

Günter SCHLUNGBAUM; Uwe SELIG

Die Warnow - ein typischer norddeutscher Flachlandfluß und seine Bedeutung für den Nährstoffeintrag in die Ostsee

Abstract

The Warnow is a typical lowland river in Mecklenburg, northern Germany. The catchment area of the stream system were intensive used by agriculture. In the last five years the nutrient input were reduced about 24% by nitrogen and 26% by phosphorus. In the year 1991-94 an average of 5440 t nitrogen and 490 t phosphorus per year get into the river. More than 70% of the phosphorus input remain in the river. This part were accumulated in the sediment of the sees and impounded parts in the stream system. 50% of this phosphorus is available and can releases from the sediment. The potential of phosphorus releases were classified with a new classification system.

The results of the investigation are the basis of a restoration concept for the stream system. Follow possibilities were discussed: reduction of the point inputs, reduction of the diffus input, reduction and stabilization of the internal nutrient sources.

1 Die Warnow - Beschreibung des Untersuchungsgebietes

Die Warnow ist ein typisches Fließgewässer der mecklenburgischen Jungmoränenlandschaft. Entsprechend den geomorphologischen Gegebenheiten wechseln im ca. 3 200 km² großen Einzugsgebiet Fließstrecken, Durchbruchstäler und durchflossene Seen. Die Flüsse und Bäche der Grundmoräne sind aufgrund des geringen Gefälles durch niedrige Fließgeschwindigkeiten gekennzeichnet. Dadurch werden im Unterlauf ausgeprägte Rückstaubereiche erzeugt, die durch das regulierbare Wehr am Mühlendamm in Rostock noch verstärkt werden. Die Warnow entspringt bei 65 m NN im Grundmoränenboden der Seenplatte bei Grebbin (Raum Parchim) nahe der Wasserscheide zwischen Nord- und Ostsee und hat bis zum Barniner See (37 NN) ein Gefälle von 0,9 ‰. Nach der Passage des Sees durchfließt sie mit gleichem Gefälle die äußere Endmoräne in mehreren kleinen Durchbruchstälern. Von den drei nachfolgenden, ursprünglich durchflossenen Seen wurden im Zuge umfassender Ausbaumaßnahmen in den sechziger Jahren der Rummelborn- und Neddersee aus dem Hauptschluß genommen. Erhalten blieb der Mickowsee (15 m NN).

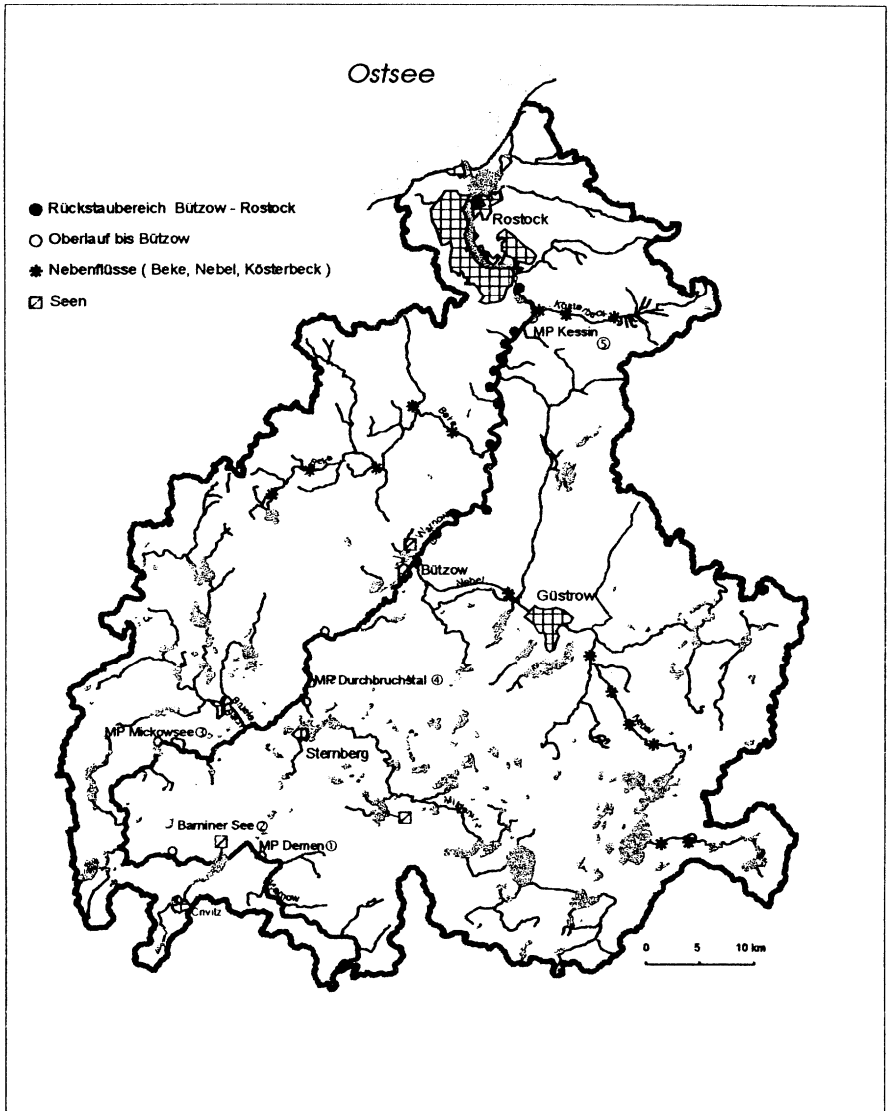


Abb. 1 Wassereinzugsgebiet der Warnow mit Meßpunkten erstellt durch R. Pivarci, Universität Rostock, Institut für Landschaftsplanung und Landschaftsökologie

Nach der Aufnahme des Brüeler Baches und der Mildnitz passiert die Warnow bei Groß Görnow ihr größtes und imposanteste Durchbruchstal. Flußabwärts folgt das Gletscherzungenbecken der Warnow. Unterhalb der Einmündung der Nebel bei Bützow verringert sich die Fließgeschwindigkeit aufgrund des minimalen Gefälles (0,1 ... 0,05 ‰). Der Charakter des Flusses ändert sich grundlegend. Er wird auf seinen letzten 38 km der insgesamt 149 km langen Fließstrecke bis Rostock zu einem rinnenseeähnlichen Gewässer mit einer durchschnittlichen Verweilzeit von 6 bis 8 Tagen. Das hier etwa 50 m breite Gewässer durchfließt ab Schwaan ein bis zu 750 m breites Durchströmungsmoor. Die Torfmächtigkeit beträgt bis zu 8 m. In der Stadt Schwaan mündet die Beke als letzter größerer Nebenfluß in die Warnow. Bis zum Mühlendammwehr schließen sich noch die kleineren Einzugsgebiete der Zarnow und der Kösterbeck an (Abb. 1).

