

Stofftransport-Modellierung zur Bestimmung der potentiellen Einträge aus dem Wassereinzugsgebiet

Florian HOFFMANN, Stefan ZIMMERMANN und Arnulf MELZER

Zusammenfassung

Die Qualität von Gewässern wird entscheidend durch das Einzugsgebiet geprägt. Intensive landwirtschaftliche Nutzung hat häufig zu einer Eutrophierung der Gewässer geführt. Zur Ermittlung der Belastungsquellen und deren quantitativen Beschreibung ist eine Modellierung der Stoffflüsse im Einzugsgebiet sinnvoll. Diese dient als Grundlage zur Entwicklung von Maßnahmen, die sich dadurch präziser und effektiver gestalten lassen.

Der in diesem Projekt bearbeitete Hopfensee gehört zu den am stärksten nährstoffbelasteten Seen in Bayern. Probleme bereiten vor allem Phosphoreinträge aus diffusen Quellen. Um Maßnahmen zu deren Reduzierung treffen zu können wurde eine GIS-gestützte, flächenscharfe Modellierung vorgenommen. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf das Austragsgeschehen von Grünlandflächen gelegt.

Die quantitative Berechnung der Phosphorfrachten baut auf einer Simulation der Wasserflüsse auf. Durch aktuelle Forschungsergebnisse und Messungen lassen sich den einzelnen Wasserflüssen Nährstoffkonzentrationen zuweisen. Die mittels eines GIS berechneten Phosphorausträge werden in einer Gewässergefährdungskarte zusammengefasst, die als Grundlage für Umsetzungsmaßnahmen in der Landwirtschaft dient. Extensivierungsmaßnahmen und andere den Phosphoreintrag verringernde Maßnahmen können dadurch gezielter und effizienter als bisher umgesetzt werden. Die Validierung ergibt ein hohes Bestimmtheitsmaß der Regression zwischen den Messwerten und den Modellierungsergebnissen.

Aus hochauflösenden Fernerkundungsdaten gewonnene Informationen zur Landnutzung stellen einen wichtigen Eingabefaktor dar, durch den die Genauigkeit der Modellierung und damit die Aussagekraft für die Umsetzung gesteigert werden kann.

1. Einleitung

Die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) sieht eine Abschätzung der Belastung der Oberflächengewässer durch Stoffeinträge aus punktuellen und diffusen Quellen, sowie Maßnahmen zur Verminderung dieser Einträge vor. Bisherige Modell- und Bilanzierungsmethoden bilden den Stoffaustrag unter Grünland gar nicht oder nur sehr stark vereinfacht ab. Da aber in den Einzugsgebieten vieler Voralpenseen überwiegend Grünlandnutzung betrieben wird, ist es notwendig genau diesen Nährstoffeintragspfad zu bewerten.

Bei der Eutrophierung von Seen ist vor allem Phosphor relevant, so dass man sich bei der Modellierung auf diesen beschränken kann. Um Maßnahmen zur Verringerung der Phosphoreinträge treffen zu können, müssen die diffusen Quellen und ihre räumliche

Verbreitung möglichst quantitativ berechnet werden. Die Belastung eines Gewässers bestimmt sich zum einen aus der natürlichen Beschaffenheit seines Einzugsgebietes und dessen anthropogener Nutzung. Die Intensität der landwirtschaftlichen Nutzung, die zu keiner negativen Veränderung des Gewässersystems führt, wird durch die morphometrische Beschaffenheit des Gewässers bestimmt und wird her durch den Berechnungsansatz von VOLLENWEIDER & KERKES (1982) bestimmt.

Am Beispiel des Hopfensees wurde in Zusammenarbeit mit dem Wasserwirtschaftsamt (WWA) Kempten eine Modellierung der Phosphoreinträge durchgeführt. Da in der Vergangenheit durch Maßnahmen die punktuellen Nährstoffeinträge schon weitgehend reduziert werden konnten, kommen für die weiterhin hohen Phosphoreinträge vor allem die diffusen Quellen in Frage. Da die landwirtschaftliche Nutzung im Einzugsgebiet zu 100% aus Grünlandnutzung besteht, wurde vom Modellierungsansatz eine flächig differenzierte Berechnung des Phosphoraustrages auf Grünlandflächen gefordert.

