

Klaus-Dieter WOLTER

## **Monitoring und Sanierung des Wasser- und Stoffhaushaltes in Einzugsgebieten von Küstengewässern**

**Monitoring and redevelopment of water and matter balance in catchment areas of coastal waters**

### **Abstract**

Today, nature and landscape are not functioning sustainably. High matter flows of nutrients and base cations are lost from catchment areas and are responsible for eutrophication of lakes and rivers. A thermodynamically founded measure at the catchment scale is landscape efficiency. It can be subdivided into 1. thermal efficiency, describing the degree of attenuation of the daily energy pulse of the sun to a mean temperature by cooling evaporation and warming condensation; 2. chemical efficiency, describing the degree of short-circuited matter cycles in production and respiration diminished by irreversible losses of base cations (proton flow) to the sea. With a high thermal and chemical efficiency, sustainability and nature's services for society are maximised. In the article, the improvement of landscape efficiency by intelligent land and water management and the benefit of a landscape monitoring system are discussed.

**Keywords:** sustainable development, landscape functionality, thermal efficiency, chemical efficiency

### **1 Einleitung**

Eine am Ziel der Nachhaltigkeit orientierte Beobachtung und Steuerung von Ökosystemen setzt ein hinreichendes funktionales Verständnis der Ökosysteme voraus, d.h. Erkenntnisse über die raum-zeitliche Verteilung der Prozesse und ihrer Kopplungen. Ein solcher funktionaler Ansatz kann die Grundlage für eine naturwissenschaftlich begründete Definition von nachhaltig funktionierenden Ökosystemen liefern. Er kann damit zugleich eine wesentliche Voraussetzung für die Ableitung von Steuerungsmaßnahmen zur Steigerung der Nachhaltigkeit bilden.

Ökologie ist von Odum (1999) definiert als die Lehre von den Wechselbeziehungen der Organismen(gruppen) zu ihrer Umwelt, als das Studium von Struktur und Funktion der Natur sowie als Umweltbiologie. In der Ökologie wird zunehmend die Divergenz vorhandener Konzepte diskutiert. Diese Divergenz kann auf ein unzureichendes Verständnis über die Zusammenhänge von Struktur und

Funktion und auf den Konflikt zwischen sektorisierter und integrativer Betrachtungsweise zurückgeführt werden.

Beispielsweise ist das fehlende Zusammenführen der Einzeldisziplinen in der Limnologie als Wissenschaft in einem Artikel mit dem Titel „*Pathologies in limnology*“ (Peters 1990) thematisiert; andere Autoren bezeichnen die mangelnde Integration von Mensch und Umwelt als das Hauptdefizit des heutigen Naturschutzes (Pfadenhauer & Ganzert 1992). Auch Falkenmark *et al.* (1999) stellen fest, dass die fortschreitende Globalisierung die sektorielle Teilung zu verstärken scheint. In einer anderen Arbeit („*Is it time to bury the ecosystem concept?*“) wird die strukturell dominierte Beschreibung von Ökosystemen in Frage gestellt und ausgeführt: „*The stable entity is the collection of functional groups that recover to the same rate processes, feedbacks, and complex organization.*“ (O’Neill 2001). Struktur (z.B. Biodiversität) werde durch die Informationstheorie, Funktion durch die Thermodynamik beschrieben (Kay 1984).

Ein mit Bezug zu nachhaltiger Entwicklung erstelltes Strategiepapier der DFG-Wasserkommission (Senatskommission Wasserforschung der Deutschen Forschungsgemeinschaft) betont als zukünftige Themen die integrale Funktion des Wassers, den thermodynamisch begründeten Wirkungsgrad der Landschaft und die lokale Autarkie, d.h. lokale Kreislaufwirtschaft und damit funktionale Aspekte (Benndorf 2001, Benndorf 2003). Dieses Strategiepapier geht davon aus, dass bei limitierter fossiler Energie, bei wachsender Weltbevölkerung und der Notwendigkeit, diese zu ernähren, trotz des umfassenden Umweltrechts eine Nachhaltigkeit in der Bewirtschaftung der Landschaft (zu verstehen als eine Form der Ökosystemsteuerung) bisher nicht erreicht werden konnte. Die Natur mit ihren Serviceleistungen für die Menschen bildet aber gerade bei limitierter Energieressource die unabdingbare Grundlage unserer Gesellschaft.

Die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie ist europaweit mit erheblichen Anstrengungen verbunden. Auch für sie ist eine funktionale Betrachtungsweise, d.h. eine raum-zeitliche Betrachtung der Prozessverteilungen und -kopplungen der Gewässer und der zugehörigen Einzugsgebiete in Zukunft von besonderer Bedeutung. So kann mit Hilfe des funktionalen Ansatzes die Konzeption von Steuerungsmaßnahmen in den Land-Gewässer-Ökosystemen auf ihre Wirksamkeit (ihren Wirkungsgrad) und ihre finanzielle Effizienz hinterfragt sowie zielgerichtet weiterentwickelt werden.

Da technische Eingriffe die Natur bzw. Landschaft immer mehr verändern und daraus bereits Folgeprobleme für die Gesellschaft entstanden sind, hat Luhmann (1986) die Entwicklung einer größeren „Eingriffskompetenz“ (Steigerung der Nachhaltigkeit mit Eingriffen in die Landschaft) incl. der „eigenen Rückbetreffenheit“ (= Rückkopplung zwischen „Gesellschaft“ und „Natur“) gefordert. Die funktionale Betrachtung von Ökosystemen (Wirkungsgradbetrachtung) kann einen wertvollen Baustein hierfür liefern.