Ab dem Mühlendammwehr in Rostock schließt sich der vom Brackwasser beeinflusste Bereich der Unterwarnow an. Nach weiteren 11,2 km (Fahrwasserachse) erreicht die Warnow bei Warnemünde ihre Mündung in die Ostsee. Die Unterwarnow wird in ihrer Wasserhaushaltsbilanz wesentlich durch den Austausch mit der Ostsee bestimmt. Der Wassergewinn setzt sich aus 60% Ostseewassereinstrom und 40% Oberwarnowzufluß zusammen, d.h. das Süßwasser der Oberwarnow wird in Richtung Ostsee mehr und mehr verdünnt. Für die in diesem Beitrag zu betrachtenden Nährstoffbilanzen wirkt dieser Effekt nur verdünnend. Die in Richtung Ostsee abfließenden Nährstoffmengen (Frachten) bleiben über die Zeit als Summe unbbeeinflusst.

2 Saprobie und Trophie zur Kennzeichnung der Wasserbeschaffenheit

Während die Nahrungsbeziehungen in stehenden Gewässern über Stoffkreisläufe geregelt werden, ist der Stoffhaushalt der Fließgewässer durch den einseitig gerichteten Abfluß von Stoffen und Energie gekennzeichnet. Die Land/Wasser-Wechselwirkungen sind in Fließgewässern in Abhängigkeit von der Strömung ausgeprägter gestaltet als für Seen. Für durchgängige Fließgewässer gilt nach dem Modell des RIVER CONTINUUM CONCEPT's von VANNOTE et al. (1980) eine typische - auch als "Alterung" bezeichnete - Längszonierung bei sich allmählich ändernden abiotischen Rahmenbedingungen mit sich einstellenden kontinuierlichen Veränderungen des biotischen Systems. Dieses Fließkontinuum gilt aufgrund der geomorphologischen Verhältnisse in Mecklenburg-Vorpommern für viele Flüsse nicht. So auch nicht für die Warnow. Viele Flüsse durchfließen die in hoher Zahl vorhandenen Seen. Das Durchfließen eines Sees ist ein abrupter Bruch in der Längszonierung der Fließgewässer. So ist ein in einen See einmündender Bach bei seinem Austritt aus diesem "sprunghaft gealtert". In Abhängigkeit von der Struktur und vom Fließverhalten im nachfolgenden Gewässerabschnitt kann dieser Prozeß schrittweise rückgängig gemacht, jedoch nie vollständig kompensiert werden. In diesem Prozeß spielen die unterschiedlichen Nährstoffanreicherungen eine wichtige Rolle.

Typische Fließgewässer werden nach der organischen Belastung und durch die davon beeinflussten Sauerstoffbedingungen charakterisiert. Das Vermögen über

Destruenten organische Belastungen abzubauen (Selbstreinigungsvermögen) wird einerseits durch Indikatororganismen (Saprobien) und/oder andererseits durch Leistungskriterien im Sauerstoffhaushalt angezeigt, z. B. Größe des Sauerstoffgehaltes und biogeochemischer Stoffbedarf. Im durchflossenen See oder im seeartig wirkenden Rückstaubereich überwiegen die Stoffaufbauprozesse (Trophie). So ergeben sich für diese Fließgewässer in der Längszonierung unterschiedliche und sich abwechselnde Bewertungsmaßstäbe:

- Saprobie = Intensität der heterotrophen Produktion, dargestellt durch die organische Belastung und die Intensität der zehrenden Prozesse im Sauerstoffhaushalt
- Trophie = Intensität der Primärproduktion, dargestellt durch die Nährstoffsituation und die Intensität der bildenden Prozesse für Sauerstoffhaushalt und Biomasse

In einem stabilen Ökosystem befinden sich Trophie und Saprobie in einem dynamischen Gleichgewicht, d. h. das Verhältnis von Primärproduktion (P) und Respiration (R) beträgt nahezu 1. Dieses wird u. a. durch die enge Verknüpfung der Organismen im Nahrungsgefüge gewährleistet. Nährstoffeinträge führen zu einem P/R-Verhältnis > 1 und Einträge von durch Mikroorganismen abbaubaren organischen Stoffen zu einem Verhältnis < 1 .

Hohe Stoffeinträge aus Kommunen und Landschaft haben die Warnow in der Vergangenheit zu einem hochbelasteten Flachlandfluß entwickelt. Sowohl punktuelle als auch diffuse Stoffeinträge haben diesen Prozeß gefördert.

Die Klassifizierung (= Beschreibung des Zustandes) der Warnow erfolgt auf der Basis einer vorläufigen Richtlinie zur Bewertung der Fließgewässer in Mecklenburg-Vorpommern. Grundlage dafür ist im wesentlichen der Sauerstoffhaushalt und die organische Belastung. Die Klassifikation erfolgt in fünf Beschaffenheitsstufen (vgl. Gewässergüteberichte 1993 und 1994). In Tabelle 1 wird die Beschaffenheitsentwicklung von 1989 bis 1994 für ausgewählte Abschnitte der Warnow und die wichtigsten Nebengewässer wiedergegeben.

Seit 1989 hat sich die Beschaffenheit der Fließgewässer in Mecklenburg-Vorpommern ständig verbessert (vgl. Tab. 2). Im Vergleich zur Tabelle 1 kann festgestellt werden, daß die Warnow gegenüber anderen Fließgewässersystemen die weitgehend besseren Ausgangsbedingungen aufwies.

Heute liegen ca. 70 % aller untersuchten Fließgewässer in Mecklenburg-Vorpommern in den Güteklassen 1 und 2, 1989 waren es ca. 40 %. Diese Entwicklung geht primär auf die konsequente Durchsetzung des Kläranlagenprogramms für die größeren Emissionspunkte zurück, aber auch Veränderungen in der Landnutzung zeichnen dafür verantwortlich. Wenn die Warnow im Oberlauf zwischen Bützow und Rostock (Rückstaubereich) in diesem Vergleich weitgehend konstant im Zustand der Güteklasse 3 geblieben ist (Tab. 1), ist das ihrem speziellen Charakter, der Ausbildung eines relativ langsam durchflossenen Rinnensees, zuzuschreiben. Hier hat unbedingt die Bewertung nach den Kriterien der Trophie zu erfolgen.