Der bei Füssen im Allgäu gelegene Hopfensee hat ein Einzugsgebiet von 3322 ha, wovon 2191 ha landwirtschaftlich als Grünland genutzt werden. Mit 192 ha Seefläche, einer geringen mittleren Tiefe und einer Wassererneuerungszeit von 127 Tagen, reagiert der Hopfensee sehr empfindlich auf die eingetragenen Phosphorfrachten.

2. Berechnungsansatz

Für die Berechnung der Wasserflüsse und der Phosphorfrachten in einem GIS waren möglichst präzise, digitale Datengrundlagen notwendig. Da die späteren Aussagen für den Maßstab 1:5000 getroffen werden sollten, wurden auch die Eingangsdaten in diesem Maßstab erhoben. Die benötigten Eingangsdaten sind in der Abbildung 1 zusammengefasst. Das Höhenmodell wurde aus den Höhenlinien der Flurkarte im Maßstab 1:5000 berechnet und entsprechend aufbereitet. Die Nutzungskartierung musste erstellt werden und wurde aufgrund von s/w Orthophotos und einer Geländebegehung aufgenommen. Daten zum Boden wurden aus der Reichsbodenschätzung übernommen und anhand von Werten aus AUERSWALD & SCHMIDT (1986) umgerechnet. Beim Gewässernetz

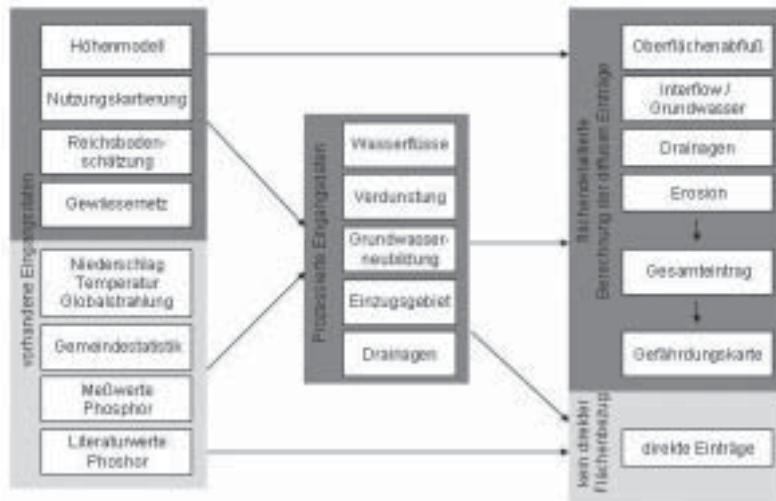


Abbildung 1

Ablaufschema der Modellierung des Phosphoreintrages in den Hopfensee

konnte auf eine sehr genaue Kartierung des Wasserwirtschaftsamtes Kempten zurückgegriffen werden, bei der neben den Fließgewässern und Gräben auch alle Drainageeinleitungen aufgenommen wurden.

Um die Phosphoreinträge quantitativ abschätzen zu können, wurde eine Modellierung der Wasserflüsse mit dem Programm WaSim-ETH (SCHULLA 1997) durchgeführt. Auf diesen Berechnungen aufbauend wurden die Phosphorfrachten für die Eintragspfade Oberflächenabfluss, Interflow, Grundwasser, Drainage und Erosion berechnet. Da hier Literaturdaten aus dem Alpenvorland und Messwerte aus dem Einzugsgebiet vorlagen, war eine flächig detaillierte Berechnung möglich. Für die Eintragspfade Direkteintrag durch Weidewirtschaft und Hofflächen sowie Kanalisation, lagen nur allgemeine Schätzwerte nach HAMM (1991) vor, so dass hier keine detaillierte flächenbezogene Modellierung vorgenommen werden konnte. Eine Berechnung fand als Mittelwert für das gesamte Einzugsgebiet statt.