## 2 Grundlagen

In einem dreijährigen Forschungsprojekt der Technischen Universität Berlin wurde von Ripl *et al.* (1996) in Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten in Schleswig-Holstein und weiteren Institutionen eine Konzeption zur funktionalen Bewertung von Land- und Gewässer-Ökosystemen entwickelt und hieraus Strategien zur nachhaltigeren Landnutzung abgeleitet. Diese Konzeption beruht auf thermodynamischen Überlegungen zum Stoffaustragsprozess aus der Landschaft und beschreibt die Möglichkeiten einer Wirkungsgradsteigerung im Einzugsgebiet, bei der gezielt Einfluss auf den Wasserhaushalt der Landschaft und hierüber auf die Transporte von Nähr- und Mineralstoffen in die Gewässer genommen wird. Ziel ist unter anderem die Nährstofflimitierung (z.B. an Phosphor) in Seen sowie die Entwicklung von natürlichen Wasserstands- und Abflussmustern in Gewässern. Im Ergebnis wird in dieser Konzeption aufgezeigt, dass eine wirksame Sanierung der Gewässer nur durch gezielte Maßnahmen an Land erreicht werden kann. Der vorliegende Artikel baut auf dieser Arbeit auf.

### 2.1 Energiedissipation in der Landschaft

Ökosystemare Prozesse erhalten ihre Energie aus der Wechselwirkung zwischen Erde und Sonne. Wahrnehmbar ist die Energie aus dieser Wechselwirkung als raum-zeitliche Temperaturschwankung mit einem Tages- und Jahresmuster. Durch das dissipative Medium Wasser wird der Energiepuls räumlich (z.B. von wärmeren zu kühleren Breiten) und zeitlich (z.B. vom Tag in die Nacht) verteilt, d.h. in Richtung des räumlichen und zeitlichen Mittelwertes eingelenkt (Energiedissipation). Aufgrund seiner dissipativen Eigenschaften wirkt das Wasser als "Prozessor" in der Landschaft. Seine Prozesseigenschaften basieren auf der Fähigkeit zur Verdunstung und Kondensation (physikalischer Prozessor), zur Stofflösung und -fällung (chemischer Prozessor) und zur Wasserspaltung und -synthese bei Produktion und Respiration (biologischer Prozessor) (Ripl 1995).

Die dissipativen Verdunstungs- und Kondensationszyklen finden großräumig zwischen Meeren, Atmosphäre und Kontinenten statt. Sie lassen auf den Kontinenten die chemischen Prozesseigenschaften des Wassers wirksam werden. Mit dem Abfluss entstehen Transporte gelöster Mineral- und Nährstoffe in Richtung der Gewässer und weiter zur globalen Senke Meer. Da die ausgewaschenen Basenkationen ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) pflanzennotwendige Nutstoffe sind und den Ökosystemen mit der Hebung des Meeresbodens erst in geologischen Zeiträumen wieder zur Verfügung stehen, kann der Verlagerungsprozess für den Zeitrahmen der menschlichen Landbewirtschaftung als irreversibler Verlustprozess angesehen werden. Dieser begrenzt die dauerhafte (nachhaltige) Nutzung der Landschaft durch den Menschen.

Im Falle der ungehinderten Entwicklung von Ökosystemen wirkt den Stoffverlusten auf den Kontinenten zunehmend der biologische Prozessor entgegen. Mit der Entwicklung vergesellschafteter Biozönosen erfolgen Produktions- und Respirationsprozesse raum-zeitlich enger gekoppelt, so dass die Energie bei kurzge-

geschlossenen Stoffkreisläufen immer stoffverlustärmer dissipiert werden kann. Das nur begrenzt vorhandene Angebot pflanzennotwendiger Stoffe wird somit durch stoffliche Kreisprozesse weitgehend zurückgehalten. Für die Beschreibung und Bewertung von Ökosystemfunktionen unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit ist diese funktionale (energetische) Betrachtung von größerer Relevanz als die strukturelle Betrachtung von Ökosystemen oder einzelner ihrer Komponenten, wie z.B. der Gewässer oder ihrer einzelnen Organismen. (Ripl 1992, 1995, Ripl *et al.* 1996, Ripl & Wolter 2002).

## 2.2 Wirkungsgrad und Nachhaltigkeit

Ein Monitoring zur funktionalen Bewertung von Ökosystemen lässt sich mit Hilfe des so genannten Wirkungsgradansatzes durchführen. Nach den oben stehenden Ausführungen besitzt das System den höchsten Wirkungsgrad, welches bei der Dissipation des täglichen Energiepulses eine maximale Langlebigkeit (Nachhaltigkeit) aufweist. Die maximale Nachhaltigkeit natürlicher Systeme ist dann gegeben, wenn bei der Energiedissipation stoffverlustarme Kreisprozesse aufrechterhalten werden. Sie führen an Land zum Erhalt des begrenzten Vorrats an pflanzennotwendigen Stoffen (Ripl *et al.* 1996), in Seen zur Minimierung der Sedimentationsrate und damit zur Verzögerung der Verlandung (Ripl & Wolter 2002).