Tabelle 1 Klassifizierung der Warnow und ausgewählter Nebengewässer
 Basis: Vorläufige Richtlinie zur Klassifizierung der Wasserbeschaffenheit von Fließgewässern in Mecklenburg-Vorpommern nach dem Sauerstoffgehalt und der organischen Belastung
 Quelle: Gewässergütebericht 1993 und 1994

	1989	1990	1991	1992	1993	1994
1 Warnow						
- Kessin	3	3	3	4	3	3
- u. Schwaan	3	3	3	3	3	3
- b. Werle	3	3	3	3	3	3
- o. Bützow	2	3	3	2	2	2
- b. Warnow	2	2	2	2	1	2
- b. Gr. Görnow	-	2	2	2	2	2
- o. Weitendorf	2	2	3	2	2	2
- b. Gustävel	2	2	2	2	2	2
- b. Rönkendorf	3	3	3	3	3	3
- o. Floßgrabern	4	4	3	3	3	3
2 Kösterbeck						
- b. Kessin	2	2	2	2	2	2
3 Beke						
- b. Schwaan	3	3	2	2	2	2
- b. Gr. Belitz	3	2	2	1	2	2
4 Nebel						
- b. Wolken	3	2	3	2	2	2
- b. Wehr Kölln	1	1	1	1	1	1
- Alte Nebel	4	4	4	3	3	3
b. Wehr Wolken						
5 Mildnitz						
- b. Sternberger Burg	2	2	2	3	2	2
6 Brueler Bach						
- b. Sülten	2	3	2	2	2	2

Tabelle 2 Entwicklung der Wasserbeschaffenheit der Fließgewässer in Mecklenburg-Vorpommern im Zeitraum 1989 bis 1994 - Sauerstoff und organische Belastung. Quelle: Gewässergütebericht 1994 (1996)

	in %				
	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
1989	2,6	37,2	48,6	10,2	3,2
1993	5,0	48,6	33,2	2,5	1,2
1994	5,0	63,7	29,4	2,2	0,0

3 Nährstoffeinträge und Nährstoffbilanzen für das Flußsystem

BEHRENDT (1995) hat eine Abschätzung der Nährstoffemission für das Warnowinzugsgebiet einschließlich Rostock vorgelegt. Er bezieht diese Schätzung auf die folgende Einzugsgebietsstruktur:

- 4,3 % urbane Flächen
- 68,8 % landwirtschaftliche Nutzflächen (78,1 % Ackerland, 21,9 % Grünland)
- 22,7 % Waldfläche
- 4,3 % Wasserfläche.

Tabelle 3 Geschätzte Emissionen von Stickstoff und Phosphor für das gesamte Warnowflußgebiet für 1991-1994, nach BEHRENDT (1995)

Eintragspfad	Stickstoffeinträge		Phosphoreinträge	
	t N/a	%	t P/a	%
urbane Flächen	110	2,0	25	5,1
Erosion	140	2,6	108	22,0
Grundwasser	1030	18,9	36	10,0
Dränspende	2630	48,3	49	10,0
Deposition	250	4,6	10	2,0
Direkteintrag	120	2,2	29	5,9
Oberflächenabfluß	80	1,5	18	3,7
Summe diffuse Einträge	4360	80,1	275	56,1
Summe punktuelle Einträge	1080	19,9	215	43,9
Summe aller Einträge	5440	100,0	490	100,0

Für den Zeitraum 1991/94 ergeben sich die in Tabelle 3 angegebenen jährlichen Nährstoffemissionen. Mit 80,1 % beim Stickstoff und 56 % beim Phosphor überwiegen eindeutig die diffusen Pfade. Nimmt man aus der Betrachtung die Unterwarnow heraus und damit den punktuellen Eintrag aus der Kläranlage Rostock, so betragen die diffusen Anteile sogar 93,7% bzw. 85,6%. Diese für norddeutsche Flachlandflußsysteme typische Verteilung hat sich durch die Minderung des punktuellen Anteils (Kläranlagenprogramm) verschoben, war aber vorher nicht grundlegend anders. BEHRENDT (1995) bilanzierte für die Oberwarnow (Meßpunkt Kessin - siehe Abb. 1) folgende Verhältnisse:

	1985 - 1989 Anteil (%)		1991 - 1994 Anteil (%)	
	N	P	N	P
• diffuse Quellen	93,4	73,5	93,7	85,6
• punktuelle Quellen	6,6	26,5	6,3	14,4
Summe	100	100	100	100

Bei absoluten Rückgängen der Gewässerbelastung zwischen den o. g. untersuchten Zeiträumen für Stickstoff um 24 % und für Phosphor um 26 % haben sich die Anteile zwischen diffusen und punktuellen Einträgen für Stickstoff kaum verändert. Anders verhält sich der P-Anteil. Noch deutlicher zeigt sich dies an der Unterwarnow. Hier überwogen in der Gesamtnährstoffbilanz deutlich die punktuellen Einträge (Tab. 4). Schwerpunkt war hier bis zum Jahr 1996 der Klärwerksablauf in Rostock. Mit der Inbetriebnahme der neuen Klärwerkstechnologie im Herbst 1996 konnten die Nährstoffeinträge wesentlich gesenkt werden. Von bisher 800 t N/a bzw. 173 t P/a für den Bereich der Unterwarnow konnten diese Einträge auf ca. 100 t N/a bzw. ca. 70 t P/a reduziert werden (Mitteilung Eurawasser GmbH 1996). Damit werden die von HELCOM für 1998 vorgegebenen Werte für den Kläranlagenablauf bereits jetzt unterschritten. Damit verschieben sich die Bilanzwerte für die Gesamtwarnow weiter wesentlich zu den diffusen Quellen und dürften in der selben Größenordnung liegen, wie sie bereits für die Oberwarnow bilanziert wurden. Auf der Basis der Werte von BEHRENDT (1995) und von Eurawasser ergeben sich folgende abgeschätzten Eintragungssummen für das Gesamtwarnowgebiet:

N 4740 t/a davon ca. 92% diffus
P 390 t/a davon ca. 71% diffus.

Tabelle 4 Verteilung der Emissionen von Stickstoff und Phosphor auf die Flußgebiete Oberwarnow (oberhalb Rostock) und Unterwarnow (Brackwasserbereich) für 1991-94, nach BEHRENDT (1995)

		Oberwarnow	Unterwarnow
Stickstoff	diffuser Eintrag	95,2%	4,8%
	punktuelle Eintrag	25,9%	74,1%
	Gesamteintrag	81,4%	18,6%
Phosphor	diffuser Eintrag	90,9%	9,1%
	punktuelle Eintrag	19,5%	80,5%
	Gesamteintrag	59,6%	40,4%

Während sich die Nährstoffeinträge in das Flußsystem in den letzten Jahren deutlich verringert haben, haben sich die Nährstofffrachten des Flußsystemes kaum geändert. BACHOR (1996) belegt für den Zeitraum 1990 bis 1995 keine Abnahme der Stickstoff- und Phosphorfrachten der Oberwarnow und somit keine geringere Nährstoffbelastung für die Ostsee.

