus den Ergebnissen unterschiedlicher Voruntersuchungen von Kennedy (2007) wurden die Transformationskoeffizienten hergeleitet und damit das quantitative Modell vervollständigt.

Für die Bestimmung der Transformationskoeffizienten wurde wie folgt vorgefahren:

- Für Transformationen nach Geldwerten wurden Marktpreise angesetzt



- Transformationen von Wasser nach Wasser anderer Nutzung wurden nur zur besseren Übersichtlichkeit eingesetzt
- die Transformation nach Wasserkraft wurde aufgrund der Fallhöhe bestimmt
- zur Berechnung der Transformationskoeffizienten nach WUA bzw. nach Temperatur wurden Ergebnisse der Untersuchungen von Kennedy (2007) verwendet und linear im entsprechenden Bereich interpoliert
- Ausgleichszahlungen als Ressource werden dazu verwendet, das System so auszugleichen, dass das gewünschte finanzielle Ergebnis für die Wasserkraft erzielt wird bzw. dass durch die anderweitige Nutzung des Wassers kein finanzieller Verlust für den Wasserkraftbetreiber, der das Wasserrecht hat, entsteht.

### **Bestimmung von Transformationskoeffizienten für die Flussökologie**

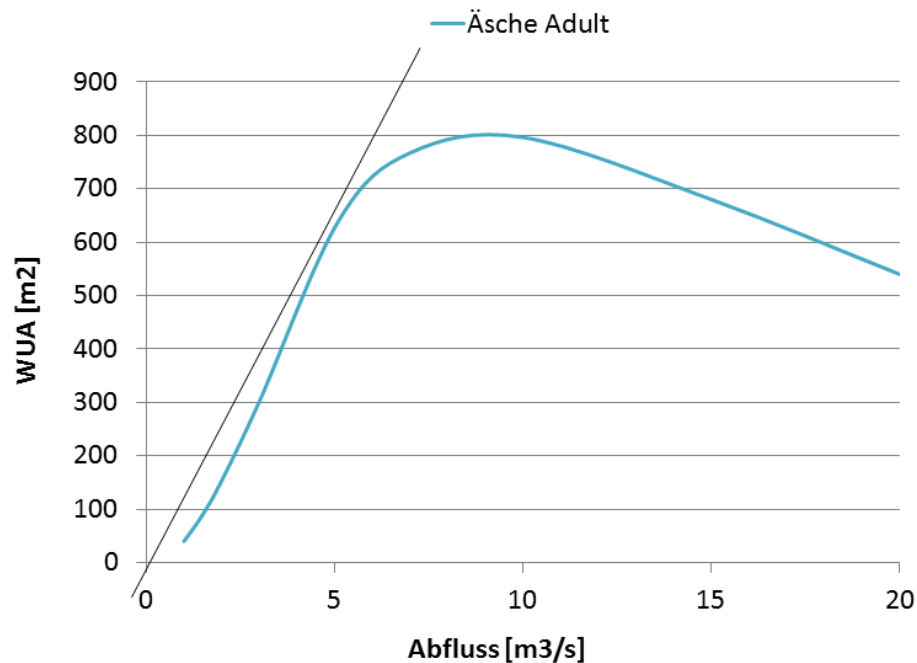
Transformationskoeffizienten für die Flussökologie können nicht direkt bestimmt werden, sondern müssen anhand einer hydromorphologischen Habitatuntersuchung aufgrund der Habitatansprüche von Zeigerarten ermittelt werden. Die Transformationskoeffizienten wurden auf die Ansprüche lokaler Fischarten ausgerichtet.

Fische werden als Bioindikatoren verwendet, da sie gleichzeitig eine ökologische, ökonomische, fischereiliche, politische und Freizeit-Bedeutung haben. Außerdem reagieren Fische auf Veränderungen des Ökosystems empfindlich und sind einfach zu untersuchen, wodurch ihre Habitat-Präferenzen gut dokumentiert sind. Dadurch, dass verschiedene Fischarten in unterschiedliche Entwicklungsstadien verschiedenste Habitatanforderungen haben, ist es möglich, einen guten Überblick über die Habitatgüte zu gewinnen, indem man das Verhältnis von hydromorphologischen Parametern zu Habitatvorkommen untersucht. Eine hydromorphologische Habitatuntersuchung wurde in einer Vorstudie (Kennedy 2007) mit dem ökohydraulischen Modell CASiMiR (Jorde 1997) durchgeführt. In dieser Untersuchung wurden Habitatpräferenzen und Migrationsmuster der lokalen Fischarten, insbesondere der Äsche (*Thymallus thymallus*), der Seeforelle (*Salmo trutta lacustris*) und der Barbe (*Barbus barbus*) einbezogen. Da die vorkommenden Fischar-

ten sehr temperatursensibel sind, wurde weiterhin eine Temperaturstudie durchgeführt, um den Einfluss der Lufttemperatur in Kombination mit niedrigen Abflüssen auf die Wassertemperatur zu bestimmen. Aus diesen Modellergebnissen ließ sich durch stückweise Linearisierung jeweils ein Transformationkoeffizient für die einzelnen Habitatgüteparameter ableiten. Das Vorgehen hierbei ist in Abb.5.7 dargestellt. Im Beispiel liefert dann die Tangentensteigung  $a_{ij} = \frac{5}{600} [\frac{m^3/s}{m^2}]$ .

Zur Evaluierung von Szenarien wurde die jeweils empfindlichste Fischart bzw. Entwicklungsstufe als Zeigerart ausgewählt und die Transformation entsprechend bestimmt.

Die Ergebnisse der hydromorphologischen Modellierung sind nicht linear, daher muss bei der Anpassung von Verbrauchervektoren in einer späteren Modellierung darauf geachtet werden, für die dann veränderten Abflussverhältnisse eine erneute Festlegung der Transformationskoeffizienten durch passende Linearisierung durchzuführen.



**Abbildung 6.11:** Koeffizientenbestimmung aus CASIMIR-Modellergebnissen durch stückweise Linearisierung mit Tangenten

### **Bestimmung von Transformationskoeffizienten für die Wasserkraft**

In Kennedy (2007) wurde der Einfluss des empfohlenen erhöhten Mindestwasserabflusses auf die Energieproduktion des Wasserkraftwerks mit Hilfe des CASiMiR-Moduls WASKRA (Giesecke u. a. 2014) untersucht und quantifiziert. Auf der Grundlage dieser Modellergebnisse wurde auch hier durch stückweise Linearisierung ein Transformationskoeffizient bestimmt (s. Tab. 6.18).

## Bestimmung von Transformationskoeffizienten für die Bewässerungslandwirtschaft

Der Wasserbedarf des Obstbaus wurde mit dem Bewässerungsmodell CROPWAT (FAO 2003) aufgrund verschiedener Klimaszenarien ermittelt. Weiterhin war eine Messkampagne zur Bestimmung des Bodenwassergehalts durchgeführt worden, um die Bodencharakteristik des Untersuchungsgebiets zu bestimmen, die aktuelle Bewässerungspraxis zu evaluieren und herauszufinden, ob Bodenfeuchte-Sonden für zukünftige Messungen nützlich sein könnten (Kennedy 2007). Um die bisherige Bewässerungspraxis der Beregnungsgemeinschaft Kressbronn und des Wasserverbandes Oberdorf zu begutachten und Vorschläge für eine Optimierung zu erarbeiten, wurde das Bewässerungsmodell CROPWAT verwendet.

Der Pflanzenkoeffizient (crop coefficient,  $K_c$ ) ist ein empirischer Wert, der das Verhältnis zwischen der Referenz-Evapotranspiration und der Pflanzenevapotranspiration für eine bestimmte Feldfrucht in jedem Entwicklungsstadium beschreibt. Pflanzenkoeffizienten sind für viele Feldfrüchte experimentell bestimmt worden und sind in der CROPWAT-Datenbank hinterlegt. Die Pflanzenkoeffizienten, die in dieser Studie benutzt wurden, sind in 6.17 aufgelistet.

	$K_{c,ini}$	$K_{c,mid}$	$K_{c,end}$
Äpfel	0.8	1.2	0.85
Hopfen	0.3	1.05	0.85

**Tabelle 6.17:** Pflanzenkoeffizienten

Während mit CROPWAT eine fein abgestufte Betrachtungsweise des Wasserbedarfs und eine Optimierung der Bewässerungspraxis genauer modelliert werden kann, wurden in dieser Fallstudie, auf Grundlage der sehr detaillierten Voruntersuchungen, nur der Bedarf an Bewässerungswasser und die Wassermengen, die jeweils für die einzelnen Landwirtschaftsprodukte als kritisch anzusehen sind, ermittelt. Diese Vereinfachung kann dann dazu dienen, sehr viele unterschiedliche Verteilungsszenarien zwischen den einzelnen Verbrauchern zu evaluieren. Für die Berechnung des Wasserbedarfs, bzw. der zum jeweiligen landwirtschaftlichen Produkt gehörigen Transformationskoeffizienten wurden besonders kritische Klima-Szenarien ausgewählt.

**Tabelle 6.18:** Transformationen für das System Untere Argen

Kanten ID	Ausgangsknoten	Endknoten	$a_{ij}$	Einheiten
1	Landwirtschaftliche Fläche	Äpfel	0,04	ha/t
2	Landwirtschaftliche Fläche	Hopfen	5,555	ha/t
3	Landwirtschaftliche Fläche	Erdbeeren	0,0666	ha/t
4	Grundwasserbrunnen	Bewässerungswasser	1	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
5	Fluss oberhalb	Bewässerungswasser	1	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
6	Fluss oberhalb	Ausleitung	1	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
7	Fluss oberhalb	Restwassermenge	1	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
8	Bewässerungswasser	Äpfel	$1,85 \cdot 10^{-6}$	(m <sup>3</sup> /s)/t
9	Bewässerungswasser	Hopfen	0,00025	(m <sup>3</sup> /s)/t
10	Bewässerungswasser	Erdbeeren	$3,09 \cdot 10^{-6}$	(m <sup>3</sup> /s)/t
11	Ausleitung	Wasserkraft	40	(m <sup>3</sup> /s)/kW
12	Restwassermenge	WUA	0,0083	(m <sup>3</sup> /s)/m <sup>2</sup>
13	Restwassermenge	Temperatur-Vermeidung	5	m <sup>3</sup> /°C
14	Äpfel	Einnahmen Landwirtschaft	0,0045	t/€
15	Hopfen	Einnahmen Landwirtschaft	0,00013	t/€
16	Erdbeeren	Einnahmen Landwirtschaft	0,00083	t/€
17	Wasserkraft	Einnahmen Wasserkraft	0,00685	kW · a/€
18	WUA	Habitatgüte	0,014	m <sup>2</sup> /Punkt
19	Temperatur-Vermeidung	Habitatgüte	0,5	°C/Punkt
20	Einnahmen Landwirtschaft	Ausgleich	1	€/€
21	Ausgleich	Einnahmen Wasserkraft	1	€/€

In Tabelle 6.18 sind die Transformationskoeffizienten für das System Untere Argen im Bereich der betrachteten Szenarien dargestellt.

### 6.3.4 Evaluation von Nutzungsszenarien der Unteren Argen

Um festzustellen, welche Nutzungsszenarien mit den vorhandenen Ressourcen möglich sind, wurden Anforderungsvektoren aufgestellt (s. Tabelle 6.19).

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Äpfel	10000t	10000t	10000t
Hopfen	9t	10t	10t
Erdbeeren	500t	100t	500t
Einnahmen aus Landwirtschaft	2,87 Mio €	2,39 Mio €	2,88 Mio €
Wasserkraft	1000MWh	1500MWh	1500MWh
Einnahmen aus Wasserkraft	76700 €	115000 €	115000 €
WUA	300 m <sup>2</sup>	400 <sup>2</sup>	400 <sup>2</sup>
Mögliches Szenario?	ja	ja	nein

**Tabelle 6.19:** Nutzungsszenarien für das System Untere Argen (während der Monate Juni/Juli im Beispieljahr 2003)

Mit den im vorigen Abschnitt bestimmten Transformationskoeffizienten wurden die benötigten Ressourcen für diese Bewirtschaftungsweise berechnet und mit den tatsächlich zur Verfügung stehenden Ressourcen verglichen. Als Basis für diesen Vergleich dienten die Zuflussmengen und andere Ressourcen für das Jahr 2003, da es sich hier um ein besonders trockenes und daher besonders kritisches Jahr handelt.

### 6.3.5 Optimierung für das System Untere Argen

Um eine Optimierung für das System zu finden, wurde zunächst das Gleichungssystem als Restriktionen in einem linearen Optimierungsmodell im Simplex-Solver QSOpt (Applegate u. a. 2016) umgesetzt. Maximale Inputs

wurden ebenfalls als Restriktionen angegeben. Als Start-Werte wurden Lösungen eines schon berechneten Szenarios genutzt. Die jeweils optimale Lösung variiert je nachdem, welche Minimalanforderungen angegeben werden. Mit der Nutzung des Optimierungsmodells konnten jedoch automatisch mögliche und mit vorhandenen Restriktionen optimale Lösungen gefunden werden. Abbildung 6.12 zeigt die Umsetzung eines solchen Modells.

```
Problem Argen
Minimize
obj: x1+ x2 +x3 + x4 + x5 + x6 + x7 + x8 + x9
+ x10 + x11 +x12 + x13 + x14 + x15
Subject
c1: 0.99x1 - x2 - x3 - x4 >= 0
c2: 0.98x2 - 40 x7 >= 1
c3: 0.99x3 - 0.008 x5 -5x6 >= 15
c4: 0.99x4 -0.0000019 x11 - 0.00026 x12 -0.0000031 x13 >=0
c5: x5 >= 10
c6: x6 >= 0
c7: 0.95x7 -0.006849315x8 >=0
c8: 0.9x8 >=0
c9: -x4 + x9 >=0
c10: 0.99x10 -0.04 x11 -5.5555555 x12 -0.0666666 x13 >= 0
c11: x11 -4.545454545x14 >= 20
c12: x12 -0.1333333 x14 >= 20
c13: x13 -0.8333333 x14 >= 100
c14: 0.8 x14 - x15 >= 300
c15: 0.99 x15 >= 1
c16: x1 <= 2000
c17: x10 <= 50000
End
```

**Abbildung 6.12:** Formulierung des linearen Optimierungsmodells für die Anwendung des Simplex-Solvers QSOpt auf das System Untere Argen

### 6.3.6 Mögliche Bewirtschaftung der Unteren Argen

Sowohl die Ergebnisse dieser Studie als auch Ergebnisse vorhergegangener Untersuchungen (Kennedy 2007) deuten darauf hin, dass, um eine positive Lösung des Nutzungskonflikts herbeizuführen, ein Handel mit Wasserrech-

ten bzw. ein finanzieller Ausgleich nötig ist. Als mittelfristige Lösung zeigte sich, dass in Trockenperioden bevorzugt Wasser für die Bewässerung genutzt werden und das bestehende Ausleitungskraftwerk in diesen Perioden die Produktion reduzieren sollte, da die Wertschöpfung im Obstbau mit der gleichen Wassermenge hier wesentlich höher ist als durch die Wasserkraft. Hierfür wurde eine Ausgleichszahlung der Obstbauern an den Wasserkraftbetreiber vorgeschlagen. Ob dies als langfristige Lösung so tragbar sein könnte, hängt sehr stark von den betrachteten Klimaszenarien ab. Eventuell ist bei starken Klimaveränderungen auch eine Veränderung der angebauten landwirtschaftlichen Produkte oder der Flächenbewirtschaftungsstrategien in Erwägung zu ziehen.

### **6.3.7 Bewertung der Ergebnisse der Fallstudie**

Die Fallstudie Untere Argen zeigt, dass die Input-Output-Analyse besonders dann ein interessantes und nützliches Werkzeug ist, wenn viele unterschiedliche Nutzungsarten zueinander in Konkurrenz stehen. Es konnte gezeigt werden, dass bei einem Ausleitungskraftwerk, das in Konkurrenz zu Bewässerung steht, ein Input-Output-Modell helfen kann, unterschiedliche Nutzungsszenarien zu vergleichen. Im vorliegenden Fall ist die Anwendung der Input-Output-Analyse dann besonders sinnvoll, wenn das Modell in ein größeres regionales Modell eingegliedert werden soll oder zur Überprüfung einer sehr großen Anzahl an Verteilungsszenarien.



## **6.4 Fallstudie Kandadji: Ein Mehrzweckspeicher am Niger**

### **6.4.1 Projekt-Hintergrund und Daten**

Aufgrund dringenden Bedarfs an Bewässerungswasser und sinkender Trockenzeitabflüsse wurden schon in den 1970er Jahren erste Studien zum Bau einer Mehrzweckspeicher-Anlage bei Kandadji in Niger durchgeführt (SOFRELEC 1980). Ende der 1990er Jahre wurde diese Idee wieder aufgegriffen und neuere Machbarkeitsstudien durchgeführt (HC/BK 2002). Im Jahr 2007 wurde der Bau des Staudamms beschlossen und im August 2008 mit den Vorbereitungen zum Bau begonnen (ADB 2008).

Niger ist ein sehr armes Land, dessen Ökonomie hauptsächlich auf der Landwirtschaft aufbaut. Neben dem Bedarf an Bewässerungswasser wird auch Trinkwasser für die Versorgung der Hauptstadt Niamey benötigt. Durch die Erzeugung von Strom aus Wasserkraft könnte der Energieimport verringert sowie umweltfreundliche Energie in Verbrauchernähe gewonnen werden. Eine kostengünstige Energieversorgung der Bevölkerung würde den Lebensstandard erhöhen, weiterhin kann verfügbare elektrische Energie auch zu einer teilweisen Industrialisierung genutzt werden.

Die ersten Pläne für ein Mehrzweckspeicher-Projekt am Niger aus den 1970er Jahren waren sehr groß angelegt. Daher war es damals nicht möglich, die nötigen internationalen Investoren zu gewinnen. Neuere Pläne bauen auf ein wesentlich kleineres Projekt, das trotzdem möglichst vielen der Anforderungen gerecht werden kann.

In der hier betrachteten Fallstudie wird auf die neueren Machbarkeitstudien (HC/BK 2002) und Projektdaten eingegangen. Zunächst wurden die Haupt-Daten für Projektvarianten zusammengetragen (s. Tab. 6.20), die anschließend in einem Input-Output-Modell eingesetzt wurden. Daten aus dieser Studie sollen hier als Fallbeispiel für die Anwendung der Input-Output-Analyse für große Mehrzweckspeicherprojekte dienen.

## 6.4 Fallstudie Kandadji: Ein Mehrzweckspeicher am Niger

---

Mittlerer Jahresabfluss	$20 \cdot 10^9 m^3$ ;
Max. Dammhöhe:	30m
Länge:	9,200m
Stauvolumen	$5 \cdot 10^9 m^3$
Fläche	250km <sup>2</sup>
Bemessungshochwasser:	3,150m <sup>3</sup> /s
Installierte Leistung:	125MW
Mittlere Jahresenergieproduktion:	564GWh
Bewässerte Fläche:	122 000 ha

**Tabelle 6.20:** Projektdaten der geplanten Mehrzweckspeicheranlage Kandadji am Niger (HC/BK 2002)

### Trinkwasser

Eine zuverlässige Trinkwasserversorgung ist eine wichtige Grundlage für die Entwicklung einer Region. Mit wachsenden Bevölkerungszahlen kommt es in ariden Gebieten oft zu einer Trinkwasserknappheit. Für die Bevölkerung von Niamey werden in den kommenden Jahren voraussichtlich mehr als 250000 m<sup>3</sup> Trinkwasser/Tag benötigt (HC/BK 2002). Ein großer Teil dieses Trinkwassers soll aus dem Stausee von Kandadji zur Verfügung gestellt werden.