Eine Wirkungsgradbetrachtung energiedissipativer Systeme kann daher über den Anteil an stofflichen Kreisprozessen gegenüber den Verlustprozessen erfolgen. Hierfür müssen Systemgrenzen gewählt werden, bei denen ein Minimum des Stoffaustausches mit der Umgebung besteht. Dieses sind die Grenzen von Wassereinzugsgebieten, da von ihnen ein gerichteter Transport fester und gelöster Stoffe mit dem ober- und unterirdisch abfließenden Wasser in die Gewässer als den tiefsten Bereichen einer Landschaft stattfindet. Einzugsgebietsgrenzen stellen daher natürlicherweise geeignete Systemgrenzen dar (Ripl *et al.* 1996).

Es können ein stofflicher (chemischer) und ein thermischer Wirkungsgrad unterschieden werden. Beide sind aus den Prozesseigenschaften des Wassers ableitbar. Der stoffliche oder chemische Wirkungsgrad  $W_0$  von Ökosystemen wird aus dem Protonen- und Elektronenfluss als Folge der chemischen und biologischen Prozesseigenschaften des Wassers abgeschätzt, der thermische Wirkungsgrad aus der Verdunstung (Kühlung) und Kondensation (Erwärmung) als Folge der physikalischen Prozesseigenschaften des Wassers.

Beim chemischen Wirkungsgrad sind die energiedissipativen stofflichen Lösungs- und Ausfällungsprozesse von Relevanz. Irreversible Verlustprozesse sind auf dem Land insbesondere die Transporte der Nähr- und Mineralstoffe über die Fließgewässer ins Meer, in Seen die Sedimentation bzw. Verluste dieser Stoffe mit dem Abfluss. Des Weiteren sind für die Abschätzung des chemischen Wirkungsgrades die biologischen Prozesse der Wasserspaltung (Photosynthese) und der Wassersynthese (Respiration) von Bedeutung. Dabei geht in nachhaltig funktionierenden terrestrischen Systemen auch abgestorbene organische Substanz kaum verloren, indem sie im Boden als Nährstoff- und Wasserspeicher dient und den stofflichen Kreisläufen verfügbar bleibt.

In Landökosystemen steigt der Wirkungsgrad bei kleinräumigen Zyklen des Wassers und der Nähr- und Mineralstoffe. Diese Steigerung beruht auf einer

vermehrten Einflussnahme des biologischen Prozessors auf die Energiedissipation. Dies geht einher mit einer zunehmenden Vergleichmäßigung der Temperatur im Tages- und Jahresverlauf und einer Vergleichmäßigung der Wasserspende an die Gewässer im Jahresverlauf. Demgegenüber laugt ein System mit einem geringen Wirkungsgrad seinen Standort zunehmend aus - es "altert" (sensu Odum 1969) schneller. Dabei degradiert es auch zunehmend in seiner Organismenzusammensetzung und -vergesellschaftung.

Der chemische Wirkungsgrad  $W_0$  kann rechnerisch nach Formel [1] abgeschätzt werden (verändert nach Rippl *et al.* 1996):

[1]  $W_0 = (BP - V) / BP$   
 BP = Bruttoprimärproduktion im Einzugsgebiet,  
 Einheit: Protonenäquivalentsumme pro Fläche und Zeit,  
 1 H<sup>+</sup> entspricht ½ C  
 V = Verluste = Stofffracht an Basenkationen aus dem Einzugsgebiet,  
 Einheit: Protonenäquivalentsumme pro Fläche und Zeit  
 1 H<sup>+</sup> entspricht ½ Ca<sup>2+</sup>, ½ Mg<sup>2+</sup>, 1 Na<sup>+</sup>, 1 K<sup>+</sup>

In engem Zusammenhang mit dem chemischen Wirkungsgrad steht der thermische Wirkungsgrad  $W_t$  (Formel [2]; Rippl *et al.* 1996, verändert). Dieser gibt an, wie vollständig der im Tag-Nacht-Rhythmus wirksame Energiepuls der Sonne an der Erdoberfläche durch Verdunstung (Kühlung) und Kondensation von Wasser (Erwärmung) dissipiert wird. Kann die Energie durch kleinräumige Kreisprozesse des Wassers weitestgehend vollständig am Standort dissipiert werden, spiegelt sich dies auch in einer ausgeglicheneren Temperatur im Tagesverlauf wider. Einen hohen thermischen Wirkungsgrad besitzen beispielsweise weitestgehend intakte und daher wasserspeichernde Natur- oder Urwälder, Feuchtgebiete, aber auch agroforstwirtschaftliche Strukturen. Ein geringer thermischer Wirkungsgrad wird in Städten und intensiv mit Steppenpflanzen bewirtschafteten landwirtschaftlichen Flächen vorgefunden.

[2]  $W_t = (T_m - T_{SD}) / T_m$   
 $T_m$  = mittlere Temperatur (z.B. eines Satelliten-Thermalbildes)  
 $T_{SD}$  = Temperaturabweichung vom Mittelwert (z.B. Standardabweichung eines Satelliten-Thermalbildes)

### 2.3 Beispiele für intakte Funktionalität und degradierte Flächen

Der thermische Wirkungsgrad lässt sich nach Schneider & Kay (1997) auch aus dem Bestreben von thermodynamischen Systemen ableiten, einem angelegten Gradienten zur Entfernung aus dem Gleichgewicht Widerstand entgegenzusetzen, bzw. sich dem Gleichgewicht wieder anzunähern. Am Beispiel eines Gebietes in Oregon werden Temperatureffekte diskutiert. Die höchsten Temperaturen lagen in einer Kahlschlagslichtung und einem Steinbruch vor. Die beste Kühlung und Ausnutzung der eingestrahlten Energie erreicht ein 400 Jahre alter Wald aus Douglasien mit dreischichtiger Pflanzendecke. Hieraus kann abgeleitet werden, dass zunehmend reife (hoch entwickelte) Ökosysteme eine eher geringere Schwarzkörpertemperatur (d.h. Oberflächentemperatur) aufweisen (Schneider & Kay 1997).