Das Nährstoffrückhaltevermögen des Flußsystemes hat sich verringert. Die Reduzierung der Nährstoffeinträge für die Ostsee beruht hauptsächlich auf der Reduzierung der Einträge aus den Kläranlagen der großen Küstenstädte wie Rostock, Stralsund, Greifswald und Wismar. Hier zeigt das Kläranlagenprogramm seine eindeutige Wirkung. BEHRENDT (1996) gibt für die punktuellen Nährstoffeinträge in die Ostsee aus Mecklenburg-Vorpommern folgende Entwicklung wieder:

	Summe N-Eintrag		Summe P-Eintrag	
	t N/a	%	t P/a	%
1985/1989	6953	100	1535	100
1991/1992	4910	70,6	920	59,9
1993/1994	4652	66,9	426	27,8

Aufgrund der starken Abnahme der Nährstoffeinträge aus kommunalen Kläranlagen der Küstenstädte stammten 1995 ca. 90% der Nährstoffeinträge in die Ostsee aus den Gewässersystemen (BACHOR 1996). Dieses verdeutlicht gerade auch für den Phosphor, das die diffusen Nährstoffeinträge mehr an Bedeutung gewinnen. Neben der Quantität der Einträge spielen die gewässerinternen Prozesse eine bedeutende Rolle für die Nährstofffrachten.

Von ökologischer Relevanz und zur Abschätzung der Nährstoffbelastung für die Ostsee ist die Kenntnis über die wirklich im Flußsystem transportierten Nährstoffe und den sich als Differenz zur Gesamtemission (Tab. 3) ergebenden Rückhaltungen bzw. Verlusten von Bedeutung. Für die Oberwarnow (Meßpunkt Kessin - Abb. 1) kann für den Zeitraum 1991/94 ein Rückhaltevermögen von ca. 71 % der Gesamtlast mit Stickstoff- und Phosphorverbindungen abgeleitet werden (BEHRENDT (1995) in THIELE & MEHL (1995)). Während für Stickstoffverbindungen bei einer um ca. 24 % zurückgegangenen Gesamtbelastung gegenüber 1985/89 diese Elimination aus dem fließenden Wasser prozentual konstant geblieben ist, ist für Phosphorverbindungen diese analog rückläufig, statt 75 % werden 1991/94 nur noch 71 % im Flußsystem zurückgehalten. 29 % Frachtanteile entsprechen etwa 1330 t N/a und 84 t P/a, d. h. im Flußsystem werden von der Gesamtbelastung ca. 3100 t N/a und ca. 208 t P/a akkumuliert oder eliminiert. In dieser Frachtendiskussion bleibt die Unterwarnow wegen der komplizierten Wasserhaushaltsschwankungen unberücksichtigt. Für dieses hohe Rückhaltevermögen ist einmal die spezifische Warnowstruktur mit den vielen durchflossenen Seen und der mit Seencharakter ausgestaltete Rückstaubereich verantwortlich. Die Sedimente übernehmen eine wichtige Steuerfunktion. Mit zeitweise äußerst geringen Nährstoffkonzentrationen kann eine hohe Gewässertrophie erhalten bleiben, wie z. B. die Entwicklung der Warnowbeschaffenheit (Tab. 1) eindeutig zeigt. Damit verbunden ist auch die Frage, wie lange das hohe Maß an

Stoffeliminierung und Stoffrückhaltung noch aufrechterhalten werden kann. Die Sedimente rücken als potentielle Nährstofflieferanten mehr in den Mittelpunkt der Untersuchungen.

4 Rolle der Sedimente in den Stoffkreisläufen im Fluß/Seen-System der Warnow

Das Nährstoffrückhaltevermögen des Flußsystemes wird durch die Akkumulation von Nährstoffen in den Sedimenten bestimmt. Diese Anreicherung ist nicht flächenmäßig gleich verteilt im Flußsystem, sondern wird durch die Änderung der hydrologischen und morphologischen Bedingungen im Flußverlauf bestimmt. Entscheidend ist die Verringerung der Fließgeschwindigkeit und somit die Erhöhung der Sedimentation feinerer, organischer Partikel. Neben den durchflossenen Seen ist der Rückstaubereich der Warnow eine Nährstoffsенke im Flußsystem. So unterscheidet sich die Sedimentstruktur und Sedimentqualität des Flußoberlaufes deutlich von der im Rückstaubereich (Abb. 2).

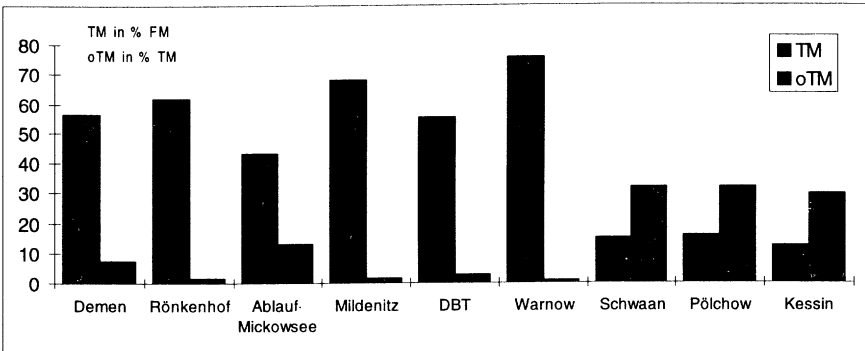


Abb. 2 Trockenmasse- und organische Trockenmassegehalte der Sedimente an neun Meßpunkten im Längsschnitt der Warnow (MP Demen bis Warnow charakterisieren den Oberlauf, während die drei anderen MP im Rückstaubereich liegen)

Die Sedimentstruktur des Rückstaubereiches ist der Struktur in den durchflossenen Flachseen sehr ähnlich (Tab. 5). Der Vergleich mit den drei parallel untersuchten Seen zeigt, daß im Rückstaubereich die durchschnittlich höchsten Phosphorgehalte ermittelt wurden. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, daß der Rückstaubereich die räumlich letzte Senke im Flußverlauf der Warnow darstellt und der Ausstrom in die brackige Unterwarnow (und damit in die Ostsee) aufgrund des Mühlen-dammwehres stark eingeschränkt ist.