Die Berechnung der Wasserflüsse erfolgte unter Linux mit dem Programm Wasim-ETH (SCHULLA 1997). Dabei wurde der Berechnungsansatz nach Penan-Moneith und das Bodenmodell nach dem Topodelansatz verwendet. Die Berechnung erfolgte aufbauend auf den Eingangsdaten Niederschlag, Temperatur, Globalstrahlung, Landnutzung und Bodenart. Die weitere Bearbeitung und Zuordnung der Phosphorfrachten erfolgte mit dem Spatial Analyst unter ArcGIS, wobei eine Rasterauflösung von 10 x 10 m verwendet wurde.

Für die Berechnung des Oberflächenabflusses wurden aktuelle im bayerischen Voralpenland gemessene Phosphor-Frachten (POMMER ET AL. 2000) mit den berechneten Wasserflüssen multipliziert. Oberflächenabfluss tritt nur nach langanhaltenden Niederschlägen oder Starkregenereignissen auf, so dass nur ca. 7% der Niederschlagsmenge abzüglich Verdunstung als Oberflächenabfluss in die Gewässer gelan-

gen. Da Oberflächenabfluss nur auf geneigten Flächen auftritt (SCHMIDT & PRASUHN 2000) wurden nur die Flächen mit einer Hangneigung größer 3% ausgewählt.

Die Berechnung des Phosphoraustrages über die Austragspfade Interflow und Grundwasser erfolgte nach dem Ansatz von RINGER & STREBEL (1980). Als wichtige Grundlage hierfür diente die anhand der Wasserflüsse berechnete Grundwasserneubildungsrate.

Zur Berechnung der Phosphorfrachten aus den drainierten Flächen standen neben einer genauen Kartierung der Drainagegräben und -Einleiter auch Phosphorkonzentrationsmessungen aus dem Einzugsgebiet zur Verfügung. Um die Drainagen in die Modellierung mit einzubeziehen mussten die drainierten Flächen ermittelt werden. Dazu wurden zum einen ein Puffer von 25 m um die kartierten Drainagen gelegt und zum anderen aus dem Höhenmodell Flächen mit überdurchschnittlich viel Zuschusswasser aus der Umgebung ermittelt. Die so berechnete Fläche ergibt 485 ha, was 22% der Grünlandflächen darstellt. Da bei Drainagen in organischem Boden ein ca. dreimal so hoher Phosphoraustrag wie bei mineralischem Boden zu erwarten ist, wurden die berechneten Drainageflächen diesbezüglich ausgewählt.

Die Abschätzung des Bodenabtrages wurde analog zu der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG) (SCHWERTMANN ET AL. 1986) vorgenommen.

Die einzelnen Austragspfade werden zu einer Gesamtaustragskarte zusammengefasst und mit zu erwartenden Phosphorausträgen anderer von Ackerland geprägter Einzugsgebiete verglichen. Dabei ergibt sich im Vergleich zu von Ackerland dominierten Einzugsgebieten ein relativ geringer Phosphoraustrag.

Um den Phosphoraustrag bezüglich seines Gefährdungspotentials für den Hopfensee einzustufen wurde die zur Erreichung eines mesotrophen Zustandes akzeptable Phosphormenge nach VOLLENWEIDER

Tabelle 1

Zusammenstellung der Phosphoreinträge in den Hopfensee

| Eintragspfad | P-Gesamt in t/a EZG |
|--|---------------------|
| Kanalisation | 0,42 |
| Atmosphärische Deposition ins Gewässer | 0,08 |
| Waldsstreu | 0,05 |
| Direkteinträge von Hofflächen | 0,149 |
| Direkteinträge durch die Weidewirtschaft | 0,416 |
| Oberflächenabfluß / Abschwemmung | 0,131 |
| Interflow (Zwischenabfluß) | 0,55 |
| Grundwasserabfluß | 0,11 |
| Drainageabfluß | 0,635 |
| Erosion | 0,717 |

& KERKES (1982) berechnet. Diese liegt durch die morphometrische Ausprägung des Hopfensees mit 1200 kg/a sehr niedrig, so dass die siebenstufige Gefährdungskarte viele Flächen mit Handlungsbedarf ausweist.