Der stoffliche und der thermische Wirkungsgrad der Landschaft wird in der anthropogen überformten Landschaft durch den veränderten Wasserhaushalt im

Rahmen der Land-, Forst- und Wasserwirtschaft sowie der Verstädterung bestimmt. Die Landnutzung hat insbesondere seit der Industrialisierung in Europa bis heute auf großer Fläche zu einer Absenkung des stofflichen und thermischen Wirkungsgrades geführt und damit eine Annäherung an das bei uns in zahlreichen Gesetzen formulierte Ziel der nachhaltigen Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen (z.B. im Bundesnaturschutzgesetz, Raumordnungsgesetz, Wasserhaushaltsgesetz) in Frage stellt. Die hierbei ausgelösten Stoffverluste der gelösten Mineralsalze betragen beispielsweise in der BRD über  $1 \text{ t (ha} \cdot \text{a)}^{-1}$  (Ripl *et al.* 1996, Hildmann 1999).

Die Prozesse in Flüssen und Seen sind über den gerichteten Wasser- und daran gebundenen Stofffluss den Prozessen im zugehörigen Einzugsgebiet nachgeordnet. Die Einträge in Seen stehen somit in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Wirkungsgrad im Einzugsgebiet. Daher müssen Seen und ihre Einzugsgebiete als funktionale Einheit gesehen werden. In Seen kann der Wirkungsgrad erst steigen, wenn stoffliche Einträge minimiert sind. Nur dann kann auch im Gewässer die Energie in stoffverlustarmen Kreisprozessen bei der Produktion und Respiration dissipiert werden. Die Sedimentationsrate ist minimiert, die Lebensdauer und damit die Nachhaltigkeit des Sees ist maximiert. Ein hoher Wirkungsgrad im See als Folge von enger raum-zeitlicher Kopplung von Produktion und Respiration zeigt sich

- in einer Vergleichmäßigung ausgeprägter räumlicher Gradienten und demzufolge auch zeitlicher Gradienten (z.B. im Sauerstoffgehalt des Wassers),
- in einer zunehmend eng vernetzten Gewässerbiozönose; so kommt es zum Wegfall der Dominanz von Planktongesellschaften, wogegen insbesondere im Litoral als Ort der höchsten Prozessdichte das Auftreten von Aufwuchsorganismen als sichtbare Struktur von raum-zeitlich eng gekoppelter Produktion und Respiration wahrscheinlicher wird.

Bei limitiertem Nährstoffangebot können durch den hohen Vergesellschaftungsgrad dieser Strukturen weitestgehend Kreisprozesse aufrechterhalten werden (P/R-, d.h. Produktions/Respirations-Quotient nahe 1).

Die Degradierung eines Gewässers steht in Zusammenhang mit der raum-zeitlichen Trennung von Produktion und Respiration. Mit zunehmender Trennung dieser Kreisprozesse kommt es zu einer vermehrten Destrukturierung der Zönose (Dominanz von Planktongesellschaften) und einer Zunahme raum-zeitlicher Gradienten (z.B. Sauerstoffgehalt des Wassers). Mit wachsender Destrukturierung steigt die Sedimentation - der See „altert“ schneller. Der Begriff „Alterung“ ist hierbei ein bildlicher Ausdruck für die fehlende Nachhaltigkeit einer physischen Struktur in der Landschaft. „Alterung“ bezeichnet eine erhöhte Instabilität bzw. Veränderungsgeschwindigkeit des Systems.

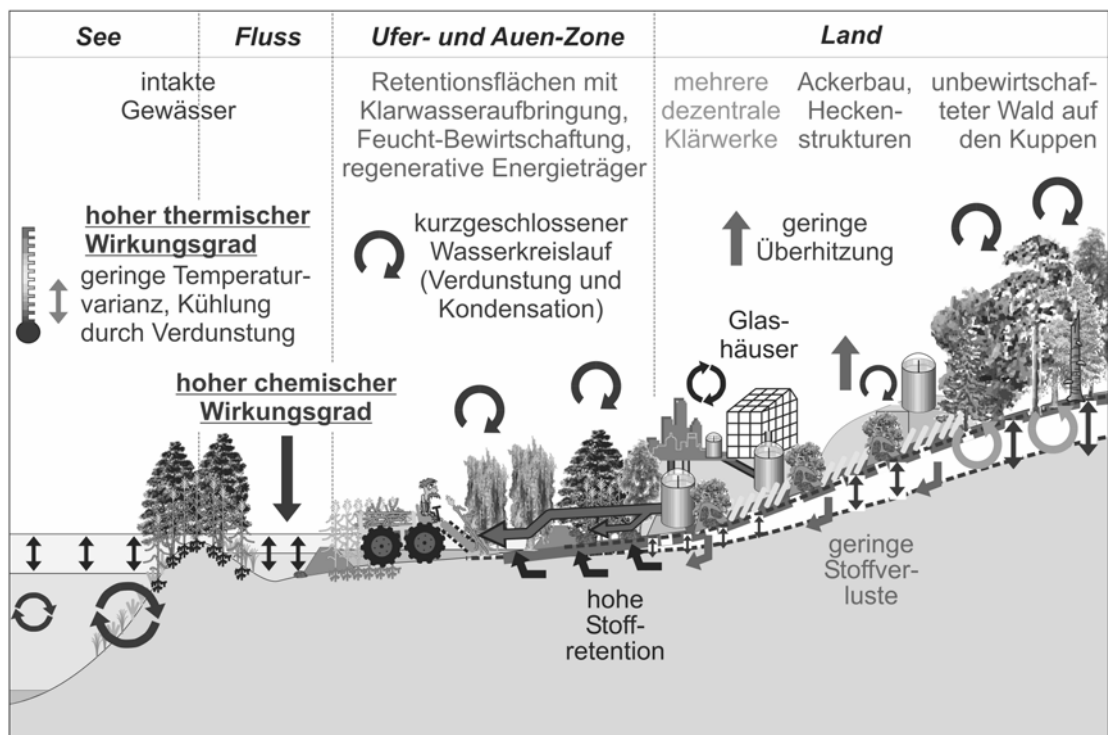
Ein hohes Vorkommen an Planktongesellschaften liefert daher einen Hinweis auf einen geringen Wirkungsgrad, ein hohes Vorkommen von Litoral- und Aufwuchsgesellschaften auf einen hohen Wirkungsgrad des Sees.