Tabelle 5 Vergleich von vier Sedimentparametern (Mittelwerte) verschiedener Gewässerabschnitte des Warnowsystemes

Gewässerabschnitt	n	Mittlere Korngröße	Trockenmasse in % FM	org. Trockenmasse in % TM	Totalphosphor mg/g TM
Warnow					
Oberlauf	12	0,35	65,2	3,9	0,3
Rückstaubereich	58	0,18	20,8	26,5	2,4
Nebenflüsse					
Beke	5	0,6	66,7	3,8	0,3
Kösterbeck	3	0,51	70,7	2,3	0,2
Nebel	8	0,5	61,6	7,4	0,5
Seen					
Barniner See	24	0,11	19,8	20,8	1,9
Bützower See	18	0,12	20,1	17,7	1,3
Klein Pritzer See	15	0,08	18,1	14,0	1,6

In den Sedimenten des Flußsystemes kann es zur Elimination oder Festlegung der Nährstoffe kommen und somit zu einem Entzug dieser aus den Stoffkreisläufen. In den Stand- und Staugewässern kommt es durch den hohen organischen Gehalt in den Sedimenten zu einer starken Sauerstoffzehrung im/am Oberflächensediment. Wenn nicht genügend Sauerstoff nachgeliefert werden kann, tritt Anaerobität auf. Neben der Ammoniumabscheidung aus der abgestorbenen sedimentierten Biomasse kann unter diesen Bedingungen Nitrat (als wichtigste gelöste Stickstoffbindungsform) durch Denitrifikation aus dem Flußsystem eliminiert werden, da der gebildete elementare Stickstoff ausgegast wird.

Während anaerobe Bedingungen im Gewässer zu einer Elimination von Stickstoff aus dem Gewässerkreislauf führen kann, erhöhen diese die Mobilität von Sedimentphosphor und führen so zu einer PO_4 -Rückführung in den Wasserkörper.

Dabei wirken hier verschiedene Prozesse gleichzeitig:

1. Mit dem Abbau von organischer Substanz (und damit von organischen P-Verbindungen) kommt es zur PO_4 -Freisetzung.
2. Durch die Reduktion von Fe^{3+} zu Fe^{2+} wird das an Eisen/Eisenhydroxid gebundene Phosphat freigesetzt.
3. Die Anaerobie verringert die Phosphatsorptionskapazität des Sedimente und kann dadurch eine PO_4 -Freisetzung hervorrufen.
4. P-speichernden Mikroorganismen geben größtenteils die gespeicherten Polyphosphate unter anaeroben Bedingungen (Streßsituation) wieder ab.

Diese aufgeführten Prozesse erhöhen die PO_4 -Konzentration im Interstitialwasser. Deutlich wird diese Beeinflussung durch die auftretende saisonalen Schwankungen der PO_4 -Konzentration im Interstitialwasser (Abb. 3).

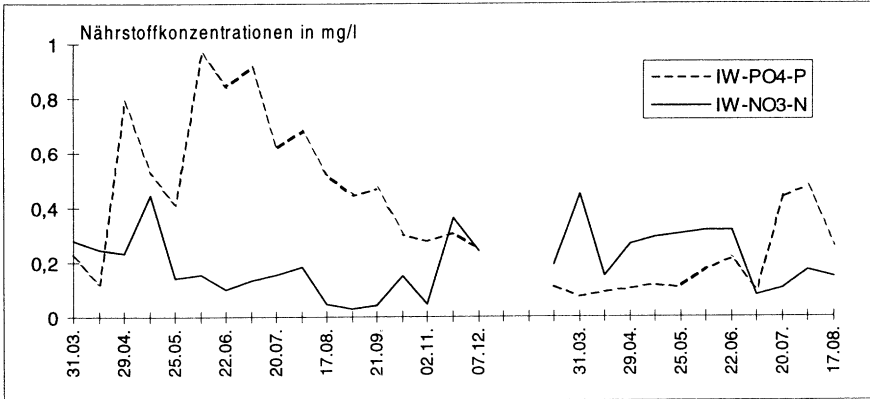


Abb. 3 Nitrat- und Phosphatkonzentrationen im Interstitialwasser des Rückstaubereiches (Mittelwerte aus n=8) 1993/94

Die zeitliche Variabilität der Nitratkonzentration im Interstitialwasser bestätigt den Wechsel der Sauerstoffbedingungen im/am Oberflächensediment. Neben den oben beschriebenen Prozessen der anaeroben P-Freisetzung kann es auch unter aeroben Bedingungen zu Freisetzungsprozessen kommen. Über Sorptions-/Desorptionsgleichgewichte am Grenzbereich Sediment-Wasser werden für die Aufrechterhaltung der biologischen Primärproduktion ausreichende Phosphorkonzentrationen bereitgestellt (SCHLUNGBAUM 1982).

Da nicht alle P-Verbindungen unter aeroben bzw. anaeroben Bedingungen rücklösbar sind, geben die TP-Gehalte im Sediment keinen direkten Rückschluß über die Lösbarkeit und damit Reaktivität des Phosphors im Sediment. Durch die Charakterisierung der chemischen bzw. biochemischen Bindungsform sind differenziertere Aussagen möglich. Dazu wird das unterschiedliche chemische Lösungsverhalten der P-Verbindungen ausgenutzt. Die Untersuchungen mit der chemischen Extraktionmethode nach PSENNER et al. (1984) belegen, daß nicht nur die TP-Gehalte in den Sedimenten des Flußoberlaufes und des Rückstaubereiches sehr unterschiedlich sind, sondern auch das Lösungsverhalten der P-Verbindungen sich stark differenziert (Abb. 4).

Ca. 60-70% des Sedimentphosphors im Oberlauf wurden mit der Bicarbonat/ Dithionitlösung (BD-Lösung) extrahiert. Dieser Anteil ist unter reduktiven Bedingungen lösbar. Anaerobie würde somit zur Rücklösung dieses Phosphoranteiles führen. Aufgrund der vorhandenen Strömungsgeschwindigkeit und der geringen Wassertiefe in diesem Flußabschnitt ist aber mit keiner Anaerobie zu rechnen. Das Sediment

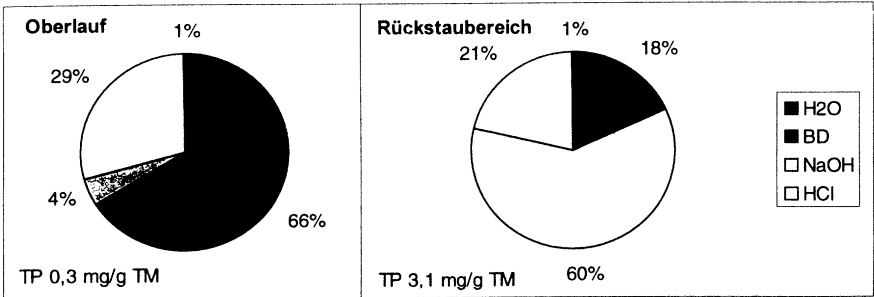


Abb. 4 P-Fraktionierung nach PSENNER et al. (1984) an zwei ausgewählten Meßpunkten im Oberlauf und Rückstaubereiches des Flusses

besitzt durch die geringen organischen Gehalte (ca. 0,5-7% TM) auch eine geringe Sauerstoffzehrung. Im Rückstaubereich liegt der prozentuale Anteil dieser reduktiven Fraktion mit 16-23% niedriger, aber der Absolutbetrag ist deutlich höher als im Oberlauf (0,3-0,7 mg/g TM zu 0,1-0,2 mg/g TM). 50-70% des Sedimentphosphors im Rückstaubereiches wird mit Hilfe von NaOH extrahiert. Bei diesem Anteil handelt es sich sowohl um den sorbierten als auch um den organischen Phosphoranteil.

