

11. Schlussfolgerungen und Ausblick

Aus den zuvor dargestellten Untersuchungsergebnissen geht hervor, dass die Zielstellung des Vorhabens insgesamt erreicht wurde. Schwerpunkte der Untersuchungen waren die dynamische Simulation von Wasser- und Stoffhaushaltsgrößen in meso- und makroskaligen Einzugsgebieten der Elbe, die großräumige Quantifizierung von Nährstoffeinträgen und –frachten in den Teilgebieten und im Gesamtgebiet der Elbe, Szenarioanalysen hinsichtlich der Auswirkungen von Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen sowie die Entwicklung von Ansätzen zur Regionalisierung und Integration von Forschungsergebnissen. Die Hauptergebnisse dieser Analysen sowie der sich daraus ergebende weitere Forschungsbedarf können wie folgt zusammengefasst werden:

- 1) Die mit ARC/EGMO durchgeführten Simulationen des Wasserhaushaltes in einer Vielzahl mesoskaliger Teilgebiete der Elbe haben die Eignung des Modells für eine flexible Nachbildung unterschiedlichster hydrologischer Situationen bewiesen. Sie bilden die Voraussetzung für weitergehende Szenarioanalysen. Zusammen mit Simulationen, die mit HBV durchgeführt wurden, konnte für 25 Teilgebiete eine dynamische Quantifizierung von Abflusskomponenten realisiert werden. Trotz unterschiedlicher Modellkonzepte zur Abflussbildung zeigte der Vergleich langjähriger Mittelwerte des simulierten Basisabflusses zwischen beiden Modellen gute Übereinstimmung, was die Plausibilität der Resultate bekräftigte. Diese Ergebnisse bildeten die Basis für eine elbweite Regionalisierung des Basisabflussindex.
- 2) Die dynamischen gekoppelten Analysen von Wasser- und Stoffhaushalt mit SWIM demonstrierten die Fähigkeit des Modells, Stickstoff- und Sedimentfrachten für mesoskalige Gebiete auf der Basis des gewählten „Robusten Ansatzes“ plausibel nachzubilden. Die Untersuchungen für das Saalegebiet haben gezeigt, dass auch für große Gebiete flächendeckende Aussagen zum Stickstoffaustrag aus der Wurzelzone mit prozess-orientierten Simulationen möglich sind. Die Ergebnisse der Variantenrechnungen demonstrieren die Sensitivität des N-Austrages in Abhängigkeit von den Faktoren Boden, Klima und Bewirtschaftung. Als ein wichtiges Ergebnis kann folgende Reihenfolge der relativen Bedeutung der Faktoren für den Stickstoffaustrag angegeben werden: 1. Boden, 2. Klima, 3. Düngung, 4. Fruchtfolge. Daraus folgt für eine mögliche Beeinflussung durch Landnutzungs- bzw. Bewirtschaftungsänderungen, dass Änderungen bezüglich der Standorte landwirtschaftlicher Aktivitäten mehr Einfluss haben können als Intensitätsänderungen. Gleichzeitig stellen die Ergebnisse dieser Untersuchung auch eine einfache Regionalisierungsmöglichkeit des N-Austrages dar und bilden die Basis für eine weitergehende dynamische Regionalisierung auf Basis eines Fuzzy-Modells.
- 3) Die mit ARC/EGMO und SWIM durchgeführten Szenarioanalysen hatten primär die Untersuchung des Einflusses von Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt in verschiedenen meso- und makroskaligen Gebieten zum Ziel. Im einzelnen wurden die Auswirkungen folgender Prozesse untersucht: die zunehmende Urbanisierung, die Umwandlung von Ackerland in Wiese und Wald, die Wiedervernässung von drainierten Flussauen, die Einführung eines erhöhten temporären Brachlandanteils (Grasbrache; „set-aside“) in den Fruchtfolgen auf landwirtschaftlichen Flächen und die Einführung von Flusskorridoren. Insgesamt wurde klar, dass nur Änderungen, die einen großen Flächenanteil betrafen und/oder deutlich das Bodenfeuchteregime beeinflussten, signifikante Auswirkungen auf den Wasserhaushalt haben. Dies betraf das Auenszenario für die Havel, das Waldszenario für Saale und Havel, die Einführung der Flusskorridore und die Erhöhung des Brachlandanteils in den Fruchtfolgen um 30-40% auf landwirtschaftlichen Flächen (Szenario D). Von Bedeutung ist, dass nur durch das „Brache-Szenario“ eine Erhöhung der Wasserverfügbarkeit erreicht wird, während alle anderen Szenarien zu einer erhöhten Verdunstung und zu verminderten Grundwasserneubildung führten, was in Wassermangelgebieten problematisch ist. Im Gegensatz dazu sind hinsichtlich des Stoffhaushaltes durch die vorgenannten Szenarien positive Effekte zu erwarten. Dies muss jedoch durch zukünftige Untersuchungen noch untersetzt und überprüft werden.
- 4) Für 37 verschiedene Teileinzugsgebiete der Elbe wurden mit MONERIS die Nährstoffeinträge (Stickstoff und Phosphor) für die Zeiträume 1983-1987 und 1993-1997 quantifiziert. Das Mo-