### Bewässerungslandbau

Es stehen zwischen 120000 und 140000 ha bewässerbare Fläche in unmittelbarer Nähe zum Fluss zur Verfügung. Mit dem Vorhandensein kostengünstiger elektrischer Energie ist es auch möglich, weitere höher gelegene Flächen zu bewässern. Allerdings muss für diese Flächen gesondert überprüft werden, ob das Verhältnis aus Kosten und Nutzen noch günstig ist.

Neben Reis, Gemüse und Obst für den lokalen Markt, können durch den Bewässerungslandbau auch Produkte zum Export sowie zur industriellen Weiterverarbeitung hergestellt werden. Durch den Anbau von Futterpflanzen kann die Viehwirtschaft verbessert und der Bedarf der Bevölkerung an tierischem Eiweiß gedeckt werden.

Bewässerung ermöglicht auch den Anbau landwirtschaftlicher Produkte, die einen hohen Wasserbedarf haben. Insbesondere Baumwolle und Zuckerrohr kann dem Export oder einer lokalen Weiterverarbeitung dienen. Ob der Anbau solch wasserintensiver Pflanzen in einem ariden Gebiet sinnvoll ist, oder ob Pflanzen mit geringerem Wasserbedarf auch den Anforderungen der Bevölkerung und der lokalen Industrie genügen muss abgewägt werden und ist letztendlich eine politische Entscheidung.

Wenn es durch den Klimawandel zu größerer Trockenheit kommt, wird vermutlich auf wassersparende Alternativen ausgewichen werden müssen, da die Bewässerungswassermengen dann voraussichtlich nicht mehr für den gewünschten Ertrag reichen. Eine wassersparende Pflanze für die Produktion von Pflanzenfasern stellt beispielsweise Kenaf (*Hibiscus cannabinus*, Siamjute) dar.

Wassersparende Bewässerungsmethoden, wie beispielsweise in Binder (2007) beschrieben, könnten den Ertrag pro eingesetztem Wasser noch erheblich steigern. Jedoch steigt mit komplexeren Bewässerungssystemen auch der Anspruch an Wartung und Bedienpersonal. Weiterhin sind die Investitionskosten und Betriebskosten für komplexere Bewässerungssysteme bei der Untersuchung mit zu betrachten.

### **Wasserkraft**

Während in den meisten Industrieländern schon sehr früh ein verhältnismäßig zuverlässiges Energie- und Elektrizitätssystem aufgebaut wurde und aufgrund der langsam wachsenden Nachfrage nur in geringem Umfang Modifikationen notwendig sind, ergibt sich in Niger, wie in den meisten Entwicklungs- und Schwellenländern, ein komplett anderes Bild. Graeber (2002) beschreibt, wie sich der Strombedarf in Entwicklungs- und Schwellenländern Afrikas in den nächsten Jahren verändern wird.

Der Energiebedarf Nigers beträgt im Moment gerade einmal 440 GWh/Jahr, bzw. 26,0 kg Erdöläquivalent pro Kopf (UNdata 2016; EIA 2016), womit das Land an 166. Stelle steht. Ein Großteil des Energiebedarfs wird mit Brennholz gedeckt sowie in geringen Mengen importiert. Eine eigene Versorgung mit sauberer elektrischer Energie aus Wasserkraft könnte den Lebensstandard verbessern und die Abhängigkeit von Nachbarländern verringern. Durch das Bevölkerungswachstum und um einen besseren Le-

bensstandard zu erreichen, wird in den nächsten Jahren der Energiebedarf erheblich steigen. Da Niger im Moment nur eine Elektrifizierungsrate von 4 % hat, gehen Hochrechnungen davon aus, dass bis zum Jahr 2025 der Jahresenergiebedarf von Niger auf 2000 GWh/Jahr ansteigt (Miketa und Merven 2013).

### **Sozioökonomische Auswirkungen und Industrie-Ansiedlung**

Durch den Bau eines Mehrzweckspeichers und damit einer zuverlässigen Wasser- und Stromversorgung ist es möglich, in der Region neben der Landwirtschaft weitere Industrien anzusiedeln. Dies führt zu einer Umstrukturierung der Region von einer traditionell landwirtschaftlich geprägten Gesellschaft hin zu einer industrialisierten Gesellschaft mit höherem Einkommensniveau. In den Machbarkeitsstudien (HC/BK 2002) wurde die Ansiedlung sehr landwirtschaftsnaher Industrien vorgeschlagen. So ist beispielsweise die Ansiedlung von Textilfaserproduktion und die Weiterverarbeitung von Zuckerrohr geplant. Diese Industrien hätten bei Ansiedlung im Projektgebiet den Vorteil sehr kurzer Transportwege für ihre Vorprodukte. Allerdings handelt es sich bei diesen Industriezweigen um sehr wasser- und energieaufwendige Produktionsprozesse. Hier muss daher abgewägt werden, welche Industrien lokal angesiedelt werden sollen und wo es sinnvoller ist, landwirtschaftliche Produkte in andere Regionen zu bringen, in denen vielleicht mehr Wasser vorhanden ist.

Durch die Industrialisierung sowie die Verfügbarkeit von Trinkwasser und elektrischer Energie aus Wasserkraft soll es zu einer Verbesserung des Lebensstandards in der Region kommen. Dieses Entwicklungsziel kann bei der Modellierung durch die Auswahl und Gewichtung der Endverbraucher-Vektor-Elemente verstärkt berücksichtigt werden.

### **Ökologische und hygienische Aspekte**

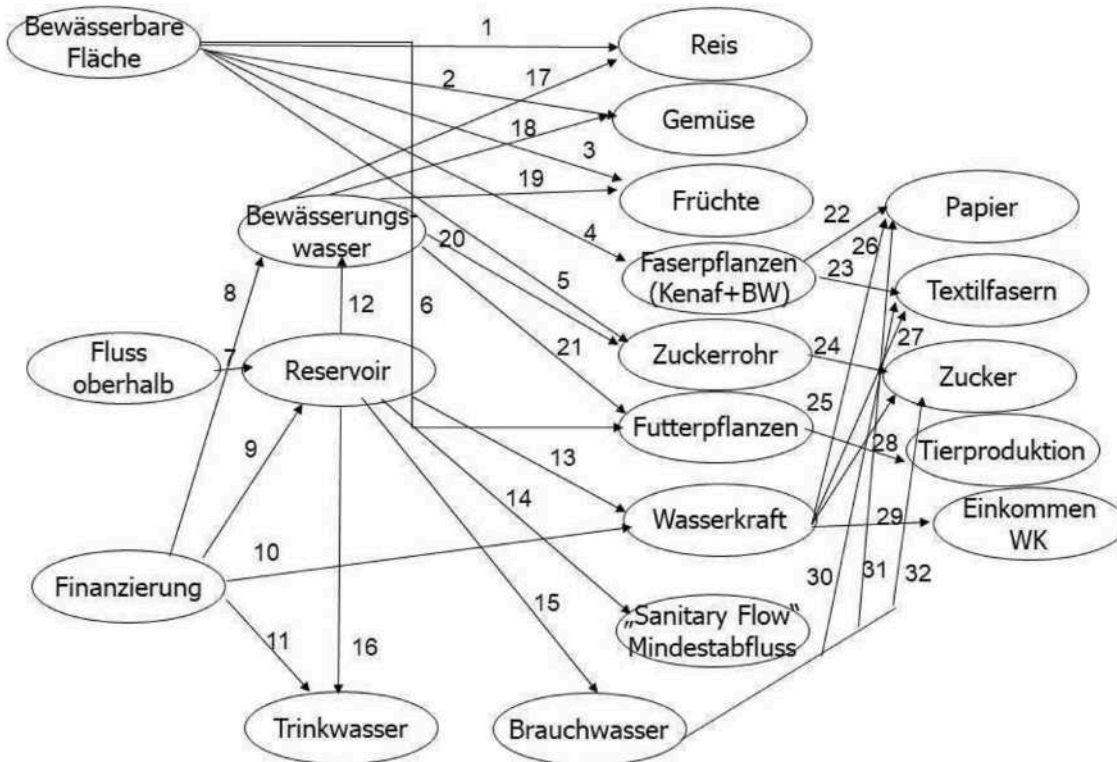
Laë u. a. (2002) beschreibt die klimatischen und ökologischen Gegebenheiten des Niger. Hierbei wird deutlich, dass vor allem das Jahrzehnt 1980-1990 besonders trocken war. Diese starke Dürre führt nicht nur zu einem Wassermangel für die Trinkwassergewinnung und die Landwirtschaft, sondern auch für die Flussökologie.

Bei sehr niedrigen Abflüssen ist außerdem eine Abführung des Abwassers im Fluss nicht mehr ausreichend gewährleistet. Da am Niger Abwässer ungereinigt in den Fluss eingeleitet werden, ist für eine hygienische, der Selbstreinigungskraft des Gewässers entsprechende Abführung eine Mindestverdünnung erforderlich.

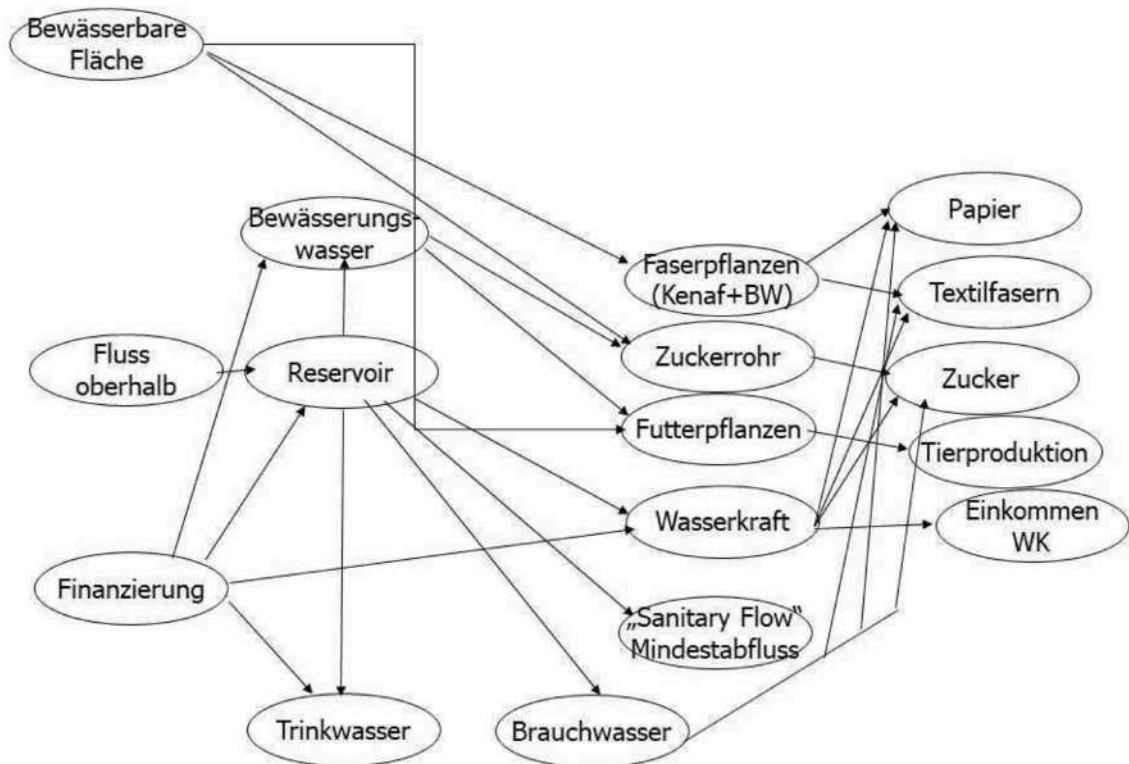
### **6.4.2 Qualitatives Input-Output-Modell für die Mehrzweckspeicheranlage Kandadji**

Das allgemeine qualitative Input-Output-Modell für Mehrzweckspeicher wurde an die Anforderungen und Teilbereiche des Kandadji-Projekts angepasst. Hierbei entstanden für verschiedene Projektvarianten Input-Output-Graphen mit deren Hilfe man sehr einfach die verschiedenen Lieferbeziehungen und Abhängigkeiten der einzelnen Projekt-Teile darstellen kann. Für eine einfache Darstellung von Mehrfachnutzen bei der Ressource Wasser wird in Abbildung 6.17 wie in Kapitel 5 beschrieben in unterschiedliche Ressourceneigenschaften aufgetrennt. Die möglich energetische, also substanzerhaltende, Nutzung wird von der „chemischen“, also substanzverbrauchenden, Nutzung partiell abgekoppelt.

## 6.4 Fallstudie Kandadji: Ein Mehrzweckspeicher am Niger

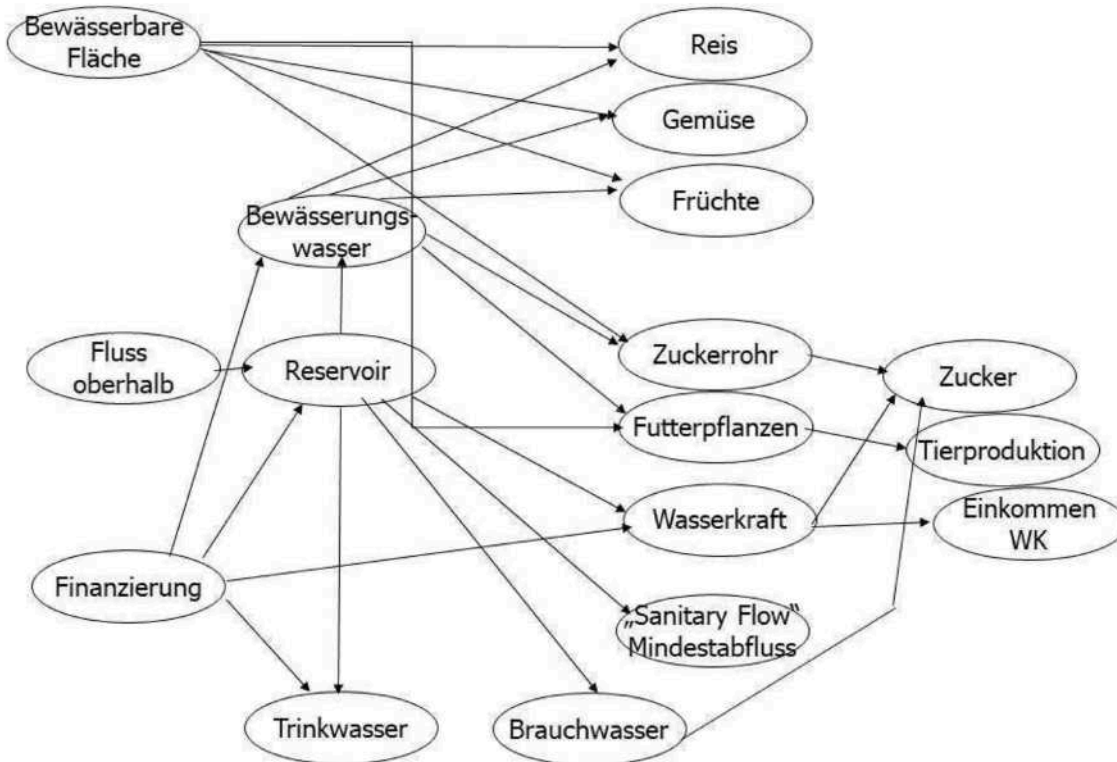


**Abbildung 6.13:** Input-Output-Graph angepasst an die Planungen des Mehrzweckspeichers Kandadji mit Wassernutzung für Eigenbedarf aus lokaler Landwirtschaft



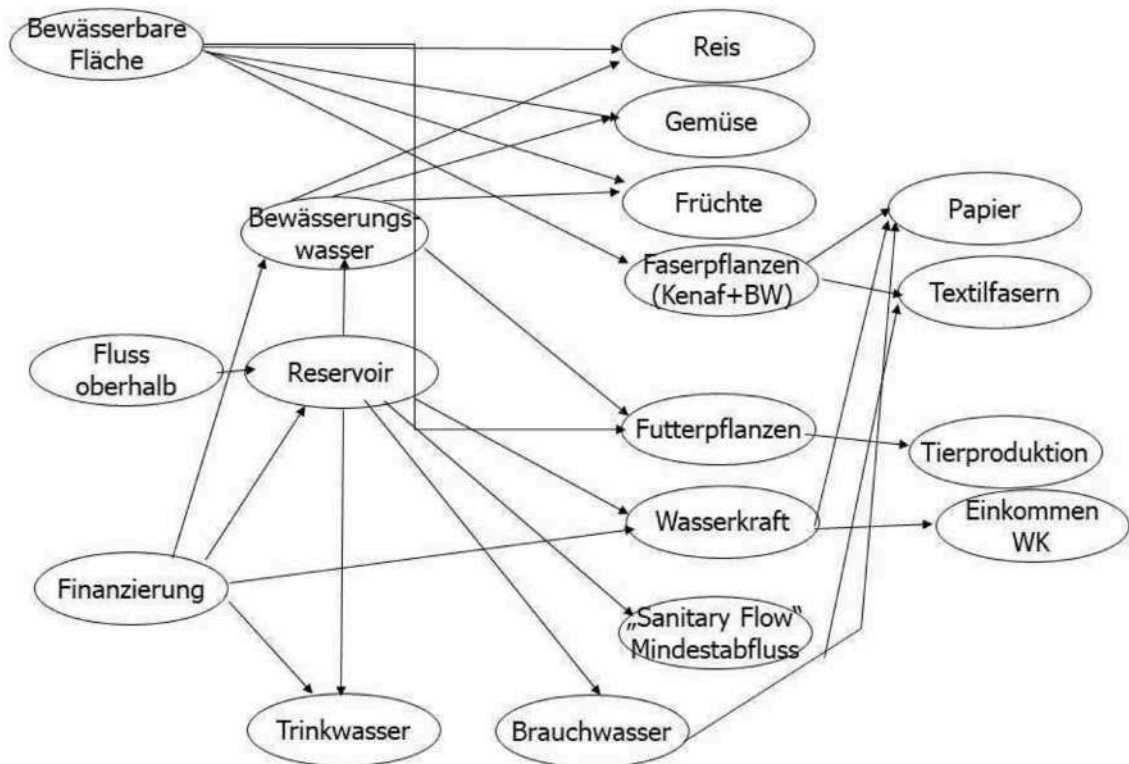
**Abbildung 6.14:** Input-Output-Graph angepasst an die Planungen des Mehrzweckspeichers Kandadji ohne Wassernutzung durch landwirtschaftlichen Eigenbedarf

## 6.4 Fallstudie Kandadji: Ein Mehrzweckspeicher am Niger

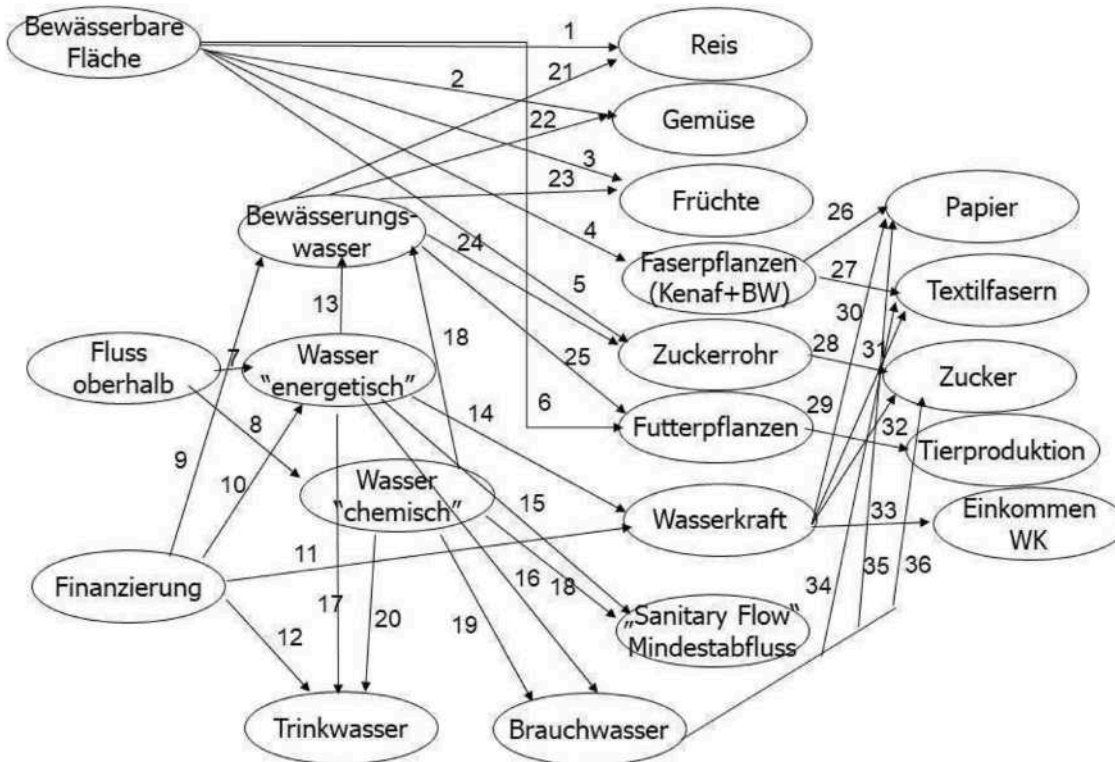


**Abbildung 6.15:** Input-Output-Graph angepasst an die Planungen des Mehrzweckspeichers Kandadji mit landwirtschaftlichem Eigenbedarf jedoch ohne Textilindustrie





**Abbildung 6.16:** Input-Output-Graph angepasst an die Planungen des Mehrzweckspeichers Kandadji ohne Zuckerrohranbau und Zuckerherstellung mit Faserpflanzen (Kenaf und Baumwolle (BW)) und Weiterverarbeitung



**Abbildung 6.17:** Input-Output-Graph angepasst an die Planungen des Mehrzweckspeichers Kandadji mit Auftrennung der Ressourcen zur Mehrfachnutzung

### 6.4.3 Bestimmung von Transformationskoeffizienten

Aus technischen und hydrologischen Daten sowie wirtschaftlichen Zusammenhängen wurden die Transformationskoeffizienten  $a_{ij}$  für ein quantitatives Input-Output-Modell ermittelt. Hierbei wurde teilweise auf Daten aus benachbarten Ländern oder ähnlichen klimatischen Regionen zurückgegriffen.