Aufgrund dieser Untersuchungen sowie der Nutzung weiterer Extraktionsverfahren, der Untersuchung der saisonalen Variabilität und der Durchführung von Laboruntersuchungen (SELIG 1995) konnte festgestellt werden, daß ca. 15-20% des Sedimentphosphors im Rückstaubereich unmittelbar rüchlösbar sind (damit leicht und schnell verfügbar) und über 50% wieder in den Stoffkreislauf zurückführbar ist. Solche Abschätzungen sind bedeutungsvoll für die Fragestellung der Sanierung/Restaurierung von Gewässern und damit auch für den Küstenschutz einschließlich der Nord- und Ostsee. Standardisierte Bewertungsverfahren bzw. -kriterien für Phosphorgehalte und Phosphorfreisetzungen aus dem Sediment existieren in Deutschland nicht. Bisherige Abschaätzungen bzw. Bewertungen aus der Limnologie (u.a. NÜRNBERG 1988 und SAS 1989) stützen sich dabei ausschließlich auf die TP-Gehalte im Sediment. Diese müssen aber als sehr verbal und unzureichend eingeschätzt werden (HUPFER 1993). Speziell für das Warnowsystem wurde auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen ein Bewertungsmodell erstellt. Hier wurde neben dem TP-Gehalt der organische Gehalt im Sediment, der verfügbare P-Anteil und die Wechselbeziehungen zum Wasserkörper in das Bewertungsschema integriert (Tab. 6). Aus diesem Ansatz können keine Freisetzungsraten direkt abgeleitet werden, sondern das Freisetzungspotential abgeschätzt werden.

Für das Flußsystem Warnow zeigt sich (Abb. 5):

- das die P-Freisetzungen lokal bzw. regional begrenzt sind,
- das hier eine Übereinstimmung zwischen Gesamtkonzentration und Freisetzungspotential gegeben ist.

Vergleicht man die Bewertungsergebnisse mit anderen durchgeführten Klassifizierungen für das Flußsystem (Tab. 7), so zeigt sich:

- das die Saprobie die gegebenen morphologischen und gewässerbeschaffenheitsgegebenen Unterschiede der einzelnen Flußabschnitte nicht charakterisieren kann,
- die Sedimentbeschaffenheit die Gewässergüte beeinflusst (Rönkenhof als Fließstrecke nach einem durchflossenen Seen und Rückstauereich direkt).

Ein Gewässersystem wie die Warnow, was neben Fließgewässerabschnitten auch aus Stand- und Staugewässern besteht, besitzt intensive Stoffwechslausaustauschprozesse sowohl zwischen Wasserkörper und Sediment als auch zwischen Sediment und Wasserkörper. Aus diesem Grund sind die Nährstoffbilanzen nicht nur über die Quantifizierung der externen Einträge zu realisieren. Gleiches gilt auch bei der Verbesserung der Gewässerbeschaffenheit.

Tabelle 6 Parameter zur Sedimentbewertung

Parameter	Einheit	Größenklassen
P-Gesamtgehalte	mg/g TM	< 0,3; < 1,0; <1,5; > 1,5
organischer Gehalt	% Anteil an TM	< 5%, < 15%, > 15%
verfügbare P-Anteil NaOH-extrahierbarer o-PO ₄ Gehalt	% Anteil an P-Gesamt	< 10%, < 25%, < 50%, > 50%
saisonale Aspekte (Prozesse im Wasserkörper)	Tag/Nachtschwankungen	ja oder nein

Tabelle 7 Vergleich der Bewertungsergebnisse verschiedener Autoren zur Klassifizierung der Warnow (1* - Werte aus Autorenkollektiv 1993/ 1994a, 2* - Werte aus Autorenkollektiv 1994b, 3* - eigene Meßdaten)

Bewertungskriterium	Demen	Rönkenhof	Durchbruchstal	Rückstauereich
Gewässergüte nach TGL ^{1*}				
1991	2	3	2	2-3
1992	2	3	2	3-4
1993	2	3	2	2-3
Saprobienindex ^{2*}				
1993	2,07	2,27	2,21	2,27
Biotopstruktur ^{2*}				
1993	4	2	1	1
Sedimentbeschaffenheit ^{3*}				
1993/94	2	1	1	4

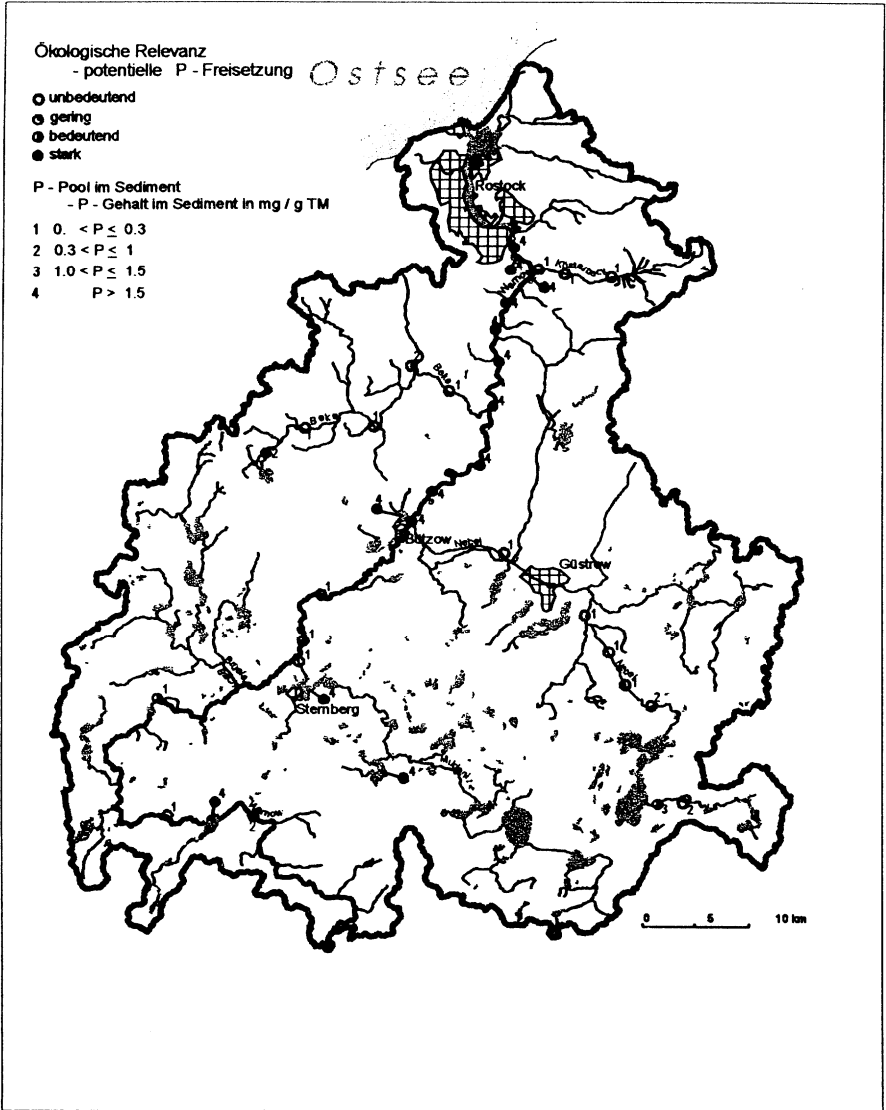


Abb. 5 Die Bewertung der Gewässersedimente im Warnow-System - erstellt durch R. Pivarci, Universität Rostock, Institut für Landschaftsplanung und Landschaftsökologie