dell erlaubt die Abschätzung der Einträge für diffuse und Punktquellen nach einer einheitlichen Methodik unter Berücksichtigung von insgesamt 7 Eintragspfaden. Die gesamten Stickstoffeinträge in die deutschen Teile des Elbeinzugsgebietes lagen im Zeitraum 1993-1997 bei 260 kt N/a und verminderten sich gegenüber dem Vergleichszeitraum 1983-1987 um 93 kt N/a bzw. 26%. Die gesamten Phosphoreinträge in das deutsche Flussgebiet der Elbe betragen im Zeitraum 1993-1997 ca. 12,4 kt P/a. Gegenüber dem Vergleichszeitraum wurden die Phosphoreinträge um ca. 15,8 kt P/a bzw. 56% reduziert. Der Reduktion der Frachten von Stickstoff und Phosphor in den Flüssen ist ähnlich der bei den Einträgen, nämlich 27% bei Stickstoff und 54% bei Phosphor. Damit wird klar, dass die Zielstellung einer 50%-igen Reduzierung der Nährstoffeinträge in die Nordsee von 1985 bis 1995 nur für den Phosphor, nicht aber für den Stickstoff erreicht werden konnte. Erste Szenarioberechnungen zeigen, dass allein auf der Basis von weiteren eintragsmindernden Maßnahmen bei den punktuellen und diffusen Einträgen für Stickstoff mittelfristig die Zielstellung einer Reduzierung der Einträge in die Nord- und Ostsee um 50% nicht erreicht werden kann. Zusätzliche Maßnahmen zur Erhöhung der gewässerinternen bzw. gewässernahen Stickstoffrückhalte und -verluste sind für die Erreichung der Zielstellung unbedingt erforderlich. Hierzu müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

- 5) Bezüglich der Nährstoffrückhalte und -verluste in den Flusssystemen wurde in MONERIS ein Submodell implementiert, das in einer für alle Flussgebiete anwendbaren, verallgemeinerten Beziehung zwischen den Nährstoffrückhalten und -verlusten in den Oberflächengewässern und der hydraulischen Belastung bzw. den spezifischen Abflussspenden des Flusssystems besteht. Dadurch werden die Ermittlung der Nährstofffrachten aus den Nährstoffeinträgen in einem Flussgebiet und somit auch ein direkter Vergleich mit den aus Güte- und Abflussmessungen berechenbaren Nährstofffrachten möglich. Berücksichtigt man den zum Teil noch nicht befriedigenden Stand bei den Datengrundlagen und Modellen zur Berechnung der Nährstoffeinträge sowie mögliche Fehler bei den Frachtermittlungen, so kann man davon ausgehen, dass mit dem Modellsystem MONERIS die Stickstofffrachten für die Mehrzahl der Flussgebiete mit einem Fehler von weniger als 30% und die Phosphorfrachten mit einem Fehler von weniger als 50% berechnet werden können. Generell gilt, dass diese Fehler für größere Flussgebiete abnehmen.
- 6) Als Basis für eine weiterführende Regionalisierung und zur Abschätzung von Modellunsicherheiten wurden mit den Modellen SWIM, CANDY, HERMES und MINERVA abgestimmte Simulationsexperimente für das Elbegebiet durchgeführt. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass die Simulation des Stickstoffhaushaltes viele Freiheitsgrade zulässt und zu deutlich unterschiedlichen Resultaten führen kann. Die Ergebnisse demonstrieren weiter, dass es zur Reduzierung der Unsicherheiten angebracht ist, mehrere Modelle parallel für die Simulation von N-Austrägen einzusetzen und anschließend deren Ergebnisse mit geeigneten Methoden zu integrieren bzw. zu verallgemeinern. Über die abschließenden Ergebnisse der Simulationsexperimente sowie eine anschließende Integration und Regionalisierung auf Basis eines Fuzzy Modells wird an anderer Stelle berichtet werden.
- 7) Zur quantitativen Verallgemeinerung und Integration der Forschungsergebnisse wird ein sogenanntes Metamodell vorgeschlagen, welches basierend auf den Ergebnissen von Prozessmodellen und Expertenwissen eine generalisierte Modellierung multipler Indikatoren von Wasser- und Stoffhaushalt für große Gebiete ermöglicht. Es wurden drei Metamodelltools entwickelt und erfolgreich getestet: ein einfaches Modell für den vertikalen Wasserhaushalt (VWB), ein Fuzzy-Modell zur Regionalisierung des N-Austrages von landwirtschaftlichen Flächen und ein Regressionsansatz zur großräumigen Schätzung von mittleren Abflusskomponenten. Die Entwicklung und Testung dieser drei Metamodelltools basierte auf den Simulationsergebnissen der Modelle ARC/EGMO, HBV, SWIM, CANDY und HERMES. Die bereitgestellten Tools sind so konzipiert, dass eine relativ einfache Implementierung in diverse Decision Support Systeme gewährleistet ist. Für die komplette Simulation von Wasser- und Stoffhaushalt (Stickstoff und Phosphor) mit dem Metamodell sind jedoch weitere Tools zu entwickeln (z.B. N-Austrag von nichtlandwirtschaftlichen Flächen, N-Retention auf den Fließwegen zum und im Gewässer, Erosion, Phosphor, etc.). Grundsätzlich hat sich die Strategie zur Ergebnisintegration über Simulationsexperimente bewährt und kann für weiterführende Arbeiten empfohlen werden.

Zukünftige Untersuchungen sind insbesondere notwendig zur Analyse und Modellierung lateraler Abfluss- und Stoffretentionsprozesse, zur Modellierung von Phosphorhaushalt und Erosion sowie zur großräumigen Regionalisierung vorgenannter Prozesse. Es fehlen einfache integrierte Modelle, die unter Nutzung der vorliegenden Forschungsergebnisse einen effizienten und flexiblen Einsatz für praktische Fragestellungen (Decision Support) ermöglichen. Im Rahmen der Entwicklung solcher Systeme ist es zunehmend anzustreben, sozioökonomische Funktionalitäten zu implementieren.