3. Ergebnisse

Die Berechnung der Phosphoreinträge ergibt eine Gesamtsumme von 3,258 t/a, was einem durchschnittlichen Phosphorausstrag von 0,98 kg/ha*a im Einzugsgebiet entspricht. Die Spanne der Phosphorausträge reicht dabei von 0,01 bis 4,5 kg/ha*a. Die Phosphorfrachten sind bezüglich Ihrer Eintragspfade in Tabelle 1 angegeben.

Die Gefährdungskarte grenzt die Maßnahmenbereiche sehr kleinflächig ab. Durch die exponentielle Einteilung der Skala tragen die als stark und sehr stark eingestuft Flächen überproportional zur Phosphorbelastung bei. Die mit einem Gefährdungspotential von stark und sehr stark eingestuft Flächen haben einen Anteil von 53% am Gesamtphosphorausstrag obwohl sie nur 23% der landwirtschaftlichen Flächen ausmachen. Auf diesen Flächen durchgeführte Maßnahmen versprechen eine besonders hohe Effektivität und können anhand der Detailkarten zu den Austragspfaden gezielt vorgenommen werden.

Eine Bewertung der einzelnen Eintragspfade lässt folgende Schlussfolgerungen bezüglich einer Maßnahmenplanung zu:

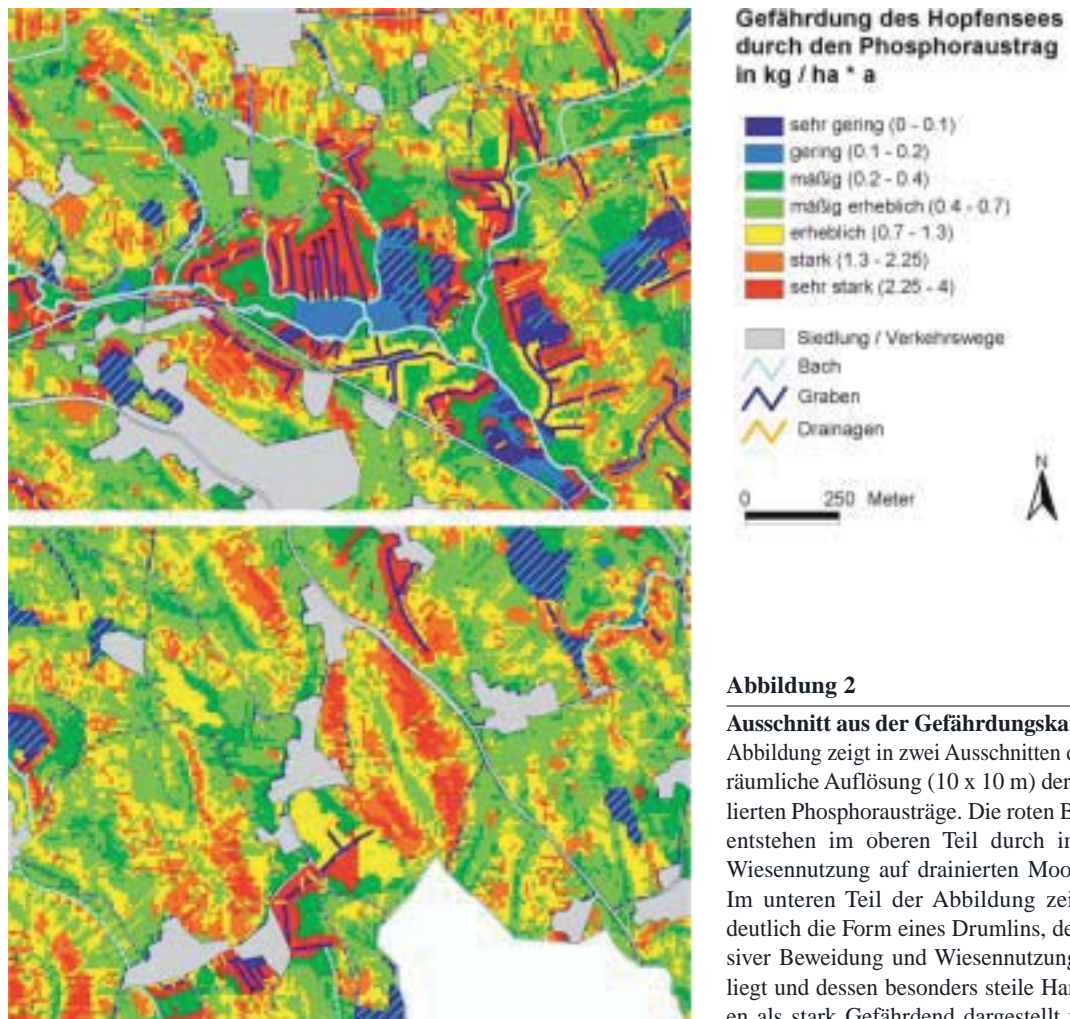


Abbildung 2

Ausschnitt aus der Gefährdungskarte. Die Abbildung zeigt in zwei Ausschnitten die hohe räumliche Auflösung (10 x 10 m) der modellierten Phosphorausträge. Die roten Bereiche entstehen im oberen Teil durch intensive Wiesennutzung auf drainierten Moorböden. Im unteren Teil der Abbildung zeigt sich deutlich die Form eines Drumlins, der intensiver Beweidung und Wiesennutzung unterliegt und dessen besonders steile Hangpartien als stark Gefährdend dargestellt werden.