5 Aspekte der Sanierung des Warnowsystems

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, daß für die Warnowsanierung und damit der Verbesserung der Gewässerbeschaffenheit drei Ansatzpunkte zu berücksichtigen sind:

- Senkung der noch bestehenden punktuellen Belastung
- Senkung der aus dem Einzugsgebiet kommenden diffusen Belastung
- Beeinflussung des im Gewässer bestehenden Belastungspotential.

Diese Betrachtungen erfolgen unter dem Gesichtspunkt des ökologischen Erfordernisses, der ökonomischen Vertretbarkeit sowie der technischen Möglichkeit. Umweltrechtliche Aspekte müssen schon zur Vermeidung von Vollzugsdefiziten eine Grundlage von Maßnahmekonzepten sein (SCHLUNGBAUM 1996).

5.1 Möglichkeiten und Erfordernisse der weiteren Senkung punktueller Einträge

Seit der Wiedervereinigung Deutschlands hat sich auch im Warnowgebiet die Situation für den Gewässerschutz durch den Bau neuer bzw. Nachrüstung vorhandener Kläranlagen wesentlich verbessert (vgl. dazu auch Abschnitt 3). Diese Maßnahme wurden in erster Linie für größere Städte realisiert. BEHRENDT (1996) gibt dafür für das Warnowgebiet bis Rostock eine auf Daten von 1993/94 basierende neue Zusammenfassung.

Danach sind von den 157 600 im Warnowgebiet lebenden Einwohner ca. 89 300 (= 57 %) an eine Kanalisation angeschlossen. Für 43 % der Einwohner muß über eine Form der abwassertechnischen Gestaltung nachgedacht werden. Diese kommunalen Abwässer gelangen heute noch als "diffuse Einträge" in das Flußsystem. Dezentrale Regelungen mit Erfüllung der hygienischen Erfordernisse dürften die Zielrichtung sein.

Für die angeschlossenen Einwohner kann heute auf einen relativ hohen Stand der Technik verwiesen werden:

- angeschlossene Einwohner	89 300 E = 100 %
davon:	
• Ausstattung mit mechanischen Kläranlagen	4 400 E = 5,0 %
• Ausstattung mit biologischen Kläranlagen	37 900 E = 42,4 %
• Ausstattung mit P-Elimination	33 700 E = 37,7 %
• Ausstattung mit P- und N-Elimination	13 300 E = 14,9 %

Für die verschiedenen Abwassertechniken kann heute bezüglich der Nährstoffelimination von den folgenden "Fixzahlen" ausgegangen werden:

	Elimination in %	
	N	P
Kläranlage mit mechanischer Reinigungsstufe	15	15
Kläranlage mit mechanischer und vollbiologischer Reinigungsstufe	30	20
Kläranlage mit biologischer Reinigungsstufe und P-Elimination	30	90
Kläranlage mit weitergehender P- und N-Elimination	40	90

Zu beachten ist, daß bei der Schaffung neuer Kläranlagen mit nur biologischer Stufe - Berücksichtigung der Vorgaben der deutschen Mindestanforderungen (RAHMENABWASSERVERWALTUNGSVORSCHRIFT 1992) - es zu erhöhten punktuellen Nährstoffeinträgen kommen kann.

Hier sollten die künftigen Zielstellungen, wie sie in der EU-Richtlinie von 1991, für den Zeitraum 2005 formuliert sind, bereits heute Berücksichtigung finden. Danach sollen Gemeinden zwischen 2 000 und 10 000 Einwohner, die unmittelbar in Binnengewässer einleiten, die Ziele der weitergehenden Abwasserbehandlung zugrunde legen. Bezüglich der heute gut steuerbaren und nur wenig kostenintensiveren P-Elimination sollten die Bedingungen des deutschen Abwasserrechtes, wie sie nur für größere Anlagen gelten, angestrebt werden. Bei Anerkennung des Warngebietes als ökologisch empfindliches Gebiet würde dieser Schritt ein Erfordernis. Bezüglich der Regulierung der N-Einträge sollte auf eine vollbiologische Reinigung mit weitergehender Nitrifikation gesetzt werden. Die teure Denitrifikation würde bei einem heute 11 - 12-fachen Überwiegen der diffusen Stickstoffbelastungen diese kaum beeinflussen.

5.2 Ansatzpunkte für die Senkung der diffusen Nährstoffeinträge

Die Bilanzierungen in Abschnitt 3 zeigen eindeutig das Überwiegen der diffusen Nährstoffquellen. Eine Regulierung muß bei den dominanten Eintragspfaden angesetzt werden. Danach ist für die Reduzierung der N-Emissionen insbesondere der Eintrag aus den künstlich entwässerten Flächen beachtenswert. Den drainierten Flächen auf ackerbaulich genutzten Mineralbodenstandorten kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, da von diesen Flächen (820 km² bzw. 25 % des Einzugsgebietes) 48 % der diffusen Stickstoffbelastung verursacht werden. Diese Stickstoffeinträge sind mehr als zweimal größer als die aus den kommunalen Kläranlagen des Einzugsgebietes. Schwerpunkte für Maßnahmen können beispielsweise vom Land beeinflusste Flächenstilllegungskonzepte sein. Ebenso müssen Maßnahmen zur Senkung der Bodenerosion konzipiert werden. Damit werden hauptsächlich die P-Frachten beeinflusst.