### 3 Sanierung und nachhaltige Bewirtschaftung

Mit Hilfe der beschriebenen Wirkungsgradbetrachtung lassen sich die Untergruppen der Seentherapie „Seerestaurierung“ und „Einzugsgebiet-Sanierung“ funktional definieren. Die Seerestaurierung greift in die See-internen Kreisprozesse ein. Wirkungsvolle Restaurierungen setzen jedoch meist eine vorherige externe Nährstoffentlastung in ausreichendem Umfang voraus. Ziel ist die Wirkungsgraderhöhung des Stoffhaushaltes im Gewässer. Die Sanierung ist aus funktionaler Sicht dagegen auf die Erhöhung des Wirkungsgrades im Einzugsgebiet eines Sees ausgerichtet. Ziel ist die Optimierung des Stoffrückhaltes in der gesamten Fläche und damit die Minimierung der diffusen Einträge an Nährstoffen und Basenkationen in die Seen.

#### 3.1 Steuerung der Prozesse über den Wasserhaushalt im Einzugsgebiet

Geeigneten Maßnahmen für eine an den lokalen Wasserhaushalt angepasste nachhaltige, stoffverlustarme Landnutzung liegen folgende allgemeine Prinzipien zugrunde (schematische Darstellung in Abb. 1):



**Abb. 1** Nachhaltige Bewirtschaftung der Landschaft mit lokaler Kreislaufwirtschaft, Feuchtbewirtschaftung, Glashäusern und Produktion regenerativer Energieträger. Schematische Darstellung

Von den Kuppenlagen als Bereiche mit beschleunigten Stofftransportprozessen (Auswaschungsbereiche) gehen die Degradationsprozesse in der Fläche aus. Kuppen sollten daher möglichst weitgehend von einer intensiven Nutzung

ausgenommen werden. Zur Steigerung des landschaftlichen Wirkungsgrades kann in diesen Bereichen die Entwicklung unbewirtschafteter Wälder beitragen: In ihnen werden durch die permanente und hoch diversifizierte Vegetation eine Anreicherung des Bodens mit wasserspeichernder organischer Substanz erreicht und die Potenziale für Stofffreisetzungen und -verlagerungen minimiert. Durch ihr hohes Verdunstungsvermögen können sie zudem eine optimale Kühlung bewirken, was die raschere Kondensation des Wassers und damit kleinräumigere Zyklen aus Verdunstung und Kondensation wahrscheinlicher werden lässt. Generell sollte eine maximale Anreicherung von verdunstungsaktiver Vegetation auf allen nicht bewirtschafteten Flächen in der freien Landschaft (z.B. Gehölze) oder in Siedlungen (z.B. Dach- und Fassadenbegrünung) erfolgen. Diese Prozesse bewirken in ihrer Gesamtheit eine Steigerung des thermischen Wirkungsgrades in der Landschaft.

Der lokale Wasserhaushalt nimmt über die beschriebenen Prozesse auch Einfluss auf die lokale Temperatur-, Wind- und Niederschlagsverteilung (Ripl & Wolter 2002). Diese Zusammenhänge verdeutlichen Satellitenbilder zur Temperaturverteilung an der Erdoberfläche, aus denen in Abhängigkeit vom lokalen Wasserhaushalt eine Temperaturdifferenz zwischen mit Vegetation bestandenen (feuchteren) und vegetationsfreien bzw. -armen (trockeneren) Flächen von 10-15 °C und mehr abgeleitet werden kann. Die hohen räumlichen Temperaturgradienten begünstigen großräumige Ausgleichsbewegungen der Luft, die mit vermehrter raumzeitlicher Trennung der Verdunstungs-Kondensations-Zyklen und mit intensiveren Stoffverlustprozessen in der Landschaft einhergehen.