- Kanalisation und Direkteinträge durch Weidewirtschaft sind mit 0,84 t/a sehr bedeutende Eintragspfade. Der Berechnungsansatz ist aber sehr allgemein und auch eine räumliche Zuordnung ist nur bedingt möglich, so dass hier nur sehr allgemeine Maßnahmenempfehlungen gegeben werden können
- Der Oberflächenabfluss spielt mit 4 % am Gesamteintrag eine untergeordnete Rolle
- Interflow und Grundwasser ist mit 20 % am Gesamteintrag sehr bedeutend, die Modellierung ergibt aber eine relativ gleichmäßige Verteilung über das Einzugsgebiet, so dass eine flächendetaillierte Formulierung von Maßnahmen auf dieser Grundlage nicht möglich ist
- Die bei der differenzierten Berechnung des Phosphoraustrages besonders durchschlagenden Faktoren sind die Drainagen und die Erosion. Diese sind mit 19 % und 22 % für das Gesamtergebnis sehr bedeutend und für die Formulierung von Maßnahmen besonders relevant

4. Validierung

Die Validierung erfolgte anhand von Messungen mittels Dauerprobennehmern und Schöpfproben. Bei den Dauerprobennehmern konnte die gemessene jährliche Phosphorfracht mit dem Modellierungsergebnis verglichen werden. Dies war für die Teileinzugsgebiete des Doldener Baches und der Hopfensee Achen möglich. Beim 2384 ha großen Einzugsgebiet der Hopfensee Achen ergibt die Modellberechnung mit 2735 kg/a eine um ca. 32% (4026 kg/a) zu niedrige Phosphorfracht. Die Abweichung vom Mittelwert der Messungen (690 kg/a) beim 698 ha großen Einzugsgebiet des Doldener Baches liegt bei 10% (757 kg/a). Die Messwerte am Doldener Bach wurden aber aufgrund des großen Schwankungsbereiches (435-945 kg/a) und der nur für 2 Jahre vorliegenden Messungen hier nicht weiter verwendet. Die Messungen an der Hopfensee Achen liegen dagegen seit 1997 bis heute konstant um die 4000 kg/a.