### **Energieerzeugung**

Die erzeugte elektrische Energie pro Wassermenge lässt sich aus der Fallhöhe und dem Wirkungsgrad der eingesetzten hydraulischen Maschinen ermitteln (s. Gleichung 5.2). Somit ist der direkte Wirkungsgrad im Transformationskoeffizienten  $\alpha_{\text{wasser} \rightarrow \text{energie}}$  enthalten. Verluste, die nicht direkt in der Wasserkraftanlage entstehen, werden als "Eigenbedarf" integriert.

### **Landwirtschaft**

Für die Landwirtschaft wurden Transformationskoeffizienten für einige typische Produkte bestimmt. Diese Pflanzenarten sind auch bei den Machbarkeitsstudien (HC/BK 2002; Republic of Niger 2008) als geplante Anbauprodukte angegeben.

Diese wurden empirisch aus Ertragsmengen pro Fläche und durchschnittlichen Bewässerungswassermengen ermittelt. Für die Bewässerungswassermengen wurde auf eine Modellierung mit CROPWAT oder ähnlicher Software verzichtet und auf Literaturwerte zurückgegriffen. Dies war notwendig, da keine detaillierten Boden- oder Klima-Charakteristiken vorlagen. Für eine Abschätzung des Wassereinsatzes für die jeweiligen landwirtschaftlichen Produkte ist dies zunächst ausreichend. Für den Wasserbedarf unterschiedlicher landwirtschaftlicher Produkte wurde auf Literaturwerte aus ähnlichen klimatischen Regionen zurückgegriffen. Es wurde von relativ einfachen Bewässerungssystemen ausgegangen und nicht mit sehr wassersparenden Technologien wie beispielsweise die Tropfbewässerung gerechnet. Dies ist einerseits so anzunehmen, da die Investitionskosten und der Ausbildungsbedarf des Bedienpersonals bei einfacheren Technologien geringer sind, andererseits tritt auch bei diesem Szenario die höchstmögliche Wasserbedarfsmenge auf. Man kann also mit den so ermittelten Transformationskoeffizienten eine Obergrenze des Wasserbedarfs bestimmen. Da keine genauen Bodencharakteristiken für die landwirtschaftlichen Flächen vorliegen, sind die Ertragsmengen pro Hektar auch nur ungefähr abzuschätzen und somit ist der Transformationskoeffizient  $\alpha_{\text{flaeche} \rightarrow \text{produkt}}$  auch nur überschlägig festlegbar. Daher wurde für die Erträge eher ein unteres Limit zur Bestimmung der jeweiligen Transformationskoeffizienten angenommen. Düngemiteleinsetz wurde in die Betriebskosten eingerechnet und nicht gesondert aufgeführt. Auf eine Untersuchung des Einflusses auf die Was-

## 6.4 Fallstudie Kandadji: Ein Mehrzweckspeicher am Niger

sergüte mit mit einer gesonderten Transformation wurde hier aufgrund der schwachen Datenlage verzichtet.

In Tabelle 6.21 sind die Transformationskoeffizienten für den Teilgraphen Landwirtschaft aufgelistet.

Kanten-ID	Anfangsknoten	Endknoten	$a_{ij}$	Einheiten
17	Bewässerungswasser	Reis	2500	m <sup>3</sup> /t
18	Bewässerungswasser	Gemüse	3000	m <sup>3</sup> /t
19	Bewässerungswasser	Früchte/Obst	3500	m <sup>3</sup> /t
20	Bewässerungswasser	Faserpflanzen	2083	m <sup>3</sup> /t
21	Bewässerungswasser	Zuckerrohr	2000	m <sup>3</sup> /t
22	Bewässerungswasser	Futterpflanzen	1800	m <sup>3</sup> /t
1	Landwirtschaftliche Fläche	Reis	0,25	ha/t
2	Landwirtschaftliche Fläche	Gemüse	0,2	ha/t
3	Landwirtschaftliche Fläche	Früchte/Obst	0,18	ha/t
4	Landwirtschaftliche Fläche	Faserpflanzen	0,6	ha/t
5	Landwirtschaftliche Fläche	Zuckerrohr	0,013	ha/t
6	Landwirtschaftliche Fläche	Futterpflanzen	0,45	ha/t
32	Brauchwasser	Tierprodukt	15500	m <sup>3</sup> /t
25	Futterpflanzen	Tierprodukt	7200	t/t

**Tabelle 6.21:** Quantifizierung des Teilgraphen Landwirtschaft

### Weitere Industriezweige

Da die landwirtschaftlichen Produkte teilweise regional weiterverarbeitet werden können, werden diese Industriezweige in die Gesamtbetrachtung des Projekts mit einbezogen. Weiterhin sind die lokalen Industrien ein wichtiger Wasserverbraucher.

Für die Rohstoffmengen je Einheit Endprodukt wurden Werte aus der Literatur angenommen. Für den Technisierungsgrad wurde ein mittleres bis niedriges Technologielevel angenommen. Sehr wasser- oder energie-sparende Produktionsprozesse, die auf hochspezialisierten Technologien basieren, wurden nicht in Erwägung gezogen, da hierbei von zu großen Produktionsausfällen bei Anlagendefekten auszugehen ist und außerdem die Investitionskosten für die Anlagen beim aktuellen Entwicklungsstand der Region zu groß ausfielen. Die in den Machbarkeitsstudien (Republic of

Niger 2008; HC/BK 2002) vorgeschlagenen Industriezweige beinhalten sehr wasserintensive Produktionsprozesse, wie beispielsweise die Textil- und Papierindustrie sowie die Produktion von Zucker aus Zuckerrohr. Trotz ihres hohen Wasserverbrauchs sind diese Industrien als für die Region geeignet einzustufen, da sie kein extrem hohes Ausbildungsniveau der Arbeiter erfordern und auf lokal produzierte Vorprodukte zurückgreifen können. Der Vorteil auf lokale Produkte zurückgreifen zu können ist insbesondere in Regionen mit geringfügig ausgeprägter Infrastruktur wichtig, da hier häufig nur ein Zu- und Abtransport von stark veredelten Produkten lohnend erscheint. Dennoch ist in verschiedenen betrachteten Szenarien auch auf weniger wasserintensive Nutzungsarten eingegangen worden. Für die Weiterverarbeitung von Faserpflanzen wurden Energie- und Wasserbedarfsmengen aus Wiegmann (2002) verwendet. Transformationskoeffizienten für unterschiedliche Industrieprodukte sind in Tabelle 6.22 aufgelistet.

Kanten ID	Anfangsknoten	Endknoten	$a_{ij}$	Einheiten
30	Brauchwasser	Papier	12	m <sup>3</sup> /t
31	Brauchwasser	Textilfasern	29	m <sup>3</sup> /t
23	Brauchwasser	Zucker	10	m <sup>3</sup> /t
22	Faserpflanzen	Papier	3	t/t
23	Faserpflanzen	Textilfasern	3,4	t/t
24	Zuckerrohr	Zucker	10	t/t
26	Elektrische Energie	Textilfasern	3600	kWh/t
27	Elektrische Energie	Papier	4200	kWh/t
28	Elektrische Energie	Zucker	240	kWh/t

**Tabelle 6.22:** Quantifizierung des Teilgraphen Industrie

#### 6.4.4 Modellierung verschiedener Szenarien

Die so erstellte Transformationsmatrix wurde dann zur Berechnung benötigter Ressourcen für verschiedene Anforderungsszenarien verwandt. Als Endverbraucher wurden verschiedene Lasten wie z. B. Trinkwasserbedarf, Produktionsmengen landwirtschaftlicher Erzeugnisse, produzierte elektrische Energie etc. an das System angelegt. Aus diesen Lastszenarien können Szenarien bewertet werden, ob sie mit den vorhandenen Ressourcen möglich sind. Mit Hilfe des Endverbrauchervektors  $U_i$  und der im vorigen Abschnitt quantifizierten Transformationsmatrix  $A$  kann nun der Ressourcenbedarf verschiedener Nutzungsszenarien ermittelt werden.

## 6.4 Fallstudie Kandadji: Ein Mehrzweckspeicher am Niger

Wenn eine starke Änderung der Endverbrauchsmengen vorhanden ist, muss beachtet werden, dass evtl. für größere Produktionsmengen andere Technologien zu verwenden sind sowie nichtlineare Zusammenhänge immer nur abschnittsweise linearisiert werden. Daher müssen bei großen Variationen des Endverbrauchervektors die Transformationskoeffizienten  $a_{ij}$  in der Transformationsmatrix  $A$  (s. Gleichung 4.6, Seite 34) mit angepasst werden. Auf diese Weise evaluierte mögliche Szenarien könnten dann beispielsweise von Entscheidungsträgern nach den jeweiligen Präferenzen bewertet werden.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Mindestwasser	946Mio m <sup>3</sup>	946Mio m <sup>3</sup>	946Mio m <sup>3</sup>
Energieproduktion	420 GWh	420 GWh	250 GWh
Trinkwasser	91Mio m <sup>3</sup>	91Mio m <sup>3</sup>	91Mio m <sup>3</sup>
Kenaf	1500000 t	1500000 t	1500000 t
Textilfasern	300000 t	0	300000 t
Papier	1000000 t	0	1000000 t
Zucker	100000 t	100000 t	0
Reis	500000 t	500000 t	500000 t
Gemüse/Früchte	300000 t	300000 t	300000 t
Möglich?	nein	ja	ja

**Tabelle 6.23:** Evaluation von Nutzungsszenarien für den Mehrzweckspeicher Kandadji

Zunächst wurden die in den Machbarkeitsstudien vorgeschlagenen Produktionsmengen untersucht (siehe Tabelle 6.23). Hierbei stellte sich heraus, dass entweder weitere Ressourcen zusätzlich zum Fluss vorhanden sein müssten, oder die Produktionsmengen nur bei einem überdurchschnittlichen Jahresabfluss möglich sind. Insbesondere die hohen angesetzten Produktionsmengen für wasserintensive Industrieprodukte sind mit den vorhandenen Ressourcen nicht erreichbar. Wenn man von sehr wassersparenden Technologien und dadurch veränderten Transformationskoeffizienten ausgeht, kann mit dem Jahresmittelabfluss gerade noch die vorgeschlagene Produktionsmenge erwirtschaftet werden. Geht man von eher sinkenden Abflüssen und evtl. auch etwas geringeren landwirtschaftlichen Flächen aus, um eine konservative Abschätzung der möglichen Produktionsmengen zu machen, muss der Endverbrauchervektor vermindert werden. Durch Variation des Endverbrauchervektors konnten jedoch verschiedene Szenarien gefunden werden, die mit den vorhandenen oder auch verringerten Ressourcen gut möglich sind (s. Tabelle 6.23). Die möglichen Produktions-

mengen liegen leicht unter denen, die in der Machbarkeitsstudie von 2002 (HC/BK 2002) vorgeschlagen werden.

### **6.4.5 Optimierung für das System Kandadji**

Aus dem Modell des Mehrzweckspeicher-Projekts Kandadji wurde in QSOpt Applegate u. a. (2016) ein lineares Programmiermodell aufgestellt. Als Restriktionen wurden sowohl bekannte Maximalressourcen als auch im Input-Output-Modell evaluierte Nutzungswerte implementiert. Mit variablen Anforderungsprofilen können so unterschiedliche Optima erreicht werden.

Die hier beschriebene Optimierung wurde basierend auf dem oben entwickelten Modell auf der Datengrundlage von Machbarkeitsstudien (SO-FRELEC 1980; HC/BK 2002) durchgeführt. Da es sich hierbei um für die Planungsphase „Machbarkeitsstudie“ recht detaillierte Daten handelt, ist dies zu verantworten. Ein lokales Optimum der Wasserverteilung konnte für die Verwendung des zur Verfügung stehenden Bewässerungswassers hauptsächlich für die Produktion von Gemüse und Früchten für den regionalen Markt gefunden werden. Jedoch sollte man Ergebnisse einer Optimierung auf dieser Basis nicht als endgültige Aussage interpretieren, da sie stark von den festgehaltenen Parametern sowie der festgelegten Systemgrenze abhängen.

```

Problem
Kandadji

Minimize
obj: x1 + x2 + x3 + x4 + x5 + x6 + x7 + x8 + x9 + x10 + x11
    + x12 + x13 + x14 + x15 + x16 + x17 + x18 + x19 + x20

Subject
c1: x1 - x4 >= 0
c2: x2 -0.25x10 -0.2x11 -0.18x12 -0.34x13
    -0.05 x14 -0.01x15 >= 0
c3: x2 + x3 -0.0001x4 + -0.0001x5 -0.0001x6 -0.0001 x7
    -0.0001x8 >= 0
c4: 0.95x4 - x5 - x6 - x7 - x8 - x9 >= 0
c5: 0.93 x5 -2500 x10 -3000 x11 -3500 x12 -2083.333
    x13 -2000 x14 -1800 x15 >= 0
c6: 0.94 x6 -3000x16 -3000 x17 -3000 x18 -0.03333x20 >= 0
c7: x7 -12x16 -29x17 -10x18 -160x19 >= 0
c8: x8 >= 0
c9: x9 >= 0
c10: x10 >= 0
c11: x11 >= 300000
c12: x12 >= 500000
c13: x13 -3x16 -3.4x17 >= 0
c14: x14 -10x18 >= 0
c15: x15 -x19 >= 0
c16: x16 >= 0
c17: x17 >= 0
c18: x18 >= 0
c19: x19 >= 0
c20: x20 >= 0
c21: x1 <= 21759840000
c22: x2 <= 1220000
c23: x2 <= 34571428570
    
```

**Abbildung 6.18:** Formulierung des linearen Programmiermodells für die Anwendung des Simplex-Solvers QSopt für das System Mehrzweckspeicher Kandadji



### 6.4.6 Bewertung der Fallstudie Kandadji

In dieser Fallstudie konnte ein sehr stark vernetztes System mit einem Input-Output-Modell analysiert werden. Es konnte gezeigt werden, dass mit den vorhandenen Ressourcen die für das Projekt geplanten Produktionsmengen nur knapp möglich sind. Daher muss bei den in den Machbarkeitsstudien vorgeschlagenen Nutzungsszenarien noch auf weitere Ressourcen zugegriffen werden, die nicht direkt in den Projektbeschreibungen eingegliedert sind. Weiterhin wird ein Import von Ressourcen in das Projektgebiet erfolgen müssen, um die geplanten Produktionsmengen sicherzustellen. Allerdings muss beachtet werden, dass die Wasserbedarfsmengen für die Landwirtschaft in der hier durchgeführten Studie auf Literaturdaten Bednarz u. a. (2003); Madulu (2003); Allen u. a. (1998) basieren und daher evtl. eine etwas geringere Wassermenge abgeschätzt werden könnte, wenn genauere Boden- und Klimaparameter mit berücksichtigt werden.

Kann unabhängig von der vielleicht etwas zu konservativen Schätzung der Verbrauchswerte davon ausgegangen werden, dass mit dem Klimawandel das Wasserdargebot noch wesentlich geringer als im Moment wird, wird die landwirtschaftliche Produktionsmenge und die Energieproduktionsmenge reduziert werden müssen.

Bei einer Verschiebung des Anbaus hin zu wassersparenderen Produkten kann gesamtheitlich mit den gleichen natürlichen Ressourcen ein besseres gesamtwirtschaftliches Ergebnis erzielt sowie sichergestellt werden, dass die Ressourcen nachhaltig vorhanden sind.

Das in dieser Fallstudie entwickelte Input-Output-Modell für den Mehrzweckspeicher Kandadji ist dadurch, dass es im wesentlichen von vorne herein aus linearen Wirkzusammenhängen besteht und nicht wie in den vorher behandelten Fallstudien linearisierten Zusammenhängen sehr einfach für unterschiedliche Nutzungsszenarien und Ressourcenvorkommen zu verwenden, da die Transformationskoeffizienten nicht für bestimmte Größenbereiche von Szenarien angepasst werden müssen. Daher kann das Modell auch für das Management des jährlichen Betriebs der fertigen Anlage verwendet werden. Sollten durch den Klimawandel oder Schwankungen im Jahresabfluss die vorhandenen Ressourcen in einem Jahr wesentlich geringer ausfallen, müssten die Entscheidungsträger einen angepassten Endverbrauchervektor bestimmen, der dann wieder als mögliches Szenario mit den geringeren Ressourcen evaluiert werden kann. Hierbei müssen dann Prioritäten für Trinkwasser, Bewässerungswasser oder Energieproduktion

gesetzt werden. Da der Mehrzweckspeicher Kandadji als Jahresspeicher betrieben werden soll, muss bei der Steuerung aktueller Produktionsmengen ohnehin die Planung für den Rest des Jahres berücksichtigt werden.