Niederungen (z.B. Feuchtgebiete) stellen natürlicherweise Retentionsbereiche dar. In ihnen kommt es zu einer Verzögerung des Wasserflusses, bei dem erodierende Partikel und daran gebundene Nährstoffe (z.B. phosphorhaltige Bodenteilchen) zurückgehalten werden. Auch der Rückhalt von gelösten Stoffen steigt durch Verdunstung, Aufnahme in Organismen oder Adsorption. Der längere Aufenthalt des Wassers und die vergrößerte Grenzschicht zwischen Wasser und Luft begünstigen das Entweichen übersättigter Kohlensäure und hierüber die Ausfällung gelöster Stoffe. Um den Stoffrückhalt dauerhaft hoch zu halten, sollte so weit wie möglich eine Bewirtschaftung von Retentionsbereichen angestrebt werden. Denkbar wäre zum Beispiel die Erzeugung von regenerativen Energie- und Rohstoffträgern in künstlichen Feuchtgebieten.

Die an die Retentionsbereiche angrenzenden, höher gelegenen Standorte am Hang sind für die intensive Nahrungsmittelproduktion geeignet, z.B. in Form des Getreide- oder Gemüseanbaus. Zur optimalen Schließung der Stoffkreisläufe sollte jedoch eine Rückführung mineralstoffreicher Klarwässer aus Kläranlagen und so weit wie möglich auch der Klärschlämme in diese intensiv genutzten und daher stoffaustragsgefährdeten Bereiche erfolgen (Kreislaufwirtschaft).

Die Verteilung der Siedlungen und ihrer Ver- und Entsorgungsstrukturen in der Fläche sollte sich an der Möglichkeit der kleinräumigen Kreislaufführung von Stoffen (z.B. der Rückführung von Klarwasser) orientieren. Da kleinräumige Stoffkreisläufe nur minimale Transportwege zwischen den produzierenden und konsumierenden Bereichen erfordern, bedingt eine nachhaltige Bewirtschaftung zugleich eine Dezentralisierung von Siedlungsstrukturen. Ein Teil der Lebensmittel sollte außerdem unabhängig von den natürlichen Standortbedingungen in Gewächshauskulturen



in unmittelbarer Nähe der Siedlungen unter optimaler Kontrolle der Wärme, sowie der Wasser- und Stoffkreisläufe erzeugt werden.

### **3.2 Steuerung auf der Grundlage eines Landschaftsmonitorings**

Zur Optimierung des landschaftlichen Wirkungsgrades ist ein Monitoring erforderlich, das auf der Grundlage eines hinreichenden Verständnisses der Ökosystemfunktionen eine integrative Steuerung zentraler Prozesse mit dem Ziel der Wirkungsgradsteigerung unterstützt. An ein Monitoring, das den landschaftlichen Wirkungsgrad erfasst, sind folgende grundsätzliche Anforderungen zu stellen:

- Der Wirkungsgrad beschreibt die Effizienz bei dem über das Wasser erfolgenden Energieumsatz in Ökosystemen. Betrachtet wird dabei das funktionale Zusammenwirken der Bereiche Boden, Organismen, Klima und Wasser. Der Wirkungsgrad kann sinnvoll nur über eine Flächenanalyse ermittelt werden. Das Monitoringsystem ermöglicht daher eine Rückkopplung zwischen der Flächenbewirtschaftung und dem erzielten Wirkungsgrad.
- Der landschaftliche Wirkungsgrad kann als stofflicher (= chemischer) und thermischer Wirkungsgrad beschrieben werden. Zur Erfassung des Wirkungsgrades von Einzugsgebieten ist eine Beschränkung auf wenige wesentliche Parameter erforderlich, die unaufwändig in räumlich oder zeitlich hoch aufgelöstem Raster erhoben werden können. Zur Abschätzung des stofflichen Wirkungsgrades sind automatische Messsonden der elektrischen Leitfähigkeit in den Fließgewässern mit mehreren Messungen pro Tag geeignet. Sie ermöglichen in Kombination mit einer Abflussmessung die Abschätzung der stofflichen Verluste gelöster Mineralstoffe. Eine Abschätzung des thermischen Wirkungsgrades ermöglichen Satellitenbilder des thermischen Infrarotkanals.

Der landschaftliche Wirkungsgrad bewertet somit nicht sektoriell einzelne Umweltparameter, sondern ist ein Summenparameter für die Systemfunktion, der die Effizienz der Prozesskopplungen zwischen den Bereichen Boden, Wasser, Klima und Organismen widerspiegelt. Eine solche Betrachtung könnte gerade aufgrund der funktionalen Herangehensweise dazu dienen, eine „Optimierung der Schnittstellenbetrachtung zwischen den Umweltsektoren“ statt einer „Intensivierung der sektoriellen Betrachtung im Rahmen schutzgutbezogener Ansätze“ zu forcieren.

## **4 Schlussfolgerungen**

Über den energetischen Ansatz einer Wirkungsgradbetrachtung, der Strukturen auf Grundlage ihrer Funktionen bewertet („form follows function“), können zentrale Prozessabläufe in Ökosystemen erklärt und auch der Begriff der Nachhaltigkeit aus naturwissenschaftlicher Sicht schärfer gefasst werden. Nachhaltig sind jene Strukturen, die sich bei hohem Energieumsatz durch Kreisprozesse und Temperatúrausgleich selbst stabilisieren. Im Gegensatz zu einer strukturellen Betrachtung, wie es z.B. im Rahmen des Artenschutzes der Fall ist, werden Strukturen auf der Grundlage eines dynamischen Systemverständnisses vor allem im Hinblick auf ihre funktionalen Wechselwirkungen beschrieben.