Ein direkter Vergleich zwischen den Schöpfproben und den Modellberechnungen ist nicht möglich, da

der Abfluss für die Teileinzugsgebiete nicht gemessen wurde. Für die Validierung (Abb. 3) wurde daher die Annahme getroffen, dass der Abfluss mit zunehmender Einzugsgebietsgröße linear zunimmt. Die gemessenen mittleren Phosphorkonzentrationen wurden dafür mit der Teileinzugsgebietsgröße in ha multipliziert. Dieser Wert wurde mit den für das entsprechende Teileinzugsgebiet berechneten Gesamt P-Austrag in kg/a verglichen. Dies ergab ein hohes Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,85$, so dass angenommen werden kann, dass das Modell die Phosphorausträge räumlich richtig verteilt berechnet.

5. Schlussfolgerungen

Die Berechnung von Phosphorausträgen unter Grünland stellt eine besondere Herausforderung dar, der momentan nur durch eine starke Vereinfachung und Verallgemeinerung durch die Modellierung Rechnung getragen werden kann. Gründe hierfür sind die starke Koppelung von Austragsvorgängen an Starkregenereignisse, die nicht mit vertretbarem Aufwand ermittelbare Düngeintensität von Grünlandflächen und das Fehlen von erprobten Modellen zur Abschätzung des Phosphoraustrages unter Grünland. Auch die Anwendung von Austragswerten und Berechnungsverfahren, die für andere Maßstabs- und Anwendungsbereiche – insbesondere Ackerland – entwickelt wurden, sind kritisch zu betrachten. Dies ist vor allem bei der Berechnung der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung der Fall, da diese nicht für Grünlandstandorte wie Weiden auf extrem steilen Lagen entwickelt wurde. Trotz dieser vielen Unsicherheiten bei den Eingangswerten und der Berechnung ergibt die Validierung eine gute Übereinstimmung. Diese lässt zudem die Schlussfolgerung zu, dass die Modellberechnung die Nährstoffaustragsquellen räumlich richtig verteilt (Schöpfproben), aber um ca. ein Drittel zu niedrig abschätzt (Dauerproben). Um das Modell noch zu verfeinern und den Gegebenheiten im Voralpenland noch besser anzupassen, sind Messkampagnen der einzelnen Austragspfade unter Grünland mit verschiedenen Nutzungen, Bodenarten und Hanglagen notwendig.

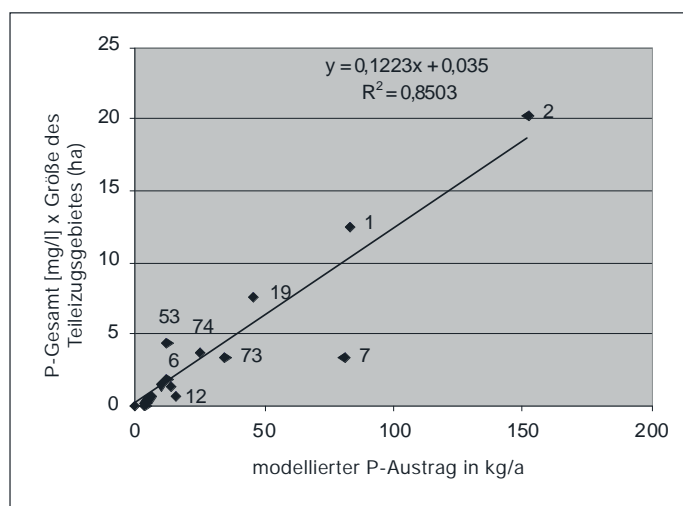


Abbildung 3
Validierung der Modellberechnung mit den Schöpfproben

Wie sinnvoll sich die Modellierungsergebnisse in Maßnahmen umsetzen und sich die sehr flächenscharf vorliegenden Einteilungen der Gefährdungstufen im Gelände nachvollziehbar wieder finden lassen, wird sich durch die momentan laufende Anwendung durch die Landwirtschaft noch zeigen. In einer engen Zusammenarbeit mit dem Amt für Landwirtschaft sollen die Ergebnisse der Modellierung noch verbessert werden. Dazu werden Informationen zu den Phosphorgehalten der Oberböden eingearbeitet. Auf der Grundlage dieser neuen Berechnung sollen dann in Zusammenarbeit mit den Landwirten Massnahmen zur Reduzierung der Phosphoreinträge getroffen werden.