In dieser Fallstudie konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz der Input-Output-Analyse mit Transformationskoeffizienten, die auf empirischen Werten, die teilweise aus anderen Regionen stammen, trotz Einschränkungen ein verhältnismäßig brauchbares Entscheidungswerkzeug generiert werden kann, das sich dann nach und nach mit besseren regionalen Werten anpassen lässt. Somit ist der Einsatz dieser Methode auch in stark vernetzten Projekten mit wenig vorhandenen Daten möglich.

## **6.5 Fallstudie Gezeitenkraftwerk am Severn Ästuar**

Neben den klassischen Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern, wurden in dieser Arbeit auch Ansätze für die Anwendung der IO-Analyse auf Gezeitenkraftwerke untersucht. In neuerer Zeit ist Meeresenergie wieder stärker im Gespräch, da hier im Gegensatz zu den konventionellen Wasserkraftanlagen noch ein sehr großes ungenutztes Potential vorhanden ist. Insbesondere die Nutzung der Gezeitenenergie ist eine interessante Möglichkeit, erneuerbare Grundlastenergie zu gewinnen, da sie eine zuverlässige, regelmäßige und voraussagbare Energieform ist.

Gezeitenenergie wird schon seit sehr langer Zeit in Gezeitenmühlen zur Energiegewinnung genutzt. Diese Mühlen sind meistens an kleineren Ästuaren zu finden. In neuerer Zeit sind größere Gezeitensperren geplant, die für ein großes Grundenergie-Kraftwerk genutzt werden sollen. Das erste größere Gezeitenkraftwerk wurde in den 60er Jahren an der Mündung der Rance bei Saint Malo in Frankreich gebaut (Kirby und Retiere 2009).

Erfahrungen aus diesen frühen Anlagen in Bezug auf ökologische Auswirkungen, die Sedimentproblematik sowie verschiedene Betriebsmodi können und sollten nun auch in die Planung neuerer Anlagen einbezogen werden.

### **6.5.1 Bedingungen am Severn Ästuar**

Der Severn Ästuar ist einer der größten Ästuarare in Großbritannien mit einer Fläche von 55.700 Hektar, wovon 20.000 Hektar Wattflächen („inter-tidal habitat“) sind. Der Tidenhub beträgt bis zu 14,5 m (EA 2008).

Aufgrund des großen Tidenhubs im Bristolkanal (Bristol Channel) und insbesondere im Severn Ästuar sowie der Trichter-Form ist der Bau einer Gezeitensperre oder einer anderen Nutzung der dort vorhandenen Gezeitenenergie besonders wirkungsvoll. Der Severn mit seinen 10 Teilästuaren bietet etwa sieben Prozent der gesamten ästuaren Ressource von Großbritannien (DECC 2010; EA 2006). Daher ist es hier sehr wichtig, Auswirkungen einer Gezeitensperre nicht nur hinsichtlich der energiewirtschaftlichen Seite sondern auch auf die Ökologie des Ästuars sehr genau zu untersuchen.

Schon 1849 wurden Überlegungen angestellt, den Severn mit einer Sperre energetisch zu nutzen und den Damm gleichzeitig für den Bau einer Straße/Eisenbahnlinie zu verwenden (Carne 1995). Zu dieser Zeit stellte jedoch die große zu überwindende Strecke und der hohe Tidenhub die potentiellen Bauherren vor zu große Probleme, so dass die Pläne wieder verworfen wurden.

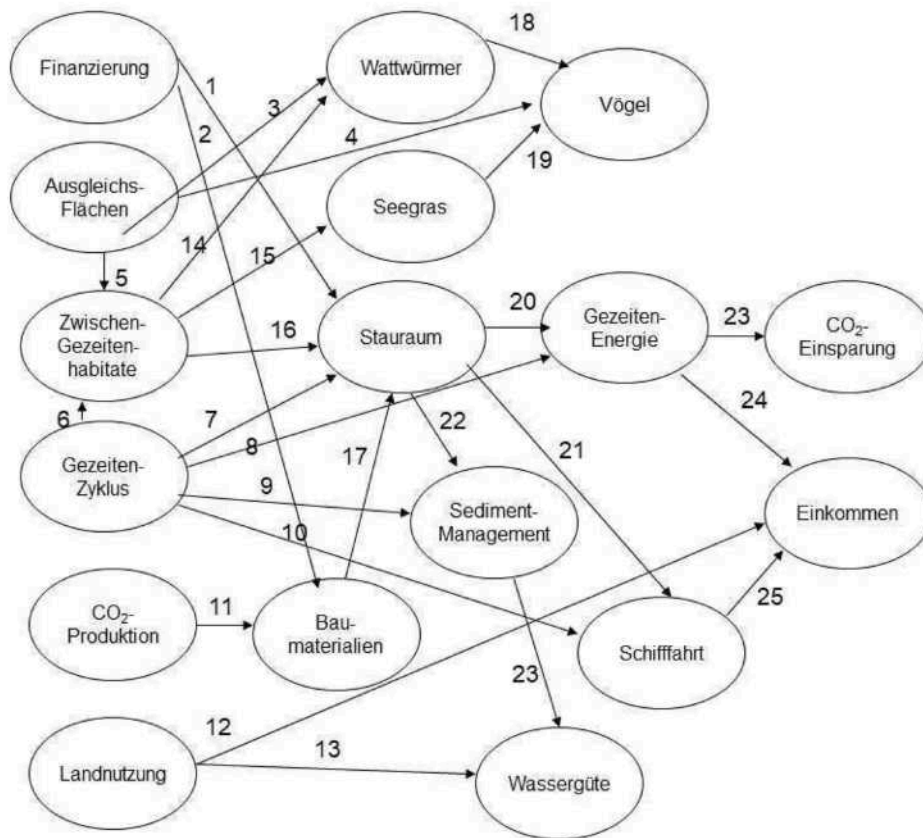
Im Rahmen der CO<sub>2</sub>-Einsparung, die Großbritannien im Rahmen des Kyoto-Protokolls zu erbringen hat, könnte das geplante Gezeitenenergieprojekt einen großen Beitrag leisten. So könnten nach DECC (2010) etwa 5 % des Gesamtenergiebedarfs von Großbritannien alleine durch dieses Projekt gedeckt werden.

Ein solch großes Projekt hat jedoch auch gewaltige Auswirkungen auf die lokalen Habitate. Besonders bedeutsam sind die sogenannten „Mud-Flats“, also Wattflächen, deren Wattwürmer und andere Kleintiere großen Zugvögelschwärmen und lokalen Vögeln als Nahrungsquelle dienen.

### **6.5.2 Ein qualitatives Input-Output-Modell für den Severn Ästuar**

Um ein qualitatives Modell für den Severn aufzustellen, wurden zunächst die relevanten technischen und ökologischen Faktoren identifiziert. Für die unterschiedlichen Projektvarianten der Gezeitenenergiegewinnung sind unterschiedliche Faktorgrößen relevant. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Varianten für eine Gezeitensperre betrachtet. Andere Projektvarianten, wie beispielsweise Gezeitenströmungs-Turbinen oder eine Gezeiten-Lagune können aber analog untersucht werden.

Da es sich bei einer Gezeitensperre am Severn um ein sehr großes Projekt mit überregionalen Auswirkungen handelt, ist besonders wichtig, die Systemgrenze sinnvoll zu setzen. Für eine Betrachtung in einer frühen Planungsphase sollte hier die Systemgrenze einerseits nicht zu eng gesetzt werden, andererseits liegen viele genaueren Untersuchungen noch nicht vor. Daher ist es sinnvoll, ein größeres qualitatives Modell aufzustellen und dann verschiedene Teilsysteme zunächst getrennt zu betrachten.



**Abbildung 6.19:** Input-Output-Graph für ein Gezeitenkraftwerk am Severn Ästuar

### 6.5.3 Quantifizierung eines Modells für den Severn Ästuar

#### Energieerzeugung

Die mögliche Energieerzeugung hängt entscheidend davon ab, welche Art der Gezeitenenergienutzung betrachtet wird. Für die hier vorliegende Studie wurde davon ausgegangen, dass eine Gezeiten Sperre gebaut wird und somit die variablen Parameter der Standort sowie die Betriebsart sind. Es ist hierbei möglich, dass nur bei Ebbe, bei Ebbe und Flut oder nur bei Flut elektrische Energie produziert wird. Eine weitere Möglichkeit ist,

dass zusätzlich ein Pumpbetrieb stattfindet, um die Fallhöhe noch weiter zu verbessern. Es lässt sich ein stellenweise linearer Zusammenhang zwischen eingedämmter Fläche und erzeugter elektrischer Energie herstellen.

### **CO<sub>2</sub>-Einsparung**

Eine wichtige zu betrachtende Transformation ist die CO<sub>2</sub>-Einsparung pro produzierter elektrischer Energiemenge. Hierzu wurde zunächst eine analoge CO<sub>2</sub>-Ausstoßmenge für ein konventionelles Wärmekraftwerk auf Kohle- oder Erdölbasis bestimmt (Woollcombe-Adams u. a. 2008). Anschließend wurde die CO<sub>2</sub>-Menge, die beim Bau einer Gezeitensperre am Severn anfallen würde ermittelt. Während der Bauphase werden größere Mengen CO<sub>2</sub> beim Transport sowie bei der Gewinnung von Baumaterialien produziert. Eine kleine Menge wird durch den Betrieb einer Gezeitensperre und ökologische Veränderungen im Ästuar erzeugt.

### **Wassergüte**

Neben rein energetischen und ökologischen Betrachtungen ist es am Severn notwendig, auf die Wassergüte einzugehen, da sich die Umwandlung bzw. der Austausch von Nährstoffen je nach Größe des Speichers und Betriebsweise unterschiedlich gestaltet. Der Eintrag der größten Menge an Nährstoffen stammt aus nicht-Punkt-Quellen, also hauptsächlich aus der Landwirtschaft. Daher kann für den Eintrag in den Severn zunächst ein Transformationskoeffizient mit der Export-Koeffizienten-Methode (Johnes 1996) bestimmt werden. Die nächste Transformation ist die Umwandlung im Ästuar. Zur Berechnung der Umwandlungsvorgänge wurden einfache Zusammenhänge auf Basis der Gleichungen des Modells Qual2k verwendet (US-EPA 2016, 1987).

### **Habitate**

Einige der wichtigsten Habitate am Severn sind die Zwischengezeitenhabitate, die sich dadurch auszeichnen, dass sie zu einem Teil des Gezeitenzyklus überflutet sind, zu anderen Zeiten trocken fallen. Die teilweise trocken

fallenden Gebiete wurden aus Modellergebnissen von Ahmadian (2013), die mit DIVAST (Falconer u. a. 2001) einem zweidimensionalen hydrodynamischen Modell berechnet wurden, bestimmt. Hierzu wurde die Anzahl der trocken fallenden Zellen bestimmt und ins Verhältnis mit der Größe der Speicherfläche gesetzt bzw. auf die erzeugte Energiemenge bezogen. Ein gewisser Anteil an Watt-Habitaten kann durch finanzielle Ausgleichs wieder hergestellt werden. Hierfür müssten dann beispielsweise landwirtschaftliche Flächen an der Küste aufgekauft und entsprechend in Anlehnung an natürliche Wattflächen angelegt werden. Atkinson u. a. (2001) zeigt, wie dies zu einem gewissen Ausmaß möglich ist.

### Transformationskoeffizienten

Aus den oben beschriebenen Zusammenhängen wurden Transformationskoeffizienten für die Transformationsmatrix bestimmt. Diese sind in Tabelle 6.24 aufgelistet.

Startknoten	Endknoten	$a_{ij}$	Einheiten
Finanzinputs	Ausgleichsfläche	15	GBP/m <sup>2</sup>
Finanzinputs	Gezeitenenergie	320	GBP /MWh
Gezeitenenergie	CO <sub>2</sub> -Reduktion	0,0012	tCO <sub>2</sub> /MWh
Wattfläche	Stauraumfläche	1	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
Stauraumfläche	Gezeitenenergie	29,4	m <sup>2</sup> /MWh
Gezeitenenergie	Gewinn	0,0009	MWh/GBP

**Tabelle 6.24:** Transformationskoeffizienten für das Modell Gezeitenperre Severn Ästuar

### 6.5.4 Evaluierung von Szenarien

Die Anforderungen der verschiedenen ökologischen und ökonomischen Teilsysteme sowie unterschiedlicher Interessenvertreter wurden in unterschiedlichen Szenarien als Endverbrauchervektor dargestellt und anschließend auf ihre Realisierbarkeit untersucht. Neben der Energieerzeugung ist ein sehr wichtiger Interessenvertreter der Vogelschutz, dessen Anforderung genügend zur Verfügung stehender Zwischengezeitenhabitats, also Wattflächen, sind. Für die Habitats innerhalb des Ästuars und das gesamte

## 6.6 Zusammenfassende Betrachtung der Fallstudien

---

ökologische Netzwerk des Ästuars sind die vorhandenen Nährstoffkonzentrationen eine wichtige Größe.

Tabelle 6.25 zeigt einige ausgewertete Szenarien.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Gezeitenenergie	15TWh/a	17 TWh/a	17 TWh/a
CO <sub>2</sub> Reduktion	70000 t	70000 t	80000 t
Wattflächen (geschützt oder angelegt)	200 km <sup>2</sup>	300 km <sup>2</sup>	250 km <sup>2</sup>
Möglich?	ja	nein	ja

**Tabelle 6.25:** Machbarkeit unterschiedlicher Nutzungsszenarien am Severn Ästuar

### 6.5.5 Bewertung der Fallstudie Gezeitemperre Severn Ästuar

Die Fallstudie zur Gezeitemperre am Severn Ästuar zeigt die weitere Anwendbarkeit des entwickelten Modells auf unterschiedliche wasser- und energiewirtschaftliche Projekte. In dieser Fallstudie konnte die Anlegung ökologischer Ausgleichsflächen einbezogen werden. Das Modell für den Severn wurde auch in einen weitergehenden energiewirtschaftlichen Zusammenhang eingebunden. Aufgrund der frühen Planungsphase sind noch keine sehr genauen Daten vorhanden, so dass nicht alle Modellparameter auf einer breiten Datenbasis stehen. Das aufgestellte Modell kann jedoch weiter verfeinert werden, wenn im Laufe von Machbarkeitsstudien und Umweltverträglichkeitsprüfung mehr Daten zur Verfügung stehen.

## 6.6 Zusammenfassende Betrachtung der Fallstudien

In den verschiedenen Fallstudien konnte gezeigt werden, dass die Input-Output-Analyse geeignet ist, Szenarien für die Nutzung vorhandener Ressourcen beim Betrieb von Wasserkraft und Mehrzweckspeicheranlagen zu verifizieren. Insbesondere eignen sich Input-Output-Modelle bei stark



vernetzten komplexen Systemen, da hier die Verteilung der Ressourcen von besonderer Bedeutung und nicht durch eine Triviallösung darstellbar ist. Bei sehr einfachen Systemen mit nur wenigen konkurrierenden Nutzungsarten kann ein Input-Output-Modell zwar angewendet werden, jedoch ist hierbei der Informationsgewinn nicht so groß wie bei komplexeren Systemen. Die betrachteten Fallstudien decken ein breites Spektrum an Anlagentypen und Nutzungsarten ab.

Die Fallstudien an der Drau und Argen zeigen die Anwendung zur Verteilung von Wasserressourcen bei schon vorhandenen Anlagen. Die anderen Fallstudien, Diluvio-Palmar, Kandadji und Severn Ästuar zeigen, wie ein Input-Output-Modell schon in der Planungsphase wertvolle Informationen zu Wirkzusammenhängen und möglichen Nutzungsszenarien liefern kann.

Es konnte gezeigt werden, dass die Input-Output-Analyse für diese Arten von Wasserkraft- und Speicheranlagen ein geeignetes Werkzeug ist, um Nutzungskonflikte zu lösen.

# 7 Bewertung der Ergebnisse

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Werkzeug zur vernetzten Bewertung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern entwickelt, das in verschiedenen Fallstudien (Kapitel 6) evaluiert wurde. Die Fallstudien zeigten, dass die Input-Output-Analyse ein geeignetes Werkzeug ist, um die Planung und den Betrieb von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern zu unterstützen. Ein Großteil des Modellierungsaufwands geht in die Bestimmung der Transformationskoeffizienten für die jeweiligen Güter. Daher erwies es sich als sehr nützlich, zunächst qualitative Modelle aufzustellen und diese erst nach genauerer Bestimmung der Systemgrenzen zu quantifizieren. Je nachdem, welche Informationen schon vorhanden sind oder in welcher Planungsphase sich das Projekt befindet, kann die Genauigkeit der benötigten Transformationen schwanken. Das von Leontief entwickelte und in dieser Arbeit zur Bewertung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern angepasste Input-Output-Modell besteht aus linearen Gleichungen. Viele in der Wasserwirtschaft betrachtete Phänomene sind nicht linear, können jedoch abschnittsweise linearisiert werden. Durch die Linearisierung geht jedoch Genauigkeit in der Berechnung verloren. Da in frühen Phasen einer Planung, oder aber im späteren Planungsverlauf bei kleinen Anlagen sowie oftmals bei größeren Projekten in Entwicklungsländern die Eingangsdaten für die Evaluierung von Szenarien recht ungenau sind, ist eine lineare Betrachtungsweise zumindest als erster Schritt gut zu verantworten. Detailliertere Untersuchungen von Einzelaspekten können auf die linearisierte Betrachtung des Gesamtsystems folgen. Insbesondere für frühe Planungsphasen oder den Vergleich sehr vieler unterschiedlicher Nutzungsszenarien ist es sinnvoll, nachdem zunächst mit einem qualitativen Modell ein Rahmen geschaffen wurde, das lineare vernetzte Modell parallel zu spezialisierteren Einzelmodellen einzusetzen. Die Ergebnisse beider Modellarten können dann jeweils die Nutzung des anderen Modells verbessern.

Durch eine Eingliederung in bestehende Input-Output-Modelle ist es möglich, die Systemgrenzen für die verschiedenen Szenarien zu variieren. Dies ist hilfreich, um auch regionale oder überregionale Auswirkungen eines

## 7 Bewertung der Ergebnisse

---

wasserwirtschaftlichen Projekts zu untersuchen. Wird beispielsweise ein neues Wasserkraftwerk errichtet, ist nicht nur interessant, wie viel Energie produziert werden kann und welche weiteren Nutzen oder Auswirkungen der Speicher direkt hat, sondern auch, ob sich das Projekt sinnvoll in die regionale Wirtschaft integriert. Daher sollte der Nachteil der leichten Ungenauigkeit des Modells aufgrund linearer Betrachtungsweise mit dem Vorteil der Integrierbarkeit in regionale makroökonomische Input-Output-Modelle abgewogen werden.

Wird das entwickelte Modell als Grundlage für ein lineares Optimierungsmodell verwendet, sind die Ansprüche an die Genauigkeit der Ausgangsdaten etwas höher einzustufen. Hier sollte genau abgewägt werden, inwiefern die Datenlage eine Optimierungsberechnung überhaupt hergibt, oder ob besser eine Serie von Szenarienvektoren berechnet werden sollte, die dann als Grundlage politischer Entscheidungen über das weitere Vorgehen im jeweiligen Projekt benutzt werden können.