5.3 Möglichkeiten und Erfordernisse für die Reduzierung gewässerinterner Nährstoffquellen

Reichen Sanierungskonzepte im Einzugsgebiet nicht aus, muß auch an restaurative Maßnahmen im Gewässersystem selbst gedacht werden. Diese sind immer den Sanierungsmaßnahmen in der Landschaft nachgeschaltet oder erfolgen höchstens gleichzeitig. Im Abschnitt 4 konnte bereits auf die Bedeutung der insbesondere schlammigen Sedimente für den Eutrophierungsprozeß hingewiesen werden. Durch die Sediment/Wasser-Wechselwirkungen werden hauptsächlich Phosphorverbindungen und Ammoniumstickstoff ausgetauscht. Sauerstofffreie Zonen in Bodennähe fördern die Nährstofffreisetzung. Es gibt kaum nachhaltig wirkende Methoden zur Stabilisierung der Nährstoffkonzentrationen in den Sedimenten. Die Schlammmentnahme - ist gleichzeitig eine Nährstoffentnahme - ist die bisher einzige durchgreifend und nachhaltig wirkende Methode. Aus wissenschaftlichen und auch ökologischen Gründen kommt eine Entschlammung aller betroffenen Bodenflächen in keinem Gewässersystem in Frage. Da natürlich auftretende Wasserbewegungen (u. a. Strömungen) insbesondere die nährstoffreichen Schlicke leicht transportieren, können diese hydrologischen Prozesse für eine Schlammakkumulation genutzt werden.

Die Wirkungen durch Schaffung künstlicher Sammlungsräume

- in Seen Sedimentationsfallen im Bereich der Flußeingänge und Flußausgänge
- im Flußlauf der Bau von flachen Unterwasserwehren (Sedimentation durch Störung der Strömungsdynamik, keine ökologischen Hindernisse, z. B. Fischaufstieg)

können genutzt werden. Die notwendige regelmäßige Räumung der angesammelten Sedimente ist dann auf einige markante Punkte konzentriert. Diese Maßnahmen wirken prinzipiell wie durchflossenen Seen. Es sollte auch der Wiederanschluß des abgekoppelten Rummelborn- und des Neddersees vorgesehen werden. Über die Nachnutzung der organischen und nährstoffhaltigen Schlicke für die Bodenverbesserung muß zukünftig mehr nachgedacht werden. Lediglich evtl. kontaminierte Schlicke sind zu deponieren.

Zusammenfassung

Die Warnow besitzt von Natur aus ein großes Potential zur Nährstoffelimination und kann durchaus auch im Unterlauf eine Güteklasse besser als 3 haben. Es gilt, die Nährstoffbelastung des Flußsystemes aus den Kommunen und der Landschaft zu senken. Gewässerinterne Maßnahmen können hier als unterstützende Begleitmaßnahmen fungieren. Diese Maßnahmen würden auch zu einer Reduzierung der Nährstoffeinträge in die Ostsee führen. Ein moderner Gewässerschutz muß die ganzheitliche Ökosystembetrachtung, d. h. Komplexität von Landschaft und Gewässer, zugrunde legen.

Nur so hat der in der Landschaft lebende Mensch langfristig den größten Nutzen.

Literatur

- AUTORENKOLLEKTIV (1993): Gewässergütebericht 1992 des Landes Mecklenburg-Vorpommern. - Umweltministerium MV, 146 Seiten.
- AUTORENKOLLEKTIV (1994a): Gewässergütebericht 1993 des Landes Mecklenburg-Vorpommern. - Umweltministerium MV, 170 Seiten.
- AUTORENKOLLEKTIV (1994b): Ökologische Untersuchungen im Warnow-Einzugsgebiet II. - Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt und Natur MV, 2, 56-92.
- AUTORENKOLLEKTIV (1996): Gewässergütebericht 1994 des Landes Mecklenburg-Vorpommern. - Ministerium für Bau, Landesentwicklung und Umwelt MV, 233 Seiten.
- BACHOR, A. (1996): Nährstoffeinträge aus Mecklenburg-Vorpommern in die Ostsee 1990-1995. - Wasser & Boden, 48, 2, 33-36.
- BEHRENDT, H. (1995): Quantifizierung der Nährstoffeinträge im Einzugsgebiet der Warnow. - unveröff. Teilbericht zum BMFT-Verbundprojekt.
- BEHRENDT, H. (1996): Quantifizierung der Nährstoffeinträge aus Flußgebieten des Landes Mecklenburg-Vorpommern. - Studie, unveröff. Inst. f. Gewässerökologie u. Binnenfischerei Berlin e. V.
- EG-Richtlinie (1991): Richtlinie des Rates über die Behandlung von kommunalen Abwasser vom 21.05.1991. - 91/271/EWG-Amtsblatt Nr. 2, 135 vom 30.05.1991, S. 40.
- HUPFER, M. (1993): Untersuchungen zur Phosphatmobilität in Gewässersedimenten. - Dissertation, TU Dresden.
- NÜRNBERG, G. (1988): Prediction of phosphorus release rates from total and reductant - soluble phosphorus in anoxic lake sediments. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 45, 453-462.
- PSENNER, R.; R. PUCSKO & M. SAGER (1984): Die Fraktionierung organischer und anorganischer Phosphorverbindungen im Sediment. - Arch. Hydrobiol. Suppl., 70/1, 111-155.
- RahmenAbwasserVwV (1992): Allgemeine Rahmen-Verwaltungsvorschrift über Mindestanforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer vom 25.11.1992. - Bundesanzeiger 233b, 11.12.1992.
- SAS, H. (1989): Lake restoration by reduction of nutrient loading. - Academia Verlag, 497 Seiten.
- SCHLUNGBAUM, G. (1982): Sedimentchemische Untersuchungen in Küstengewässern der DDR - Teil 11: Phosphorsorptionsgleichgewichte zwischen Sediment und Wasser in flachen eutrophen Küstengewässern. - Acta hydrochim. hydrobiol. 10, 2, 135 - 152.
- SCHLUNGBAUM, G. (1996): Vollzugsdefizite beim Schutz der Wasserressourcen - eine Betrachtung zwischen Ökologie und Vorgaben im nationalen sowie internationalen Recht. - Zeitschr. f. angewandte Umweltforschung, im Druck.
- SELIG, U. (1995): Untersuchungen zum Phosphorkreislauf in einem eutrophierten Flachlandflußsystem - Phosphorbindungsformen in Gewässersedimente der Warnow und deren Rücklösbarkeit. - Dissertation, Univ. Rostock, Math.-Nat. Fakultät.
- THIELE, V. & D. MEHL (1995): Ökologisch begründete Sanierungskonzepte für das Gewässereinzugsgebiet der Warnow/Meckleburg-Vorpommern. - Endbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben 0339517A, Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt und Natur Mecklenburg-Vorpommern 2, 1 - 158 und Anhang.
- VANNOTE, R. I.; G. W. MINSHALL, K. W. COMMINS, J. R. SEDELL & C. E. CUSHING (1980): The River Continuum Concept. - Can. J. Fish. Aquat. Sci. 37, 130 - 13.

Verfasser

Prof. Dr. habil. Günter Schlungbaum
Dr. Uwe Selig
Universität Rostock
FB Biologie, Angewandte Ökologie
18051 Rostock