Zusammenfassend stellt der Wirkungsgrad von Ökosystemen, betrachtet auf der Ebene von Wassereinzugsgebieten, einen übergeordneten, abgeleiteten Systemindikator dar. Über ihn könnte die von Luhmann (1986) geforderte vermehrte „Eingriffskompetenz“ technischer Eingriffe in die Natur verbessert werden und hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Nachhaltigkeit der Landschaft und ihrer Bewirtschaftung bewertet werden. Der Wirkungsgrad kann als das Kriterium angesehen werden, über den die „eigene Rückbetreffenheit“ (Luhmann 1986), also ökologische Gefährdung oder Nutzen von Maßnahmen, von der Gesellschaft bewertet und entsprechend verringert oder ausgeweitet werden können.

Für die Entwicklung umfassender Kenntnisse über den Wirkungsgrad von Ökosystemen, der als Kriterium für die Effizienz ihrer Funktion dienen kann, besteht weiterer Forschungsbedarf. Diese Forschung sollte sich auch mit der hierarchisch übergeordneten Fragestellung nach der intakten bzw. degradierten Systemfunktion und der Steuerung dieser Systemfunktion durch die Gesellschaft auseinandersetzen. Zu klären wäre beispielsweise, auf welchem Weg die natürliche, in Ökosystemen erkennbare Strategie der Nachhaltigkeitssteigerung durch kleinräumige, „dezentrale Kreislaufführung“ auch auf die menschliche Gesellschaft, unter anderem mit Hilfe der Einführung geeigneter ökonomischer Steuerungsinstrumente, übertragen werden kann (Ripl *et al.* 2002). Zu hinterfragen wäre hierbei insbesondere, ob für eine funktionierende Zielsteuerung in Richtung „Nachhaltigkeit“ nicht die heutige Wachstumsstrategie der Volkswirtschaft wenigstens im Bereich der Versorgung mit Massengütern, wie z.B. Lebensmitteln, Energieträgern und regenerative Rohstoffen, sowie im Bereich der Entsorgung in eine Gleichgewichtsstrategie (Kreislaufwirtschaft) überführt werden müsste. Hierdurch würde der primäre Sektor (Landwirtschaft) wieder regionalisiert werden und hätte ökonomische Entwicklungschancen, die er im Laufe der industriellen und postindustriellen Phase durch den sekundären (Industrie) und den tertiären Sektor (Dienstleistungen) verloren hat (Scheer 2003). Die Ausbildung dezentraler Ver- und Entsorgungsstrukturen zur Optimierung der „natürlichen Funktionalität“ würde zugleich im Hinblick auf die Bereitstellung von Subsistenzprodukten (Wasser, Nahrung, Energie) einen neuen gesellschaftlichen Stellenwert erreichen, so dass im Ergebnis hierüber eine nachhaltige Entwicklung unserer Gesellschaft initiiert werden könnte, bei der ökologische und gesellschaftliche Belange vermehrt im Einklang zueinander stehen.

## **Zusammenfassung**

Natur und Landschaft funktionieren heute nicht nachhaltig. Ein thermodynamisch fundiertes Maß für eine hohe Nachhaltigkeit sind geringe Verluste der Nutstoffe (Nähr- und Mineralstoffe) mit den Fließgewässern. Die heutigen hohen Stoffverluste laugen einerseits die Böden aus, andererseits wirken sie eutrophierend auf alle Gewässer. Ziel eines nachhaltigen Landschaftswasserhaushaltes ist es, die Wasser- und Stoffretention in der Landschaft zu steigern und so eine langfristige (nachhaltige) Nutzbarkeit und Lebensdauer der Ökosysteme zu gewährleisten.

Hierzu können die Flächenbewirtschafter durch wasser- und stoffrückhaltende Formen der Landnutzung beitragen (u.a. Agroforstwirtschaft, künstliche Feuchtgebiete als biomasse- und energieproduzierende Felder). Wenn so mehr Wasser im Boden gespeichert wird, nimmt der kleinräumige Wasserkreislauf in der Landschaft zu (lokale Verdunstungs-Kondensations-Zyklen), wodurch Stoffe vermehrt in der

Biomasse fixiert werden und nicht mit dem Sickerwasser verloren gehen. Für die Landbewirtschaftung ergeben sich folgende neue gesellschaftliche Aufgaben:

- die Bereitstellung von Trinkwasser aus Oberflächenwasser in ausreichender Menge und Qualität,
- die Erzeugung von regenerativen Energieträgern aus nachhaltig bewirtschafteten Biomassefeldern,
- das Nutstoffrecycling aus organischen Reststoffen und geeignetem Brauchwasser zum Bodenaufbau,
- die Stabilisierung des Regionalklimas (gleichmäßigere Temperaturverteilung) als Folge der verbesserten Wasserspeicherung in der Landschaft.

Über den Wasserhaushalt können folgende Indikatoren für die Funktionsfähigkeit der Landschaft (landschaftlicher Wirkungsgrad) abgeleitet werden: 1. eine gleichmäßige Temperaturverteilung (sie spiegelt das Vorhandensein kleinräumiger, die Temperaturextreme dämpfenden Wasserzyklen wider) (thermischer Wirkungsgrad), 2. die aus den Einzugsgebieten irreversibel zum Meer transportierten Stoffe bzw. Ionen (sie kennzeichnen das Ausmaß der "Öffnung" der kleinräumigen Wasser- und Stoffzyklen) (chemischer Wirkungsgrad).