Mit dem entwickelten Modell kann auf sehr anschauliche Weise gezeigt werden, welchen Anforderungen eine neue Anlage gerecht werden könnte und wo aufgrund der vorhandenen Ressourcen Abstriche gemacht werden müssen. Über eine lineare Optimierung oder den händischen Vergleich unterschiedlicher Szenarien kann auf einfache Weise dargestellt werden, wie sich eine kleine Änderung der Anforderungen in einem Teilbereich des Projekts auf andere Ausgangsparameter auswirkt. Durch die kompakte Darstellung im Input-Output-Modell lassen sich zwar komplexere Modellierungen und Machbarkeitsstudien nicht ersetzen, jedoch kann recht schnell ein Überblick geschaffen werden, welche Szenarien zur weiteren Untersuchung lohnenswert sind.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein umfassendes und vielseitiges Werkzeug für die Wasserwirtschaft entwickelt. Die Methode der Input-Output-Analyse zeigte sich als geeignetes Mittel zur Bewertung und Planung von Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeichern. Die verschiedenen Fallstudien geben einen Überblick über die Bandbreite der Anwendungsbereiche des hier entwickelten Modells. Deutlich zu erkennen ist, dass qualitative Modelle und auch quantifizierte Teilmodelle jeweils übertragbar auf andere Projekte sein können. Quantitative Gesamtmodelle und lineare Optimierungsmodelle sind hingegen stark abhängig von den jeweils betrachteten Projektvarianten.

Als nächster wichtiger Schritt kann ein Modell nach dem hier entwickelten Verfahren in ein regionales oder überregionales Input-Output-Modell integriert werden, um die weiteren Zusammenhänge einzuschätzen. Ein weiterer interessanter Aspekt wäre, nach dieser Methodik berechnete Ressourcen-Verteilungen mit jeweils einzeln modellierten Mengen zu vergleichen. Bisher wurden die Ansprüche der Endverbraucher manuell verteilt bzw. als unterschiedliche Anspruchsvektoren in eine lineare Optimierung integriert. Eine interessante Weiterentwicklung wäre beispielsweise die Generierung der Anspruchsvektoren durch ein agentenbasiertes System zu automatisieren. Um die Genauigkeit der Modellergebnisse zu verbessern, wäre es eventuell auch sinnvoll, Teile des Modells weiter zu entwickeln, um auch nichtlineare Zusammenhänge genauer einzubeziehen. Hierbei ist jedoch abzuwägen, ob der erhöhte Berechnungsaufwand in einem sinnvollen Verhältnis zur Verbesserung der Ergebnisse steht. Hierzu sollte in weiteren Forschungsarbeiten ein Vergleich einer linearen Betrachtungsweise mit abschnittsweiser Linearisierung wie in der vorliegenden Arbeit verwendet, mit einem nichtlinearen Ansatz durchgeführt werden.



# Literaturverzeichnis

- ADB 2008** ADB: 2008. – <http://appablog.wordpress.com/2008/10/10/niger-afd-bank-group-president-receives-niger%E2%80%99s-finance-and-economy-minister/>
- Ahmadian 2013** Ahmadian, Reza: *DIVAST Modellergebnisse*. Persönliche Kommunikation. 2013
- Ahrends u. a. 2008** Ahrends, H. ; Mast, M. ; Rodgers, Ch. ; Kunstmann, H.: Coupled hydrological-economic modelling for optimised irrigated cultivation in a semi-arid catchment of West Africa. In: *Environmental Modelling and Software* 23 (2008), S. 385 – 395
- Albayrak u. a. 2010** Albayrak, M. ; Gunes, E. ; Bulent, G.: The effects of irrigation methods on input use and productivities of sugarbeet in Central Anatolia, Turkey. In: *African Journal of Agricultural Research* Jg. 5, H. 3 (2010), S. 188–195
- Allen u. a. 1998** Allen, Richard G. ; Pereira, Luis S. ; Raes, Dirk ; Smith, Martin: Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56 / FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome. 1998. – Forschungsbericht
- Allesina und Bondavalli 2004** Allesina, Stefano ; Bondavalli, Cristina: WAND: an ecological network analysis user-friendly tool. In: *Environmental Modelling & Software* 19 (2004), S. 337–340
- Anselm 2004** Anselm, Jörn: *Freizeitnutzung an Talsperren - Konflikte, Kosten, Bewertungsverfahren*, Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2004
- Applegate u. a. 2016** Applegate, David ; Cook, William ; Dash, Sanjeeb ; Mevenkamp, Monika: *QSOPT Linear Programming Solver*. 2016. – <http://www.math.uwaterloo.ca/~bico/qsopt/>

- Atkinson u. a. 2001** Atkinson, Philip W. ; Crooks, Stephen ; Grant, Alistair ; Rehfish, Mark M.: The success of creation and restoration schemes in producing intertidal habitat suitable for waterbirds / *English Nature*. 2001. – Forschungsbericht
- Bednarz u. a. 2003** Bednarz, Craig ; Ritchie, Glen ; Hook, Jim ; Yager, Rad ; Cromer, Sidney ; Cook, Dudley ; Griner, Ivey: Cotton Crop Water Use and Irrigation Scheduling. In: *Georgia Cotton Research and Extension Reports*. 2003
- BFG 2006** BFG: Niedrigwasserperiode 2003 in Deutschland: Ursachen - Wirkungen - Folgen. / Bundesanstalt für Gewässerkunde. 2006 (Mitteilung Nr. 27). – Forschungsbericht
- Binder 2007** Binder, Jochen: *Reducing Irrigation Water Supply to Accomplish the Goal of Designing Sustainable Cropping Systems in the North China Plain*, Universität Hohenheim, Dissertation, 2007
- Bockelmann-Evans u. a. 2006** Bockelmann-Evans, B.N. ; E.K.Fenrich ; Schnauder, I. ; Marx, W.: Integrating impact of land use changes into catchment wide nutrient modelling. In: *Hydroinformatics Conference, Nice, France, 2006*
- Bozkurt u. a. 2009** Bozkurt, S. ; Mansuroglu, G. S. ; Kara, M. ; Önder, S.: Responses of lettuce to irrigation levels and nitrogen forms. In: *African Journal of Agricultural Research* 4 (11) (2009), S. 1171–1177
- Burt und Johnes 1997** Burt, T.P. ; Johnes, P.J.: Managing water quality in agricultural catchments. In: *Trans Inst Br Geogr* 22 (1997), S. 61 –68
- Carne 1995** Carne, B. G.: Thomas Fulljames, 1808-74: Surveyor, Architect, and Civil Engineer. In: *Transactions of the Bristol and Gloucestershire Archaeological Society* Vol. 113 (1995), S. 7–20
- Costanza u. a. 1997** Costanza, Robert ; d'Arge†, Ralph ; Groot, Rudolf de ; Farber, Stephen ; Grasso, Monica ; Hannon, Bruce ; Limburg, Karin ; Naeem, Shahid ; O'Neill, Robert V. ; Paruelo, Jose ; Raskin, Robert G. ; Sutton, Paul ; Belt, Marjan van den: The value of the world's ecosystem services and natural capital. In: *Nature* 387 (1997), S. 253 – 260
- Czaika 1972** Czaika, Lothar: *Qualitative Input-Output-Analyse: Die Bedeutung der Graphentheorie für die interindustrielle Input-Output-Analyse*. Schriften zur wirtschaftswissenschaftlichen Forschung, Band 42, Verlag Anton Hain, Meisenheim am Glan, 1972

- DECC 2010** DECC: Severn Tidal Power Phase One Consultation, / Department of Energy and Climate Change UK. 2010. – Forschungsbericht
- DiePresse.com 2012** DiePresse.com: *Verbund: Gewinnsprung dank Wasserkraft*. 2012. – [http://diepresse.com/home/wirtschaft/quartal/1270583/Verbund\\_Gewinnsprung-dank-Wasserkraft](http://diepresse.com/home/wirtschaft/quartal/1270583/Verbund_Gewinnsprung-dank-Wasserkraft)
- Doltra und Munoz 2009** Doltra, J. ; Munoz, P.: Simulation of nitrogen leaching from a fertigated crop rotation in a Mediterranean climate using the EU-Rotate-N and Hydrus-2D models. In: *Agricultural Water Management* 97 (2009), S. 277–285
- Dorfman u. a. 1958** Dorfman, Robert ; Samuelson, Paul A. ; Solow, Robert M.: *Linear Programming and Economic Analysis*. McGraw-Hill Book Company, 1958
- Dougherty und Hall 1995** Dougherty, TC. ; Hall, A.W.: Environmental impact assessment of irrigation and drainage projects / FAO. HR Wallingford, 1995. – Forschungsbericht
- EA 2006** EA: Severn Estuary Barrage. / UK Environment Agency. 2006. – Forschungsbericht
- EA 2008** EA: Severn Tidal Power Phase One Consultation / UK Environment Agency. 2008. – Forschungsbericht
- EIA 2016** EIA: *U.S. Energy Information Administration*. 2016. – <http://www.eia.gov/>
- EU 2000** EU: *Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik*. 2000
- Faber u. a. 1983** Faber, Malte ; Niemes, Horst ; Stephan, Gunther ; Siebert, Horst (Hrsg.): *Schriften zur Umwelt und Ressourceökonomie*. Bd. Band 7: *Umweltschutz und Input-Output-Analyse mit zwei Fallstudien aus der Wassergütwirtschaft*. J.C.B Mohr Tübingen, 1983
- Falconer u. a. 2001** Falconer, R.A. ; Lin, B. ; Wu, Y. ; Harris, E.: *Divast Reference Manual*. 2001. – Forschungsbericht
- FAO 2003** FAO: *Water Resources, Development and Management Service, CROPWAT*. 2003. – [http://www.fao.org/nr/water/infores\\_databases\\_cropwat.html](http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html)



- FAO 2016** FAO: *Aquacrop*. 2016. – <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>
- Farber u. a. 2002** Farber, Stephen C. ; Costanza, Robert ; , Matthew A. W. : Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services. In: *Ecological Economics* 41 (2002), S. 375–392
- Finanzen.net 2016** Finanzen.net: *Rohstoffpreise*. 2016. – <http://www.finanzen.net/rohstoffe/>
- Fisterra 2016** Fisterra: *Dieta de 2.000 Kcalorías*. 2016. – [http://www.fisterra.com/salud/2dietas/dieta\\_2000\\_a.asp](http://www.fisterra.com/salud/2dietas/dieta_2000_a.asp)
- Forsund 2007** Forsund, Finn R. ; Hillier, Fred (Hrsg.): *Hydropower Economics*. Springer, 2007
- Giesecke u. a. 2014** Giesecke, J. ; Heimerl, S. ; Mosonyi, E.: *Wasserkraftanlagen - Planung, Bau, Betrieb*. Springer, 2014
- Giesecke und Jorde 1998** Giesecke, J. ; Jorde, K.: Simulation and Assessment of Hydraulic Habitat in Rivers. In: *Proceedings: Modelling, Testing and Monitoring for Hydro Powerplants - III, Aix-en-Provence 1998*, The International Journal on Hydropower & Dams, Sutton, UK, 1998, S. 71–82
- Graeber 2002** Graeber, Bernhard: *Grenzübergreifende integrierte Elektrizitätsplanung im südlichen Afrika*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2002
- Granja und Ruiz 2016** Granja, Daniel I. ; Ruiz, Juan José R.: *PHPSimplex-Optimizing resources with Linear Programming*. 2016. – <http://www.phpsimplex.com/en/>
- Haas 2010** Haas, Manuel: *Bewertung externer Effekte der Bewässerung*, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 2010
- Halliday und Trenkel 1992** Halliday, D. J. ; Trenkel, M. E.: *IFA world fertilizer use manual*. / International Fertilizer Industry Association. 1992. – Forschungsbericht
- Hanssmann 1976** Hanssmann, F.: *Systemforschung im Umweltschutz*. Erich Schmidt Verlag, Berlin, Germany., 1976
- Hassan u. a. December, 2010** Hassan, S.W. ; Oad, F.C. ; Tunj, S.D. ; Gandahi, A.W. ; Siddiqui, M.H. ; Oad, S. M. ; Jagirani, A.W.: Impact of nitrogen levels and application methods on agronomic, physiological

and nutrient uptake traits of maize fodder. In: *Pak. J. Bot.* Vol. 42(6) (December, 2010), S. 4095–4101

**Haws 1985** Haws, E.T.: Dams and the Environment: Notes on Regional Influences. ICOLD, 1985

**Hayashi u. a. 2008** Hayashi, S. ; S, Murakami ; K, Xu ; M, Watanabe: Effect of the Three Gorges Dam project on flood control in the Dongting Lake area, China, in a 1998-type flood. In: *J. Hydro-Environ. Res.* 2 (2008), S. 148–63

**Haygarth u. a. 2003** Haygarth, P.M. ; Johnes, Penny J ; Butterfield, D. ; Foy, R ; Withers, P J: Land use for achieving good ecological status of waterbodies in England and Wales: a theoretical exploration for nitrogen and phosphorus. / A study commissioned by Defra. 2003. – Forschungsbericht

**HC/BK 2002** HC/BK: Kandadji Dam: Feasibility Study Summary Report / Haut Commissariat au Barrage de Kandadji. 2002. – Forschungsbericht

**Heimerl 2002** Heimerl, Stephan: Systematische Beurteilung von Wasserkraftprojekten. 2002 (Mitteilungen des Institut für Wasserbau Universität Stuttgart, Heft 112)

**Heinz u. a. 2007** Heinz, I. ; Pulido-Velazquez, M. ; Lund, J. R. ; Andreu, J.: Hydro-economic Modeling in River Basin Management: Implications and Applications for the European Water Framework Directive. In: *Water Resour Manage* 21 (2007), S. 1103–1125

**Hennegriff u. a. 2008** Hennegriff, W. ; Ihringer, J. ; Kolokotronis, V.: Prognose von Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg. In: *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 1 (2008), Nr. Nr. 6

**Hennegriff u. a. 2006** Hennegriff, Wolfgang ; Kolokotronis, Vassilis ; Weber, Hans ; Bartels, Hella: Klimawandel und Hochwasser - Erkenntnisse und Anpassungsstrategien beim Hochwasserschutz. In: *KA – Abwasser, Abfall* 53 (2006), Nr. 8, S. 770–779

**Holub und H. 1994** Holub, H. ; H., Schnabl: *Input-Output-Rechnung: Input-Output-Analyse*. Oldenbourg, 1994

**ICID 1999** ICID: Role of Dams for Irrigation, Drainage and Flood Protection / ICID. 1999. – Forschungsbericht

**ICOLD 1981** ICOLD: Dam Projects and Environmental Success. ICOLD, 1981

- ICOLD 1982** ICOLD: Dams and the Environment. ICOLD, 1982
- IPCC 2001** IPCC: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by J. T. Houghton et al., 881 pp., Cambridge Univ. Press, New York. / Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. – Forschungsbericht
- IPCC 2007** IPCC: Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by S. Solomon et al., Cambridge Univ. Press, New York. / Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. – Forschungsbericht
- IPCC 2012** IPCC ; Field, Christopher B. (Hrsg.) ; Barros, Vicente (Hrsg.) ; Stocker, Thomas F. (Hrsg.) ; Dahe, Qin (Hrsg.) ; Dokken, David J. (Hrsg.) ; Ebi, Kristie L. (Hrsg.) ; Mastrandrea, Michael D. (Hrsg.) ; Mach, Katharine J. (Hrsg.) ; Plattner, Gian-Kasper (Hrsg.) ; Allen, Simon K. (Hrsg.) ; Tignor, Melinda (Hrsg.) ; Midgley, Pauline M. (Hrsg.): *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation - Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2012
- Italiano 2010** Italiano, Fabio: *Socio-economical effects of irrigation systems*, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Masters Thesis, 2010
- Johnes 1996** Johnes, P.J.: Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach. In: *Journal of Hydrology* 183 (1996), S. 323–349
- Jorde u. a. 1999** Jorde, K. ; M., Schneider ; F., Zöllner: Ökologisch begründete Mindestwasserregelungen. In: *Wasserbewirtschaftung an den Bundeswasserstraßen - Probleme, Methoden, Lösungen*. Koblenz Berlin, 1999
- Jorde 1997** Jorde, Klaus: Ökologisch begründete, dynamische Mindestwasserregelung bei Ausleitungskraftwerken. 1997 (Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 90)
- Jorde u. a. 2001** Jorde, Klaus ; Schneider, Matthias ; Peter, Armin ; Zöllner, Frank: Fuzzy based Models for the Evaluation of Fish Habitat Quality and Instream Flow Assessment. In: *Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics*, 2001

- Kennedy 2007** Kennedy, Holly L.: *Determination and Balancing of the Ecological and Agricultural Water Demands on the Lower Argen River during Dry Periods*. M.Sc. Thesis, Universität Stuttgart, Germany, 2007
- Kirby und Retiere 2009** Kirby, R. ; Retiere, C.: Comparing environmental effects of Rance and Severn barrages. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering* 162 (2009), S. 11–26
- Kohler 2006** Kohler, Beate: *Externe Effekte der Laufwasserkraftnutzung*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2006
- Kolding und van 2011** Kolding, Jeppe ; van, Zwieten Paul A.: Relative lake level fluctuations and their influence on productivity and resilience in tropical lakes and reservoirs. In: *Fisheries Research* 115-116 (2011), S. 99–109
- Laë u. a. 2002** Laë, R. ; Williams, S. ; Massou, A. M. ; Morand, P. ; Mikolasek, O.: Review of the present state of knowledge of environment, fish stocks and fisheries of the River Niger (West Africa). In: *Large River System Symposium ,LARS 2, 2002*
- Leontief 1961** Leontief, W.: Einsatz-Ausstoß-Analyse. In: *Handwörterbuch der Sozialwissenschaften*. Göttingen, 1961, S. 83–87
- Leontief 1966** Leontief, W.: *Input-output economics*. Oxford University Press, New York, 1966
- Leontief 1970** Leontief, Wassily: Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach. In: *The Review of Economics and Statistics* 52 (1970), August, Nr. 3, S. 262–271
- LFU 2005** LFU: Mindestabflüsse in Ausleitungsstrecken / Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. 2005. – Forschungsbericht
- Liu u. a. 2009** Liu, Xiuli ; Chen, Xiakang ; Wang, Shouyang: Evaluating and Predicting Shadow Prices of Water Resources in China and Its Nine Major River Basins. In: *Water Resources Management* 23 (2009), S. 1467–1478
- Löschau 2006** Löschau, Margit: *Input-Output-Analyse als Methode zur stofflichen Bilanzierung komplexer Entsorgungssysteme*, Technischen Universität Berlin, Dissertation, 2006
- LUBW 2016** LUBW: *Zentraler Kartenservice für die WRRL*. 2016. – <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/16139/>

- Madulu 2003** Madulu, Ndalaha F.: Linking poverty levels to water resource use and conflicts in rural Tanzania. In: *Physics and Chemistry of the Earth* 28 (2003), S. 911–917
- Marx u. a. 2005** Marx, W. ; Eisner, A. ; Opata, R.: Strategies for Orchard Irrigation in South-Western Germany under the Limitation of Meeting Instream Flow Requirements of the Used Stream. In: *ICID 21st European Regional Conference 2005, Frankfurt (Oder) and Slubice , Germany and Poland, 2005*
- Marx 2003** Marx, Walter: *Wasserkraft, Bewässerung, Umwelt – Planungs- und Bewertungsschwerpunkte der Wasserbewirtschaftung*. Mitteilungsheft Nr. 116, (Habilitationsschrift) Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Germany, 2003
- Miketa und Merven 2013** Miketa, Asami ; Merven, Bruno: West African Power Pool: Planning and Prospects for Renewable Energy / International Renewable Energy Agency (IRENA). 2013. – Forschungsbericht
- MRAG.Ltd 1995** MRAG.Ltd: A Synthesis of Simple Empirical Models to Predict Fish Yields in Tropical Lakes and Reservoirs (R. 6178) Final Report / Produced under the Fisheries Management Science Programme of the Overseas Development Administration. October 1995. – Forschungsbericht
- Mund 1980** Mund, Klaus: *Verflechtungsmodelle in der Umweltplanung - Entwurf eines ökologische Branchenmodells für die Textilindustrie*, Universität Darmstadt, Dissertation, 1980
- Nationmaster 2016** Nationmaster: *International Statistics Database*. 2016. – <http://www.nationmaster.com>
- NEPA 2016** NEPA: 2016. – <http://www.epa.gov/compliance/basics/nepa.html>
- Republic of Niger 2008** Niger, Prime Minister's O. Republic of: Programme Kandadji de Regeneration des Ecosystemes et de Mise en Valeur de la Vallee du Niger / High Commission for Niger Valley / African Development Bank. 2008. – Forschungsbericht
- Odebrecht 2016** Odebrecht: 2016. – <http://www.odebrechtonline.com.br/materias/01801-01900/1814/>
- Olsen und Donaldson 1998** Olsen, J.A. ; Donaldson, C.: Helicopters, hearts and hips: Using willingness to pay to set priorities for public sector health care programmes. In: *Social Science and Medicine* (1998)