6. Literatur

- AUERSWALD, K. & F. SCHMIDT (1986):
Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern, Karten zum flächenhaften Bodenabtrag durch Regen.– GLA Fachbericht Nr. 1, Herausgeber und Verlag des Bay. Geolog. Landesamtes
- HAMM, A., HSGB. (1991):
Studie über Wirkungen und Qualitätsziele von Nährstoffen in Fließgewässern.– Academia Verlag, Sankt Augustin.
- POMMER, G.; R. SCHRÖPEL & F. JORDAN (2001):
Austrag von Phosphor durch Oberflächenabfluß auf Grünland.– Wasser & Boden, 53/4, 34-38, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin
- RENGER, M. & O. STREBEL (1980):
Jährliche Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von Bodennutzung und Bodeneigenschaften.– Wasser und Boden 32(8), S.362-366

SCHMIDT, C. & PRASUHN, V. (2000):
GIS-gestützte Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Zürich. Schriftenreihe der FAL (35), Schweiz

SCHULLA, J. (1997):
Hydrologische Modellierung von Flußgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaveränderungen.– Diss. ETH 12018, Verlag Geographisches Institut ETH Zürich

SCHWERTMANN, U.; W. VOGL & M. KAINZ (1987):
Bodenerosion durch Wasser – Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen.– Stuttgart: Ulmer, 64 Seiten

VOLLENWEIDER, R. A. & J. KERKES (1982):
OECD cooperative programme for monitoring of inland waters (eutrophication control).– Synthesis Report, Paris

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing.(FH) Florian Hoffmann
Limnologische Station der TU München
Hofmark 1-3
82393 Iffeldorf
FH@geolim.de

Zum Titelbild: Das Bild zeigt ein Anwendungsbeispiel zur Kartierung von submersen Makrophyten im Flachwasserbereich um die Insel Reichenau (Bodensee). Vergleich der Prozessierungsergebnisse von DAEDALUS- Aufnahmen im Juli 2001 und 2002.

Spezielle MIP-Module korrigieren in dieser Anwendung den Einfluss der Wassersäule auf das Reflexionssignal, ermöglichen die Berechnung der Reflexionseigenschaften des Seegrundes und interpretieren diese Spektren dann als Mischsignal aus verschiedenen Sediment- oder Bewuchsklassen. Im Ergebnisbild werden Klassen von bodennahen Makrophyten (*Characeen*) in der Farbe grün, von hoch wachsenden Makrophyten (hier: hauptsächlich *Potamogeton perfoliatus* & *pectinatus*) in rot und unbedeckte Seegrund-Sedimente in blau dargestellt (siehe Beitrag HEEGE et al. S. 67-71).

Laufener Seminarbeiträge 2/03

Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

ISSN 0175 - 0852

ISBN 3-931175-71-5

Die Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege ist eine dem Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz angehörende Einrichtung.

Die mit dem Verfassernamen gekennzeichneten Beiträge geben nicht in jedem Fall die Meinung der Herausgeber wieder. Die Verfasser sind verantwortlich für die Richtigkeit der in ihren Beiträgen mitgeteilten Tatbestände.

Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen einzelnen Beiträge sind urheberrechtlich geschützt. jede Verwendung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der AutorInnen oder der Herausgeber ist unzulässig.

Schriftleitung und Redaktion: Dr. Notker Mallach (ANL, Ref. 12) in Zusammenarbeit mit Dr. Elisabeth Obermaier

Satz: Fa. Hans Bleicher, Laufen

Druck und Bindung: E. Grauer Offsetdruck, Laufen

Druck auf Recyclingpapier (100% Altpapier)