#### **Literatur**

- Benndorf J (2001) Einleitung. Strategiepapier zur Wasserforschung. Denkschrift. Entwurf Stand 25.09.2001. Zuarbeit und Kommentare: Roth K, Rippl W, Wolter K-D, Stückrath T, Meyer E, Ernst EM, Schmitz G, Jirka G, Kinzelbach W, Wohnlich S, Gräber PW, Ostrowski M, Rieg A, Aurada D. DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft, Dresden. Manuskript, 6 p
- Benndorf J (2003) Einführung. In: Deutsche Forschungsgemeinschaft (Hrsg.): Wasserforschung im Spannungsfeld zwischen Gegenwartsbewältigung und Zukunftssicherung. Denkschrift. Wiley-VCH, Weinheim, pp 5-13
- Falkenmark M, Andersson L, Castensson R, Sundblad K, Batchelor C, Gardiner J, Lyle C, Peters N, Pettersen B, Quinn P, Rockström J, Yapijakis C (1999) Water, a reflection of land use. Swedish Natural Science Research Council, Stockholm. 128 p
- Hildmann C (1999) Temperaturen in Zönosen als Indikatoren zur Prozeßanalyse und zur Bestimmung des Wirkungsgrades. Energiedissipation und beschleunigte Alterung der Landschaft. Dissertation Technische Universität Berlin, FB Umwelt und Gesellschaft. D 83. Mensch & Buch, Berlin. 294 p
- Kay JJ (1984) Self-organization in living systems. Ph.D. Thesis, Systems Design Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario. 458 p
- Luhmann N (1986) Ökologische Kommunikation. Kann die moderne Gesellschaft sich auf ökologische Gefährdungen einstellen? Westdeutscher Verlag, Opladen. 275 p
- O'Neill RV (2001) Is it time to bury the ecosystem concept? (With full military honors, of course!). Ecology 82(12): 3275-3284
- Odum EP (1969) The strategy of ecosystem development. Science 164: 262-270
- Odum EP (1999) Ökologie. Grundlagen, Standorte, Anwendung. 3. Auflage. Thieme, Stuttgart. 471 p

- Peters RH (1990) Pathologies in limnology. In: de Bernardi R, Giussani G, Barbanti L (eds): Scientific perspectives in theoretical and applied limnology. Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia Dott. Marco de Marchi 47: 181-217
- Pfadenhauer J, Ganzert C (1992) Konzept einer integrierten Naturschutzstrategie im Agrarraum. In: Pfadenhauer J, Ganzert C, Heißenhuber A, Hofmann H, Ahrens H: Untersuchung zur Definition und Quantifizierung von landespflegerischen Leistungen der Landwirtschaft nach ökologischen und ökonomischen Kriterien und ihre Umsetzung in Umweltberatung und Agrarpolitik. Vorstudie im Auftrage des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen. Umwelt und Entwicklung Bayern. Materialien 84. pp 5-50
- Ripl W (1992) Management of water cycle: An approach to Urban Ecology. Water Pollution Research Journal of Canada 27(2): 221-237
- Ripl W (1995) Management of water cycle and energy flow for ecosystem control: the energy-transport-reaction (ETR) model. Ecological Modelling 78: 61-76
- Ripl W, Janssen T, Hildmann C, Otto I (1996) Entwicklung eines Land-Gewässer Bewirtschaftungskonzeptes zur Senkung von Stoffverlusten an Gewässer (Stör-Projekt I und II). In Zusammenarbeit mit Trillitzsch F, Backhaus R, Blume HP, Widmoser P. Im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) und des Landesamtes für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein. Förderkennzeichen 0339310A und 0339538. Endbericht. 203 p + Anhang
- Ripl W, Petersen H, Gerlach I, Peickert U, Schmalstieg F (2002) Integratives Energie-, Wasser- und Stoffstrommanagement für dezentrale, autarke Ver- und Entsorgungsstrukturen. BIODROM. Machbarkeitsstudie. Technische Universität Berlin, Systeminstitut Aqua Terra, Naturschutzhof Brodowin, NaturhausArchitekten Berlin, IGEA - Ingenieurgesellschaft für Erschließungs- und Anlagen-Planung mbH. Im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Manuskript. 84 p
- Ripl W, Wolter K-D (2002) Chapter 11: Ecosystem function and degradation. In: Williams PJ le B, Thomas DR, Reynolds CS (eds): Phytoplankton productivity. Carbon assimilation in marine and freshwater ecosystems. Blackwell, Oxford, pp 291-317
- Scheer H (2003) Die primäre Wirtschaft wird wieder primär. 1. Aachener Anwenderforum für Bioenergienutzung in Stadt und Region, 28.-29.04.2003, Aachen. Eurosolar. <http://www.eurosolar.org/new/de/downloads/ScheerdoKopie.pdf> (15.10.2003)
- Schneider ED, Kay JJ (1997) 12. Ordnung aus Unordnung: Die Thermodynamik der Komplexität in der Biologie. In: Murphy MP, O'Neill LAJ (eds): Was ist Leben? Die Zukunft der Biologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, pp 183-196

**Autor:**

Dr. Klaus-Dieter Wolter  
 Systeminstitut Aqua Terra (SAT) e.V.  
 c/o Technische Universität Berlin  
 Hellriegelstr. 6  
 D-14195 Berlin

<http://www.aquaterra-berlin.de>

Email: [KD.Wolter@tu-berlin.de](mailto:KD.Wolter@tu-berlin.de)