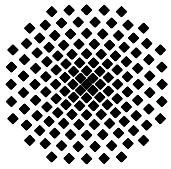
- Olsson und Söder 2003** Olsson, M. ; Söder, L.: Hydropower planning including trade-off between energy and reserve markets. In: *IEEE Bologna PowerTech Conference*. Bologna, Italy, June 23-26 2003
- Petschunik u. a. 2002a** Petschunik, Jürgen ; Kucher, Thomas ; Steiner, Hubert A. ; Egger, Gregory ; Aigner, Susanne ; Mark-Stöhr, Birgit: Ökosystem Flußkraftwerk Rosegg- St. Jacob, Stand und Zukunftsperspektiven der Bewirtschaftung. Vegetationsstrukturen und Raumnutzunh / Österreichische Elektrizitätswirtschafts Aktiengesellschaft (Verbund). 2002. – Forschungsbericht
- Petschunik u. a. 2002b** Petschunik, Jürgen ; Steiner, Hubert A. ; Kucher, Thomas: Ökosystem Flußkraftwerk Rosegg- St. Jacob, Stand und Zukunftsperspektiven der Bewirtschaftung. Eine interdisziplinäre Gesamtstudie / Österreichische Elektrizitätswirtschafts Aktiengesellschaft (Verbund). 2002 (Band 76). – Forschungsbericht
- Pfähler 2001** Pfähler, Wilhelm: *Regional Input-Output Analysis*. Nomos Verlagsgesellschaft, 2001
- Richter und Thomas 2007** Richter, B. D. ; Thomas, G. A.: Restoring Environmental Flows by Modifying Dam Operations. In: *Ecology and Society* 12(1) (2007)
- Richter u. a. 2010** Richter, Brian D. ; Postel, Sandra ; Revenga, Carmen ; Scudder, Thayer ; Lehner, Bernhard ; Churchill, Allegra ; Chow, Morgan: Lost in Development's Shadow: The Downstream Human Consequences of Dams. In: *Water Alternatives* 3(2) (2010), S. 14–42
- Schönborn 2003** Schönborn, W: *Lehrbuch der Limnologie*. Schweizerbart, 2003
- Schneider u. a. 2002** Schneider, M. ; Jorde, K. ; Zöllner, F. ; Kerle, F. ; Eisner, A.: Use of habitat models for decision support in water resources management. In: *International Conference on Water Resources and Environment Research, Dresden, 2002*
- Schneider 2001** Schneider, Matthias: Habitat- und Abflussmodellierung mit unscharfen Berechnungsansätzen. 2001 (Mitteilungen des Instituts für Wasserbau Universität Stuttgart, Heft 108)
- Schneider u. a. 2001** Schneider, Matthias ; Giesecke, Jürgen ; Zöllner, Frank: CASIMIR - Hilfsmittel zur Mindestwasserfestlegung unter Berücksichtigung von Ökologie und Ökonomie. In: *Wasserwirtschaft* 91(10) (2001), S. 486–490

- Schumann 1968** Schumann, Jochen: *Input-Output-Analyse*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1968
- SOFRELEC 1980** SOFRELEC: Etude de factibilite du barrage de Kandadji / SOFRELEC. 1980. – Forschungsbericht
- Stalnaker u. a. 1995** Stalnaker, Clair ; B.L.L. ; Henriksen, Jim ; Bovee, Ken ; Bartholow, John: *The Instream Flow Incremental Methodology, A Primer for IFIM* / U.S. Department of the Interior, National Biological Service, Washington, D.C. 1995. – Forschungsbericht
- Turner u. a. 2007** Turner, R.K. ; Burgess, D. ; D. Hadleya, E. ; Coombes ; Jackson, N.: A cost-benefit appraisal of coastal managed realignment policy. In: *Global Environmental Change* 17 (2007), S. 397–407
- Landesanstalt für Umwelt 2016** Umwelt, Messungen und Naturschutz (. Landesanstalt für: <http://www.hvz.baden-wuerttemberg.de/>. 2016
- UNdata 2016** UNdata: *Country Data Services*. 2016. – <http://data.un.org>
- US-EPA 1987** US-EPA: The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentation and user manual., EPA 600387007. / U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1987. – Forschungsbericht
- US-EPA 2016** US-EPA: *QUAL2K: Modeling Framework for Simulating, River, Stream, and Lake Water Quality*. 2016. – <http://qual2k.com/>
- US National Intelligence Council 2012** US National Intelligence Council: *Global Trends 2030: Alternative Worlds*. Dezember 2012. – <http://www.dni.gov/index.php/about/organization/national-intelligence-council-global-trends>
- Wiegmann 2002** Wiegmann, Kirsten: Anbau und Verarbeitung der Baumwolle / Ökoinstitut e.V. 2002. – Forschungsbericht
- Woollcombe-Adams u. a. 2008** Woollcombe-Adams, C. ; Watson, M. ; Shaw, T.: Severn Barrage tidal power project: implications for carbon emissions. In: *Water and Environment Journal* Volume 23, Issue 1 (2008)
- Ziegelmann u. a. 2000** Ziegelmann, Arko ; Mohr, Markus ; Unger, Hermann: Net employment effects of an extension of renewable-energy systems in the Federal Republic of Germany. In: *Applied Energy* 65 (2000), S. 329–338

Alle URLs wurden zuletzt am 10.2.2016 geprüft.







## Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 61  
70569 Stuttgart (Vaihingen)  
Telefon (0711) 685 - 64717/64749/64752/64679  
Telefax (0711) 685 - 67020 o. 64746 o. 64681  
E-Mail: [iws@iws.uni-stuttgart.de](mailto:iws@iws.uni-stuttgart.de)  
<http://www.iws.uni-stuttgart.de>

### Direktoren

Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy  
Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig  
Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht  
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nowak

### Vorstand (Stand 1.3.2017)

Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. A. Bárdossy  
Prof. Dr.-Ing. R. Helmig  
Prof. Dr.-Ing. S. Wieprecht  
Prof. Dr. J.A. Sander Huisman  
Jürgen Braun, PhD  
apl. Prof. Dr.-Ing. H. Class  
Dr.-Ing. H.-P. Koschitzky  
Dr.-Ing. M. Noack  
Prof. Dr.-Ing. W. Nowak  
Dr. rer. nat. J. Seidel  
Dr.-Ing. K. Terheiden  
Dr.-Ing. habil. Sergey Oladyshkin

### Emeriti

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Jürgen Giesecke  
Prof. Dr.h.c. Dr.-Ing. E.h. Helmut Kobus, PhD

### Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht  
Stellv.: Dr.-Ing. Kristina Terheiden  
**Versuchsanstalt für Wasserbau**  
Leiter: Dr.-Ing. Markus Noack

### Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig  
Stellv.: apl. Prof. Dr.-Ing. Holger Class

### Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie

Leiter: Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy  
Stellv.: Dr. rer. nat. Jochen Seidel  
**Hydrogeophysik der Vadosen Zone**  
(mit Forschungszentrum Jülich)  
Leiter: Prof. Dr. J.A. Sander Huisman

### Lehrstuhl für Stochastische Simulation und Sicherheitsforschung für Hydrosysteme

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nowak  
Stellv.: Dr.-Ing. habil. Sergey Oladyshkin

### VEGAS, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung

Leitung: Jürgen Braun, PhD, AD  
Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky, AD

## Verzeichnis der Mitteilungshefte

- 1 Röhnisch, Arthur: *Die Bemühungen um eine Wasserbauliche Versuchsanstalt an der Technischen Hochschule Stuttgart*, und Fattah Abouleid, Abdel: *Beitrag zur Berechnung einer in lockeren Sand gerammten, zweifach verankerten Spundwand*, 1963
- 2 Marotz, Günter: *Beitrag zur Frage der Standfestigkeit von dichten Asphaltbelägen im Großwasserbau*, 1964
- 3 Gurr, Siegfried: *Beitrag zur Berechnung zusammengesetzter ebener Flächentragwerke unter besonderer Berücksichtigung ebener Stauwände, mit Hilfe von Randwert- und Lastwertmatrizen*, 1965
- 4 Plica, Peter: *Ein Beitrag zur Anwendung von Schalenkonstruktionen im Stahlwasserbau*, und Petrikat, Kurt: *Möglichkeiten und Grenzen des wasserbaulichen Versuchswesens*, 1966

- 5 Plate, Erich: *Beitrag zur Bestimmung der Windgeschwindigkeitsverteilung in der durch eine Wand gestörten bodennahen Luftschicht*, und  
Röhnisch, Arthur; Marotz, Günter: *Neue Baustoffe und Bauausführungen für den Schutz der Böschungen und der Sohle von Kanälen, Flüssen und Häfen; Gestehungskosten und jeweilige Vorteile*, sowie  
Unny, T.E.: *Schwingungsuntersuchungen am Kegelstrahlschieber*, 1967
- 6 Seiler, Erich: *Die Ermittlung des Anlagenwertes der bundeseigenen Binnenschiffahrtsstraßen und Talsperren und des Anteils der Binnenschifffahrt an diesem Wert*, 1967
- 7 *Sonderheft anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Arthur Röhnisch mit Beiträgen von*  
Benk, Dieter; Breitling, J.; Gurr, Siegfried; Haberhauer, Robert; Honekamp, Hermann; Kuz, Klaus Dieter; Marotz, Günter; Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg; Miller, Rudolf; Plate, Erich J.; Radomski, Helge; Schwarz, Helmut; Vollmer, Ernst; Wildenhahn, Eberhard; 1967
- 8 Jumikis, Alfred: *Beitrag zur experimentellen Untersuchung des Wassernachschubs in einem gefrierenden Boden und die Beurteilung der Ergebnisse*, 1968
- 9 Marotz, Günter: *Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund*, 1968
- 10 Radomski, Helge: *Untersuchungen über den Einfluß der Querschnittsform wellenförmiger Spundwände auf die statischen und rammtechnischen Eigenschaften*, 1968
- 11 Schwarz, Helmut: *Die Grenztragfähigkeit des Baugrundes bei Einwirkung vertikal gezogener Ankerplatten als zweidimensionales Bruchproblem*, 1969
- 12 Erbel, Klaus: *Ein Beitrag zur Untersuchung der Metamorphose von Mittelgebirgsschneedecken unter besonderer Berücksichtigung eines Verfahrens zur Bestimmung der thermischen Schneequalität*, 1969
- 13 Westhaus, Karl-Heinz: *Der Strukturwandel in der Binnenschifffahrt und sein Einfluß auf den Ausbau der Binnenschiffskanäle*, 1969
- 14 Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg: *Ein Beitrag zur Berechnung des Erdwiderstandes unter Ansatz der logarithmischen Spirale als Gleitflächenfunktion*, 1970
- 15 Schulz, Manfred: *Berechnung des räumlichen Erddruckes auf die Wandung kreiszylindrischer Körper*, 1970
- 16 Mobasseri, Manoutschehr: *Die Rippenstützmauer. Konstruktion und Grenzen ihrer Standicherheit*, 1970
- 17 Benk, Dieter: *Ein Beitrag zum Betrieb und zur Bemessung von Hochwasserrückhaltebecken*, 1970
- 18 Gàl, Attila: *Bestimmung der mitschwingenden Wassermasse bei überströmten Fischbauchklappen mit kreiszylindrischem Staublech*, 1971, vergriffen
- 19 Kuz, Klaus Dieter: *Ein Beitrag zur Frage des Einsetzens von Kavitationserscheinungen in einer Düsenströmung bei Berücksichtigung der im Wasser gelösten Gase*, 1971, vergriffen
- 20 Schaak, Hartmut: *Verteilleitungen von Wasserkraftanlagen*, 1971
- 21 *Sonderheft zur Eröffnung der neuen Versuchsanstalt des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart mit Beiträgen von*  
Brombach, Hansjörg; Dirksen, Wolfram; Gàl, Attila; Gerlach, Reinhard; Giesecke, Jürgen; Holthoff, Franz-Josef; Kuz, Klaus Dieter; Marotz, Günter; Minor, Hans-Erwin; Petrikat, Kurt; Röhnisch, Arthur; Rueff, Helge; Schwarz, Helmut; Vollmer, Ernst; Wildenhahn, Eberhard; 1972
- 22 Wang, Chung-su: *Ein Beitrag zur Berechnung der Schwingungen an Kegelstrahlschiebern*, 1972
- 23 Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg: *Erdwiderstandsbeiwerte nach dem Ohde-Variationsverfahren*, 1972
- 24 Minor, Hans-Erwin: *Beitrag zur Bestimmung der Schwingungsanfachungsfunktionen überströmter Stauklappen*, 1972, vergriffen
- 25 Brombach, Hansjörg: *Untersuchung strömungsmechanischer Elemente (Fluidik) und die Möglichkeit der Anwendung von Wirbelkammerelementen im Wasserbau*, 1972, vergriffen
- 26 Wildenhahn, Eberhard: *Beitrag zur Berechnung von Horizontalfilterbrunnen*, 1972

- 27 Steinlein, Helmut: *Die Eliminierung der Schwebstoffe aus Flußwasser zum Zweck der unterirdischen Wasserspeicherung, gezeigt am Beispiel der Iller*, 1972
- 28 Holthoff, Franz Josef: *Die Überwindung großer Hubhöhen in der Binnenschifffahrt durch Schwimmerhebwerke*, 1973
- 29 Röder, Karl: *Einwirkungen aus Baugrundbewegungen auf trog- und kastenförmige Konstruktionen des Wasser- und Tunnelbaues*, 1973
- 30 Kretschmer, Heinz: *Die Bemessung von Bogenstaumauern in Abhängigkeit von der Talform*, 1973
- 31 Honekamp, Hermann: *Beitrag zur Berechnung der Montage von Unterwasserpipelines*, 1973
- 32 Giesecke, Jürgen: *Die Wirbelkammertriode als neuartiges Steuerorgan im Wasserbau*, und Brombach, Hansjörg: *Entwicklung, Bauformen, Wirkungsweise und Steuereigenschaften von Wirbelkammerverstärkern*, 1974
- 33 Rueff, Helge: *Untersuchung der schwingungserregenden Kräfte an zwei hintereinander angeordneten Tiefschützen unter besonderer Berücksichtigung von Kavitation*, 1974
- 34 Röhnisch, Arthur: *Einpreßversuche mit Zementmörtel für Spannbeton - Vergleich der Ergebnisse von Modellversuchen mit Ausführungen in Hüllwellrohren*, 1975
- 35 *Sonderheft anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. Kurt Petrikat mit Beiträgen von:* Brombach, Hansjörg; Erbel, Klaus; Flinspach, Dieter; Fischer jr., Richard; Gàl, Attila; Gerlach, Reinhard; Giesecke, Jürgen; Haberhauer, Robert; Hafner Edzard; Hausenblas, Bernhard; Horlacher, Hans-Burkhard; Hutarew, Andreas; Knoll, Manfred; Krummet, Ralph; Marotz, Günter; Merkle, Theodor; Miller, Christoph; Minor, Hans-Erwin; Neumayer, Hans; Rao, Syamala; Rath, Paul; Rueff, Helge; Ruppert, Jürgen; Schwarz, Wolfgang; Topal-Gökceli, Mehmet; Vollmer, Ernst; Wang, Chung-su; Weber, Hans-Georg; 1975
- 36 Berger, Jochum: *Beitrag zur Berechnung des Spannungszustandes in rotationssymmetrisch belasteten Kugelschalen veränderlicher Wandstärke unter Gas- und Flüssigkeitsdruck durch Integration schwach singulärer Differentialgleichungen*, 1975
- 37 Dirksen, Wolfram: *Berechnung instationärer Abflußvorgänge in gestauten Gerinnen mittels Differenzenverfahren und die Anwendung auf Hochwasserrückhaltebecken*, 1976
- 38 Horlacher, Hans-Burkhard: *Berechnung instationärer Temperatur- und Wärmespannungsfelder in langen mehrschichtigen Hohlzylindern*, 1976
- 39 Hafner, Edzard: *Untersuchung der hydrodynamischen Kräfte auf Baukörper im Tiefwasserbereich des Meeres*, 1977, ISBN 3-921694-39-6
- 40 Ruppert, Jürgen: *Über den Axialwirbelkammerverstärker für den Einsatz im Wasserbau*, 1977, ISBN 3-921694-40-X
- 41 Hutarew, Andreas: *Beitrag zur Beeinflussbarkeit des Sauerstoffgehalts in Fließgewässern an Abstürzen und Wehren*, 1977, ISBN 3-921694-41-8, vergriffen
- 42 Miller, Christoph: *Ein Beitrag zur Bestimmung der schwingungserregenden Kräfte an unterströmten Wehren*, 1977, ISBN 3-921694-42-6
- 43 Schwarz, Wolfgang: *Druckstoßberechnung unter Berücksichtigung der Radial- und Längsverschiebungen der Rohrwandung*, 1978, ISBN 3-921694-43-4
- 44 Kinzelbach, Wolfgang: *Numerische Untersuchungen über den optimalen Einsatz variabler Kühlsysteme einer Kraftwerkskette am Beispiel Oberrhein*, 1978, ISBN 3-921694-44-2
- 45 Barczewski, Baldur: *Neue Meßmethoden für Wasser-Luftgemische und deren Anwendung auf zweiphasige Auftriebsstrahlen*, 1979, ISBN 3-921694-45-0
- 46 Neumayer, Hans: *Untersuchung der Strömungsvorgänge in radialen Wirbelkammerverstärkern*, 1979, ISBN 3-921694-46-9
- 47 Elalfy, Youssef-Elhassan: *Untersuchung der Strömungsvorgänge in Wirbelkammerdioden und -drosseln*, 1979, ISBN 3-921694-47-7
- 48 Brombach, Hansjörg: *Automatisierung der Bewirtschaftung von Wasserspeichern*, 1981, ISBN 3-921694-48-5
- 49 Geldner, Peter: *Deterministische und stochastische Methoden zur Bestimmung der Selbstdichtung von Gewässern*, 1981, ISBN 3-921694-49-3, vergriffen

- 50 Mehlhorn, Hans: *Temperaturveränderungen im Grundwasser durch Brauchwassereinleitungen*, 1982, ISBN 3-921694-50-7, vergriffen
- 51 Hafner, Edzard: *Rohrleitungen und Behälter im Meer*, 1983, ISBN 3-921694-51-5
- 52 Rinnert, Bernd: *Hydrodynamische Dispersion in porösen Medien: Einfluß von Dichteunterschieden auf die Vertikalvermischung in horizontaler Strömung*, 1983, ISBN 3-921694-52-3, vergriffen
- 53 Lindner, Wulf: *Steuerung von Grundwasserentnahmen unter Einhaltung ökologischer Kriterien*, 1983, ISBN 3-921694-53-1, vergriffen
- 54 Herr, Michael; Herzer, Jörg; Kinzelbach, Wolfgang; Kobus, Helmut; Rinnert, Bernd: *Methoden zur rechnerischen Erfassung und hydraulischen Sanierung von Grundwasserkontaminationen*, 1983, ISBN 3-921694-54-X
- 55 Schmitt, Paul: *Wege zur Automatisierung der Niederschlagsermittlung*, 1984, ISBN 3-921694-55-8, vergriffen
- 56 Müller, Peter: *Transport und selektive Sedimentation von Schwebstoffen bei gestautem Abfluß*, 1985, ISBN 3-921694-56-6
- 57 El-Qawasmeh, Fuad: *Möglichkeiten und Grenzen der Tropfbewässerung unter besonderer Berücksichtigung der Verstopfungsanfälligkeit der Tropfelemente*, 1985, ISBN 3-921694-57-4, vergriffen
- 58 Kirchenbaur, Klaus: *Mikroprozessorgesteuerte Erfassung instationärer Druckfelder am Beispiel seegangsbelasteter Baukörper*, 1985, ISBN 3-921694-58-2
- 59 Kobus, Helmut (Hrsg.): *Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser*, Tätigkeitsbericht 1984/85 (DFG-Forschergruppe an den Universitäten Hohenheim, Karlsruhe und Stuttgart), 1985, ISBN 3-921694-59-0, vergriffen
- 60 Spitz, Karlheinz: *Dispersion in porösen Medien: Einfluß von Inhomogenitäten und Dichteunterschieden*, 1985, ISBN 3-921694-60-4, vergriffen
- 61 Kobus, Helmut: *An Introduction to Air-Water Flows in Hydraulics*, 1985, ISBN 3-921694-61-2
- 62 Kaleris, Vassilios: *Erfassung des Austausches von Oberflächen- und Grundwasser in horizontalebene Grundwassermodellen*, 1986, ISBN 3-921694-62-0
- 63 Herr, Michael: *Grundlagen der hydraulischen Sanierung verunreinigter Porengrundwasserleiter*, 1987, ISBN 3-921694-63-9
- 64 Marx, Walter: *Berechnung von Temperatur und Spannung in Massenbeton infolge Hydratation*, 1987, ISBN 3-921694-64-7
- 65 Koschitzky, Hans-Peter: *Dimensionierungskonzept für Sohlbelüfter in Schußrinnen zur Vermeidung von Kavitationsschäden*, 1987, ISBN 3-921694-65-5
- 66 Kobus, Helmut (Hrsg.): *Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser*, Tätigkeitsbericht 1986/87 (DFG-Forschergruppe an den Universitäten Hohenheim, Karlsruhe und Stuttgart) 1987, ISBN 3-921694-66-3
- 67 Söll, Thomas: *Berechnungsverfahren zur Abschätzung anthropogener Temperaturanomalien im Grundwasser*, 1988, ISBN 3-921694-67-1
- 68 Dittrich, Andreas; Westrich, Bernd: *Bodenseeufererosion, Bestandsaufnahme und Bewertung*, 1988, ISBN 3-921694-68-X, vergriffen
- 69 Huwe, Bernd; van der Ploeg, Rienk R.: *Modelle zur Simulation des Stickstoffhaushaltes von Standorten mit unterschiedlicher landwirtschaftlicher Nutzung*, 1988, ISBN 3-921694-69-8, vergriffen
- 70 Stephan, Karl: *Integration elliptischer Funktionen*, 1988, ISBN 3-921694-70-1
- 71 Kobus, Helmut; Zilliox, Lothaire (Hrsg.): *Nitratbelastung des Grundwassers, Auswirkungen der Landwirtschaft auf die Grundwasser- und Rohwasserbeschaffenheit und Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers*. Vorträge des deutsch-französischen Kolloquiums am 6. Oktober 1988, Universitäten Stuttgart und Louis Pasteur Strasbourg (Vorträge in deutsch oder französisch, Kurzfassungen zweisprachig), 1988, ISBN 3-921694-71-X

- 72 Soyeaux, Renald: *Unterströmung von Stauanlagen auf klüftigem Untergrund unter Berücksichtigung laminarer und turbulenter Fließzustände*, 1991, ISBN 3-921694-72-8
- 73 Kohane, Roberto: *Berechnungsmethoden für Hochwasserabfluß in Fließgewässern mit überströmten Vorländern*, 1991, ISBN 3-921694-73-6
- 74 Hassinger, Reinhard: *Beitrag zur Hydraulik und Bemessung von Blocksteinrampen in flexibler Bauweise*, 1991, ISBN 3-921694-74-4, vergriffen
- 75 Schäfer, Gerhard: *Einfluß von Schichtenstrukturen und lokalen Einlagerungen auf die Längsdispersion in Porengrundwasserleitern*, 1991, ISBN 3-921694-75-2
- 76 Giesecke, Jürgen: *Vorträge, Wasserwirtschaft in stark besiedelten Regionen; Umweltforschung mit Schwerpunkt Wasserwirtschaft*, 1991, ISBN 3-921694-76-0
- 77 Huwe, Bernd: *Deterministische und stochastische Ansätze zur Modellierung des Stickstoffhaushalts landwirtschaftlich genutzter Flächen auf unterschiedlichem Skalenniveau*, 1992, ISBN 3-921694-77-9, vergriffen
- 78 Rommel, Michael: *Verwendung von Kluftdaten zur realitätsnahen Generierung von Kluftnetzen mit anschließender laminar-turbulenter Strömungsberechnung*, 1993, ISBN 3-92 1694-78-7
- 79 Marschall, Paul: *Die Ermittlung lokaler Stofffrachten im Grundwasser mit Hilfe von Einbohrloch-Meßverfahren*, 1993, ISBN 3-921694-79-5, vergriffen
- 80 Ptak, Thomas: *Stofftransport in heterogenen Porenaquiferen: Felduntersuchungen und stochastische Modellierung*, 1993, ISBN 3-921694-80-9, vergriffen
- 81 Haakh, Frieder: *Transientes Strömungsverhalten in Wirbelkammern*, 1993, ISBN 3-921694-81-7
- 82 Kobus, Helmut; Cirpka, Olaf; Barczewski, Baldur; Koschitzky, Hans-Peter: *Versuchseinrichtung zur Grundwasser und Altlastensanierung VEGAS, Konzeption und Programmrahmen*, 1993, ISBN 3-921694-82-5
- 83 Zang, Weidong: *Optimaler Echtzeit-Betrieb eines Speichers mit aktueller Abflußregenerierung*, 1994, ISBN 3-921694-83-3, vergriffen
- 84 Franke, Hans-Jörg: *Stochastische Modellierung eines flächenhaften Stoffeintrages und Transports in Grundwasser am Beispiel der Pflanzenschutzmittelproblematik*, 1995, ISBN 3-921694-84-1
- 85 Lang, Ulrich: *Simulation regionaler Strömungs- und Transportvorgänge in Karstaquiferen mit Hilfe des Doppelkontinuum-Ansatzes: Methodenentwicklung und Parameteridentifikation*, 1995, ISBN 3-921694-85-X, vergriffen
- 86 Helmig, Rainer: *Einführung in die Numerischen Methoden der Hydromechanik*, 1996, ISBN 3-921694-86-8, vergriffen
- 87 Cirpka, Olaf: *CONTRACT: A Numerical Tool for Contaminant Transport and Chemical Transformations - Theory and Program Documentation -*, 1996, ISBN 3-921694-87-6
- 88 Haberlandt, Uwe: *Stochastische Synthese und Regionalisierung des Niederschlages für Schmutzfrachtberechnungen*, 1996, ISBN 3-921694-88-4
- 89 Croisé, Jean: *Extraktion von flüchtigen Chemikalien aus natürlichen Lockergesteinen mittels erzwungener Luftströmung*, 1996, ISBN 3-921694-89-2, vergriffen
- 90 Jorde, Klaus: *Ökologisch begründete, dynamische Mindestwasserregelungen bei Ausleitungskraftwerken*, 1997, ISBN 3-921694-90-6, vergriffen
- 91 Helmig, Rainer: *Gekoppelte Strömungs- und Transportprozesse im Untergrund - Ein Beitrag zur Hydrosystemmodellierung-*, 1998, ISBN 3-921694-91-4, vergriffen
- 92 Emmert, Martin: *Numerische Modellierung nichtisothermer Gas-Wasser Systeme in porösen Medien*, 1997, ISBN 3-921694-92-2
- 93 Kern, Ulrich: *Transport von Schweb- und Schadstoffen in staugeregelten Fließgewässern am Beispiel des Neckars*, 1997, ISBN 3-921694-93-0, vergriffen
- 94 Förster, Georg: *Druckstoßdämpfung durch große Luftblasen in Hochpunkten von Rohrleitungen* 1997, ISBN 3-921694-94-9

- 95 Cirpka, Olaf: *Numerische Methoden zur Simulation des reaktiven Mehrkomponententransports im Grundwasser*, 1997, ISBN 3-921694-95-7, vergriffen
- 96 Färber, Arne: *Wärmetransport in der ungesättigten Bodenzone: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie*, 1997, ISBN 3-921694-96-5
- 97 Betz, Christoph: *Wasserdampfdestillation von Schadstoffen im porösen Medium: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie*, 1998, SBN 3-921694-97-3
- 98 Xu, Yichun: *Numerical Modeling of Suspended Sediment Transport in Rivers*, 1998, ISBN 3-921694-98-1, vergriffen
- 99 Wüst, Wolfgang: *Geochemische Untersuchungen zur Sanierung CKW-kontaminierter Aquifere mit Fe(0)-Reaktionswänden*, 2000, ISBN 3-933761-02-2
- 100 Sheta, Hussam: *Simulation von Mehrphasenvorgängen in porösen Medien unter Einbeziehung von Hysterese-Effekten*, 2000, ISBN 3-933761-03-4
- 101 Ayros, Edwin: *Regionalisierung extremer Abflüsse auf der Grundlage statistischer Verfahren*, 2000, ISBN 3-933761-04-2, vergriffen
- 102 Huber, Ralf: *Compositional Multiphase Flow and Transport in Heterogeneous Porous Media*, 2000, ISBN 3-933761-05-0
- 103 Braun, Christopherus: *Ein Upscaling-Verfahren für Mehrphasenströmungen in porösen Medien*, 2000, ISBN 3-933761-06-9
- 104 Hofmann, Bernd: *Entwicklung eines rechnergestützten Managementsystems zur Beurteilung von Grundwasserschadensfällen*, 2000, ISBN 3-933761-07-7
- 105 Class, Holger: *Theorie und numerische Modellierung nichtisothermer Mehrphasenprozesse in NAPL-kontaminierten porösen Medien*, 2001, ISBN 3-933761-08-5
- 106 Schmidt, Reinhard: *Wasserdampf- und Heißblutinjektion zur thermischen Sanierung kontaminierter Standorte*, 2001, ISBN 3-933761-09-3
- 107 Josef, Reinhold: *Schadstoffextraktion mit hydraulischen Sanierungsverfahren unter Anwendung von grenzflächenaktiven Stoffen*, 2001, ISBN 3-933761-10-7
- 108 Schneider, Matthias: *Habitat- und Abflussmodellierung für Fließgewässer mit unscharfen Berechnungsansätzen*, 2001, ISBN 3-933761-11-5
- 109 Rathgeb, Andreas: *Hydrodynamische Bemessungsgrundlagen für Lockerdeckwerke an überströmbaren Erddämmen*, 2001, ISBN 3-933761-12-3
- 110 Lang, Stefan: *Parallele numerische Simulation instationärer Probleme mit adaptiven Methoden auf unstrukturierten Gittern*, 2001, ISBN 3-933761-13-1
- 111 Appt, Jochen; Stumpp Simone: *Die Bodensee-Messkampagne 2001, IWS/CWR Lake Constance Measurement Program 2001*, 2002, ISBN 3-933761-14-X
- 112 Heimerl, Stephan: *Systematische Beurteilung von Wasserkraftprojekten*, 2002, ISBN 3-933761-15-8, vergriffen
- 113 Iqbal, Amin: *On the Management and Salinity Control of Drip Irrigation*, 2002, ISBN 3-933761-16-6
- 114 Silberhorn-Hemminger, Annette: *Modellierung von Kluftaquifersystemen: Geostatistische Analyse und deterministisch-stochastische Kluftgenerierung*, 2002, ISBN 3-933761-17-4
- 115 Winkler, Angela: *Prozesse des Wärme- und Stofftransports bei der In-situ-Sanierung mit festen Wärmequellen*, 2003, ISBN 3-933761-18-2
- 116 Marx, Walter: *Wasserkraft, Bewässerung, Umwelt - Planungs- und Bewertungsschwerpunkte der Wasserbewirtschaftung*, 2003, ISBN 3-933761-19-0
- 117 Hinkelmann, Reinhard: *Efficient Numerical Methods and Information-Processing Techniques in Environment Water*, 2003, ISBN 3-933761-20-4
- 118 Samaniego-Eguiguren, Luis Eduardo: *Hydrological Consequences of Land Use / Land Cover and Climatic Changes in Mesoscale Catchments*, 2003, ISBN 3-933761-21-2
- 119 Neunhäuserer, Lina: *Diskretisierungsansätze zur Modellierung von Strömungs- und Transportprozessen in geklüftet-porösen Medien*, 2003, ISBN 3-933761-22-0
- 120 Paul, Maren: *Simulation of Two-Phase Flow in Heterogeneous Poros Media with Adaptive Methods*, 2003, ISBN 3-933761-23-9

- 121 Ehret, Uwe: *Rainfall and Flood Nowcasting in Small Catchments using Weather Radar*, 2003, ISBN 3-933761-24-7
- 122 Haag, Ingo: *Der Sauerstoffhaushalt staugeregelter Flüsse am Beispiel des Neckars - Analysen, Experimente, Simulationen -*, 2003, ISBN 3-933761-25-5
- 123 Appt, Jochen: *Analysis of Basin-Scale Internal Waves in Upper Lake Constance*, 2003, ISBN 3-933761-26-3
- 124 Hrsg.: Schrenk, Volker; Batereau, Katrin; Barczewski, Baldur; Weber, Karolin und Koschitzky, Hans-Peter: *Symposium Ressource Fläche und VEGAS - Statuskolloquium 2003, 30. September und 1. Oktober 2003*, 2003, ISBN 3-933761-27-1
- 125 Omar Khalil Ouda: *Optimisation of Agricultural Water Use: A Decision Support System for the Gaza Strip*, 2003, ISBN 3-933761-28-0
- 126 Batereau, Katrin: *Sensorbasierte Bodenluftmessung zur Vor-Ort-Erkundung von Schadensherden im Untergrund*, 2004, ISBN 3-933761-29-8
- 127 Witt, Oliver: *Erosionsstabilität von Gewässersedimenten mit Auswirkung auf den Stofftransport bei Hochwasser am Beispiel ausgewählter Stauhaltungen des Oberrheins*, 2004, ISBN 3-933761-30-1
- 128 Jakobs, Hartmut: *Simulation nicht-isothermer Gas-Wasser-Prozesse in komplexen Kluft-Matrix-Systemen*, 2004, ISBN 3-933761-31-X
- 129 Li, Chen-Chien: *Deterministisch-stochastisches Berechnungskonzept zur Beurteilung der Auswirkungen erosiver Hochwasserereignisse in Flusstauhaltungen*, 2004, ISBN 3-933761-32-8
- 130 Reichenberger, Volker; Helmig, Rainer; Jakobs, Hartmut; Bastian, Peter; Niessner, Jennifer: *Complex Gas-Water Processes in Discrete Fracture-Matrix Systems: Up-scaling, Mass-Conservative Discretization and Efficient Multilevel Solution*, 2004, ISBN 3-933761-33-6
- 131 Hrsg.: Barczewski, Baldur; Koschitzky, Hans-Peter; Weber, Karolin; Wege, Ralf: *VEGAS - Statuskolloquium 2004*, Tagungsband zur Veranstaltung am 05. Oktober 2004 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2004, ISBN 3-933761-34-4
- 132 Asie, Kemal Jabir: *Finite Volume Models for Multiphase Multicomponent Flow through Porous Media*. 2005, ISBN 3-933761-35-2
- 133 Jacoub, George: *Development of a 2-D Numerical Module for Particulate Contaminant Transport in Flood Retention Reservoirs and Impounded Rivers*, 2004, ISBN 3-933761-36-0
- 134 Nowak, Wolfgang: *Geostatistical Methods for the Identification of Flow and Transport Parameters in the Subsurface*, 2005, ISBN 3-933761-37-9
- 135 Süß, Mia: *Analysis of the influence of structures and boundaries on flow and transport processes in fractured porous media*, 2005, ISBN 3-933761-38-7
- 136 Jose, Surabhin Chackiath: *Experimental Investigations on Longitudinal Dispersive Mixing in Heterogeneous Aquifers*, 2005, ISBN: 3-933761-39-5
- 137 Filiz, Fulya: *Linking Large-Scale Meteorological Conditions to Floods in Mesoscale Catchments*, 2005, ISBN 3-933761-40-9
- 138 Qin, Minghao: *Wirklichkeitsnahe und recheneffiziente Ermittlung von Temperatur und Spannungen bei großen RCC-Staumauern*, 2005, ISBN 3-933761-41-7
- 139 Kobayashi, Kenichiro: *Optimization Methods for Multiphase Systems in the Subsurface - Application to Methane Migration in Coal Mining Areas*, 2005, ISBN 3-933761-42-5
- 140 Rahman, Md. Arifur: *Experimental Investigations on Transverse Dispersive Mixing in Heterogeneous Porous Media*, 2005, ISBN 3-933761-43-3
- 141 Schrenk, Volker: *Ökobilanzen zur Bewertung von Altlastensanierungsmaßnahmen*, 2005, ISBN 3-933761-44-1
- 142 Hundecha, Hirpa Yeshewatesfa: *Regionalization of Parameters of a Conceptual Rainfall-Runoff Model*, 2005, ISBN: 3-933761-45-X
- 143 Wege, Ralf: *Untersuchungs- und Überwachungsmethoden für die Beurteilung natürlicher Selbstreinigungsprozesse im Grundwasser*, 2005, ISBN 3-933761-46-8



- 144 Breiting, Thomas: *Techniken und Methoden der Hydroinformatik - Modellierung von komplexen Hydrosystemen im Untergrund*, 2006, ISBN 3-933761-47-6
- 145 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Müller, Martin: *Ressource Untergrund: 10 Jahre VEGAS: Forschung und Technologieentwicklung zum Schutz von Grundwasser und Boden*, Tagungsband zur Veranstaltung am 28. und 29. September 2005 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2005, ISBN 3-933761-48-4
- 146 Rojanschi, Vlad: *Abflusskonzentration in mesoskaligen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung des Sickerraumes*, 2006, ISBN 3-933761-49-2
- 147 Winkler, Nina Simone: *Optimierung der Steuerung von Hochwasserrückhaltebeckensystemen*, 2006, ISBN 3-933761-50-6
- 148 Wolf, Jens: *Räumlich differenzierte Modellierung der Grundwasserströmung alluvialer Aquifere für mesoskalige Einzugsgebiete*, 2006, ISBN: 3-933761-51-4
- 149 Kohler, Beate: *Externe Effekte der Laufwasserkraftnutzung*, 2006, ISBN 3-933761-52-2
- 150 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Stuhmann, Matthias: *VEGAS-Statuskolloquium 2006*, Tagungsband zur Veranstaltung am 28. September 2006 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2006, ISBN 3-933761-53-0
- 151 Niessner, Jennifer: *Multi-Scale Modeling of Multi-Phase - Multi-Component Processes in Heterogeneous Porous Media*, 2006, ISBN 3-933761-54-9
- 152 Fischer, Markus: *Beanspruchung eingeeerdeter Rohrleitungen infolge Austrocknung bindiger Böden*, 2006, ISBN 3-933761-55-7
- 153 Schneck, Alexander: *Optimierung der Grundwasserbewirtschaftung unter Berücksichtigung der Belange der Wasserversorgung, der Landwirtschaft und des Naturschutzes*, 2006, ISBN 3-933761-56-5
- 154 Das, Tapash: *The Impact of Spatial Variability of Precipitation on the Predictive Uncertainty of Hydrological Models*, 2006, ISBN 3-33761-57-3
- 155 Bielinski, Andreas: *Numerical Simulation of CO<sub>2</sub> sequestration in geological formations*, 2007, ISBN 3-933761-58-1
- 156 Mödinger, Jens: *Entwicklung eines Bewertungs- und Entscheidungsunterstützungssystems für eine nachhaltige regionale Grundwasserbewirtschaftung*, 2006, ISBN 3-933761-60-3
- 157 Manthey, Sabine: *Two-phase flow processes with dynamic effects in porous media - parameter estimation and simulation*, 2007, ISBN 3-933761-61-1
- 158 Pozos Estrada, Oscar: *Investigation on the Effects of Entrained Air in Pipelines*, 2007, ISBN 3-933761-62-X
- 159 Ochs, Steffen Oliver: *Steam injection into saturated porous media – process analysis including experimental and numerical investigations*, 2007, ISBN 3-933761-63-8
- 160 Marx, Andreas: *Einsatz gekoppelter Modelle und Wetterradar zur Abschätzung von Niederschlagsintensitäten und zur Abflussvorhersage*, 2007, ISBN 3-933761-64-6
- 161 Hartmann, Gabriele Maria: *Investigation of Evapotranspiration Concepts in Hydrological Modelling for Climate Change Impact Assessment*, 2007, ISBN 3-933761-65-4
- 162 Kebede Gurmessa, Tesfaye: *Numerical Investigation on Flow and Transport Characteristics to Improve Long-Term Simulation of Reservoir Sedimentation*, 2007, ISBN 3-933761-66-2
- 163 Trifković, Aleksandar: *Multi-objective and Risk-based Modelling Methodology for Planning, Design and Operation of Water Supply Systems*, 2007, ISBN 3-933761-67-0
- 164 Göttinger, Jens: *Distributed Conceptual Hydrological Modelling - Simulation of Climate, Land Use Change Impact and Uncertainty Analysis*, 2007, ISBN 3-933761-68-9
- 165 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Stuhmann, Matthias: *VEGAS – Kolloquium 2007*, Tagungsband zur Veranstaltung am 26. September 2007 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2007, ISBN 3-933761-69-7
- 166 Freeman, Beau: *Modernization Criteria Assessment for Water Resources Planning; Klamath Irrigation Project, U.S.*, 2008, ISBN 3-933761-70-0

- 167 Dreher, Thomas: *Selektive Sedimentation von Feinstschwebstoffen in Wechselwirkung mit wandnahen turbulenten Strömungsbedingungen*, 2008, ISBN 3-933761-71-9
- 168 Yang, Wei: *Discrete-Continuous Downscaling Model for Generating Daily Precipitation Time Series*, 2008, ISBN 3-933761-72-7
- 169 Kopecki, Ianina: *Calculational Approach to FST-Hemispheres for Multiparametrical Benthos Habitat Modelling*, 2008, ISBN 3-933761-73-5
- 170 Brommundt, Jürgen: *Stochastische Generierung räumlich zusammenhängender Niederschlagszeitreihen*, 2008, ISBN 3-933761-74-3
- 171 Papafotiou, Alexandros: *Numerical Investigations of the Role of Hysteresis in Heterogeneous Two-Phase Flow Systems*, 2008, ISBN 3-933761-75-1
- 172 He, Yi: *Application of a Non-Parametric Classification Scheme to Catchment Hydrology*, 2008, ISBN 978-3-933761-76-7
- 173 Wagner, Sven: *Water Balance in a Poorly Gauged Basin in West Africa Using Atmospheric Modelling and Remote Sensing Information*, 2008, ISBN 978-3-933761-77-4
- 174 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Stuhmann, Matthias; Schrenk, Volker: *VEGAS-Kolloquium 2008 Ressource Fläche III*, Tagungsband zur Veranstaltung am 01. Oktober 2008 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2008, ISBN 978-3-933761-78-1
- 175 Patil, Sachin: *Regionalization of an Event Based Nash Cascade Model for Flood Predictions in Ungauged Basins*, 2008, ISBN 978-3-933761-79-8
- 176 Assteerawatt, Anongnart: *Flow and Transport Modelling of Fractured Aquifers based on a Geostatistical Approach*, 2008, ISBN 978-3-933761-80-4
- 177 Karnahl, Joachim Alexander: *2D numerische Modellierung von multifraktionalem Schwebstoff- und Schadstofftransport in Flüssen*, 2008, ISBN 978-3-933761-81-1
- 178 Hiester, Uwe: *Technologieentwicklung zur In-situ-Sanierung der ungesättigten Bodenzone mit festen Wärmequellen*, 2009, ISBN 978-3-933761-82-8
- 179 Laux, Patrick: *Statistical Modeling of Precipitation for Agricultural Planning in the Volta Basin of West Africa*, 2009, ISBN 978-3-933761-83-5
- 180 Ehsan, Saqib: *Evaluation of Life Safety Risks Related to Severe Flooding*, 2009, ISBN 978-3-933761-84-2
- 181 Prohaska, Sandra: *Development and Application of a 1D Multi-Strip Fine Sediment Transport Model for Regulated Rivers*, 2009, ISBN 978-3-933761-85-9
- 182 Kopp, Andreas: *Evaluation of CO<sub>2</sub> Injection Processes in Geological Formations for Site Screening*, 2009, ISBN 978-3-933761-86-6
- 183 Ebigbo, Anozie: *Modelling of biofilm growth and its influence on CO<sub>2</sub> and water (two-phase) flow in porous media*, 2009, ISBN 978-3-933761-87-3
- 184 Freiboth, Sandra: *A phenomenological model for the numerical simulation of multiphase multicomponent processes considering structural alterations of porous media*, 2009, ISBN 978-3-933761-88-0
- 185 Zöllner, Frank: *Implementierung und Anwendung netzfreier Methoden im Konstruktiven Wasserbau und in der Hydromechanik*, 2009, ISBN 978-3-933761-89-7
- 186 Vasin, Milos: *Influence of the soil structure and property contrast on flow and transport in the unsaturated zone*, 2010, ISBN 978-3-933761-90-3
- 187 Li, Jing: *Application of Copulas as a New Geostatistical Tool*, 2010, ISBN 978-3-933761-91-0
- 188 AghaKouchak, Amir: *Simulation of Remotely Sensed Rainfall Fields Using Copulas*, 2010, ISBN 978-3-933761-92-7
- 189 Thapa, Pawan Kumar: *Physically-based spatially distributed rainfall runoff modelling for soil erosion estimation*, 2010, ISBN 978-3-933761-93-4
- 190 Wurms, Sven: *Numerische Modellierung der Sedimentationsprozesse in Retentionsanlagen zur Steuerung von Stoffströmen bei extremen Hochwasserabflussereignissen*, 2011, ISBN 978-3-933761-94-1

- 191 Merkel, Uwe: *Unsicherheitsanalyse hydraulischer Einwirkungen auf Hochwasserschutzdeiche und Steigerung der Leistungsfähigkeit durch adaptive Strömungsmodellierung*, 2011, ISBN 978-3-933761-95-8
- 192 Fritz, Jochen: *A Decoupled Model for Compositional Non-Isothermal Multiphase Flow in Porous Media and Multiphysics Approaches for Two-Phase Flow*, 2010, ISBN 978-3-933761-96-5
- 193 Weber, Karolin (Hrsg.): *12. Treffen junger WissenschaftlerInnen an Wasserbauinstituten*, 2010, ISBN 978-3-933761-97-2
- 194 Bliedernicht, Jan-Geert: *Probability Forecasts of Daily Areal Precipitation for Small River Basins*, 2011, ISBN 978-3-933761-98-9
- 195 Hrsg.: Koschitzky, Hans-Peter; Braun, Jürgen: *VEGAS-Kolloquium 2010 In-situ-Sanierung - Stand und Entwicklung Nano und ISCO -*, Tagungsband zur Veranstaltung am 07. Oktober 2010 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2010, ISBN 978-3-933761-99-6
- 196 Gafurov, Abror: *Water Balance Modeling Using Remote Sensing Information - Focus on Central Asia*, 2010, ISBN 978-3-942036-00-9
- 197 Mackenberg, Sylvia: *Die Quellstärke in der Sickerwasserprognose: Möglichkeiten und Grenzen von Labor- und Freilanduntersuchungen*, 2010, ISBN 978-3-942036-01-6
- 198 Singh, Shailesh Kumar: *Robust Parameter Estimation in Gauged and Ungauged Basins*, 2010, ISBN 978-3-942036-02-3
- 199 Doğan, Mehmet Onur: *Coupling of porous media flow with pipe flow*, 2011, ISBN 978-3-942036-03-0
- 200 Liu, Min: *Study of Topographic Effects on Hydrological Patterns and the Implication on Hydrological Modeling and Data Interpolation*, 2011, ISBN 978-3-942036-04-7
- 201 Geleta, Habtamu Itfa: *Watershed Sediment Yield Modeling for Data Scarce Areas*, 2011, ISBN 978-3-942036-05-4
- 202 Franke, Jörg: *Einfluss der Überwachung auf die Versagenswahrscheinlichkeit von Staustufen*, 2011, ISBN 978-3-942036-06-1
- 203 Bakimchandra, Oinam: *Integrated Fuzzy-GIS approach for assessing regional soil erosion risks*, 2011, ISBN 978-3-942036-07-8
- 204 Alam, Muhammad Mahboob: *Statistical Downscaling of Extremes of Precipitation in Mesoscale Catchments from Different RCMs and Their Effects on Local Hydrology*, 2011, ISBN 978-3-942036-08-5
- 205 Hrsg.: Koschitzky, Hans-Peter; Braun, Jürgen: *VEGAS-Kolloquium 2011 Flache Geothermie - Perspektiven und Risiken*, Tagungsband zur Veranstaltung am 06. Oktober 2011 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2011, ISBN 978-3-933761-09-2
- 206 Haslauer, Claus: *Analysis of Real-World Spatial Dependence of Subsurface Hydraulic Properties Using Copulas with a Focus on Solute Transport Behaviour*, 2011, ISBN 978-3-942036-10-8
- 207 Dung, Nguyen Viet: *Multi-objective automatic calibration of hydrodynamic models – development of the concept and an application in the Mekong Delta*, 2011, ISBN 978-3-942036-11-5
- 208 Hung, Nguyen Nghia: *Sediment dynamics in the floodplain of the Mekong Delta, Vietnam*, 2011, ISBN 978-3-942036-12-2
- 209 Kuhlmann, Anna: *Influence of soil structure and root water uptake on flow in the unsaturated zone*, 2012, ISBN 978-3-942036-13-9
- 210 Tuhtan, Jeffrey Andrew: *Including the Second Law Inequality in Aquatic Ecodynamics: A Modeling Approach for Alpine Rivers Impacted by Hydropeaking*, 2012, ISBN 978-3-942036-14-6
- 211 Tolossa, Habtamu: *Sediment Transport Computation Using a Data-Driven Adaptive Neuro-Fuzzy Modelling Approach*, 2012, ISBN 978-3-942036-15-3

- 212 Tatomir, Alexandru-Bodgan: *From Discrete to Continuum Concepts of Flow in Fractured Porous Media*, 2012, ISBN 978-3-942036-16-0
- 213 Erbertseder, Karin: *A Multi-Scale Model for Describing Cancer-Therapeutic Transport in the Human Lung*, 2012, ISBN 978-3-942036-17-7
- 214 Noack, Markus: *Modelling Approach for Interstitial Sediment Dynamics and Reproduction of Gravel Spawning Fish*, 2012, ISBN 978-3-942036-18-4
- 215 De Boer, Cjestmir Volkert: *Transport of Nano Sized Zero Valent Iron Colloids during Injection into the Subsurface*, 2012, ISBN 978-3-942036-19-1
- 216 Pfaff, Thomas: *Processing and Analysis of Weather Radar Data for Use in Hydrology*, 2013, ISBN 978-3-942036-20-7
- 217 Lebreuz, Hans-Henning: *Addressing the Input Uncertainty for Hydrological Modeling by a New Geostatistical Method*, 2013, ISBN 978-3-942036-21-4
- 218 Darcis, Melanie Yvonne: *Coupling Models of Different Complexity for the Simulation of CO<sub>2</sub> Storage in Deep Saline Aquifers*, 2013, ISBN 978-3-942036-22-1
- 219 Beck, Ferdinand: *Generation of Spatially Correlated Synthetic Rainfall Time Series in High Temporal Resolution - A Data Driven Approach*, 2013, ISBN 978-3-942036-23-8
- 220 Guthke, Philipp: *Non-multi-Gaussian spatial structures: Process-driven natural genesis, manifestation, modeling approaches, and influences on dependent processes*, 2013, ISBN 978-3-942036-24-5
- 221 Walter, Lena: *Uncertainty studies and risk assessment for CO<sub>2</sub> storage in geological formations*, 2013, ISBN 978-3-942036-25-2
- 222 Wolff, Markus: *Multi-scale modeling of two-phase flow in porous media including capillary pressure effects*, 2013, ISBN 978-3-942036-26-9
- 223 Mosthaf, Klaus Roland: *Modeling and analysis of coupled porous-medium and free flow with application to evaporation processes*, 2014, ISBN 978-3-942036-27-6
- 224 Leube, Philipp Christoph: *Methods for Physically-Based Model Reduction in Time: Analysis, Comparison of Methods and Application*, 2013, ISBN 978-3-942036-28-3
- 225 Rodríguez Fernández, Jhan Ignacio: *High Order Interactions among environmental variables: Diagnostics and initial steps towards modeling*, 2013, ISBN 978-3-942036-29-0
- 226 Eder, Maria Magdalena: *Climate Sensitivity of a Large Lake*, 2013, ISBN 978-3-942036-30-6
- 227 Greiner, Philipp: *Alkoholinjektion zur In-situ-Sanierung von CKW Schadensherden in Grundwasserleitern: Charakterisierung der relevanten Prozesse auf unterschiedlichen Skalen*, 2014, ISBN 978-3-942036-31-3
- 228 Lauser, Andreas: *Theory and Numerical Applications of Compositional Multi-Phase Flow in Porous Media*, 2014, ISBN 978-3-942036-32-0
- 229 Enzenhöfer, Rainer: *Risk Quantification and Management in Water Production and Supply Systems*, 2014, ISBN 978-3-942036-33-7
- 230 Faigle, Benjamin: *Adaptive modelling of compositional multi-phase flow with capillary pressure*, 2014, ISBN 978-3-942036-34-4
- 231 Oladyshkin, Sergey: *Efficient modeling of environmental systems in the face of complexity and uncertainty*, 2014, ISBN 978-3-942036-35-1
- 232 Sugimoto, Takayuki: *Copula based Stochastic Analysis of Discharge Time Series*, 2014, ISBN 978-3-942036-36-8
- 233 Koch, Jonas: *Simulation, Identification and Characterization of Contaminant Source Architectures in the Subsurface*, 2014, ISBN 978-3-942036-37-5
- 234 Zhang, Jin: *Investigations on Urban River Regulation and Ecological Rehabilitation Measures, Case of Shenzhen in China*, 2014, ISBN 978-3-942036-38-2
- 235 Siebel, Rüdiger: *Experimentelle Untersuchungen zur hydrodynamischen Belastung und Standsicherheit von Deckwerken an überströmbaren Erddämmen*, 2014, ISBN 978-3-942036-39-9

- 236 Baber, Katherina: *Coupling free flow and flow in porous media in biological and technical applications: From a simple to a complex interface description*, 2014, ISBN 978-3-942036-40-5
- 237 Nuske, Klaus Philipp: *Beyond Local Equilibrium — Relaxing local equilibrium assumptions in multiphase flow in porous media*, 2014, ISBN 978-3-942036-41-2
- 238 Geiges, Andreas: *Efficient concepts for optimal experimental design in nonlinear environmental systems*, 2014, ISBN 978-3-942036-42-9
- 239 Schwenck, Nicolas: *An XFEM-Based Model for Fluid Flow in Fractured Porous Media*, 2014, ISBN 978-3-942036-43-6
- 240 Chamorro Chávez, Alejandro: *Stochastic and hydrological modelling for climate change prediction in the Lima region, Peru*, 2015, ISBN 978-3-942036-44-3
- 241 Yulizar: *Investigation of Changes in Hydro-Meteorological Time Series Using a Depth-Based Approach*, 2015, ISBN 978-3-942036-45-0
- 242 Kretschmer, Nicole: *Impacts of the existing water allocation scheme on the Limarí watershed – Chile, an integrative approach*, 2015, ISBN 978-3-942036-46-7
- 243 Kramer, Matthias: *Luftbedarf von Freistrahlturbinen im Gegendruckbetrieb*, 2015, ISBN 978-3-942036-47-4
- 244 Hommel, Johannes: *Modeling biogeochemical and mass transport processes in the subsurface: Investigation of microbially induced calcite precipitation*, 2016, ISBN 978-3-942036-48-1
- 245 Germer, Kai: *Wasserinfiltration in die ungesättigte Zone eines makroporösen Hanges und deren Einfluss auf die Hangstabilität*, 2016, ISBN 978-3-942036-49-8
- 246 Hörning, Sebastian: *Process-oriented modeling of spatial random fields using copulas*, 2016, ISBN 978-3-942036-50-4
- 247 Jambhekar, Vishal: *Numerical modeling and analysis of evaporative salinization in a coupled free-flow porous-media system*, 2016, ISBN 978-3-942036-51-1
- 248 Huang, Yingchun: *Study on the spatial and temporal transferability of conceptual hydrological models*, 2016, ISBN 978-3-942036-52-8
- 249 Kleinknecht, Simon Matthias: *Migration and retention of a heavy NAPL vapor and remediation of the unsaturated zone*, 2016, ISBN 978-3-942036-53-5
- 250 Kwakye, Stephen Oppong: *Study on the effects of climate change on the hydrology of the West African sub-region*, 2016, ISBN 978-3-942036-54-2
- 251 Kissinger, Alexander: *Basin-Scale Site Screening and Investigation of Possible Impacts of CO<sub>2</sub> Storage on Subsurface Hydrosystems*, 2016, ISBN 978-3-942036-55-9
- 252 Müller, Thomas: *Generation of a Realistic Temporal Structure of Synthetic Precipitation Time Series for Sewer Applications*, 2017, ISBN 978-3-942036-56-6
- 253 Grüninger, Christoph: *Numerical Coupling of Navier-Stokes and Darcy Flow for Soil-Water Evaporation*, 2017, ISBN 978-3-942036-57-3
- 254 Suroso: *Asymmetric Dependence Based Spatial Copula Models: Empirical Investigations and Consequences on Precipitation Fields*, 2017, ISBN 978-3-942036-58-0
- 255 Müller, Thomas; Mosthaf, Tobias; Gunzenhauser, Sarah; Seidel, Jochen; Bárdossy, András: *Grundlagenbericht Niederschlags-Simulator (NiedSim3)*, 2017, ISBN 978-3-942036-59-7
- 256 Mosthaf, Tobias: *New Concepts for Regionalizing Temporal Distributions of Precipitation and for its Application in Spatial Rainfall Simulation*, 2017, ISBN 978-3-942036-60-3
- 257 Fenrich, Eva Katrin: *Entwicklung eines ökologisch-ökonomischen Vernetzungsmodells für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher*, 2018, ISBN 978-3-942036-61-0