

Dietmar Mehl, Tim G. Hoffmann, Janette Iwanowski, Klaudia Lüdecke und Volker Thiele

25 Jahre Fließgewässerrenaturierung an der mecklenburgischen Nebel: Auswirkungen auf den ökologischen Zustand und auf regulative Ökosystemleistungen

25 years of restoration of the river Nebel (Mecklenburg): effects on the ecological status and on the regulative ecosystem services

Innerhalb von ca. 25 Jahren wurden umfangreiche Renaturierungsmaßnahmen am mecklenburgischen Fluss Nebel umgesetzt (> 7 Mio. €). Das auf entsprechenden konzeptionellen Grundlagen basierende Gesamtvorhaben ist in der baulichen Ausführung (nahezu) abgeschlossen, so dass eine Bewertung hinsichtlich des Umsetzungserfolges angeraten erscheint. Der Beitrag geht deshalb der Frage nach, inwieweit ökologische Zustandsverbesserungen erreicht werden konnten und welche Auswirkungen die Maßnahmen auf Ökosystemleistungen der Gewässer und Auen haben. Anhand relevanter Qualitätskomponenten kann zunächst an einem beispielhaften Gewässerabschnitt der Nachweis erzielter Zustandsverbesserung geführt werden.

Zum anderen erfolgen mit Hilfe einfacher, abschätzender Ansätze Bewertungen der ausgewählten regulativen Ökosystemleistungen (1) Rückhalt von Treibhausgasen bzw. Kohlenstoffsequestrierung, (2) Hochwasserregulation, (3) Niedrigwasserregulation, (4) Sedimentregulation, (5) Bodenbildung in Auen sowie (6) Kühlwirkung (Gewässer und Auenböden). Bei Eignung wird eine Monetarisierung durchgeführt. Dazu werden aktuelle sowie Daten des Zeitraumes Anfang der 1990er-Jahre für einen historischen Vergleich genutzt. Es kann gezeigt werden, dass der Nutzen für den Menschen und somit die gesamtgesellschaftlichen Vorteile der Gewässerrenaturierung erheblich weiter zu fassen sind, als es eine singuläre Betrachtung ökologischer Kriterien erwarten ließe.

Erfolge der Renaturierung in dieser Hinsicht sind u. a.

- eine Verminderung der Treibhausfreisetzung aus den gewässerbegleitenden Mooren in Höhe von fast 20 % (ca. - 9.000 t a⁻¹ CO₂-Äquivalent bzw. Schadenskostenreduktion von ca. 720.000 € je Jahr),
- eine Zunahme des Hochwasserrückhalterums um ca. 16 % (ca. + 6.972.281 m³ bzw. monetärer Vorteil ca. 174 Mio. €) und
- eine Zunahme der Kühlleistung von Gewässer und Böden um mehr als 12 % (+ 1.815 GWh a⁻¹).

Schlagwörter: Flussrenaturierung, ökologischer Zustand, Ökosystemleistungen

Within the past 25 years, extensive restoration measures were implemented along the river Nebel in Mecklenburg (> 7 million €). The entire project is based on conceptual principles and as it is about to be completed in constructional terms, it is time to assess the implementation success. On that account, this paper shows to what extent the ecological status could be improved and how the measures affect the ecosystem services of the aquatic environment. Using relevant quality components, the actual upgrades in terms of eco-morphological conditions are demonstrated for a generic stream segment. Moreover, simple estimates are used for the assessment of some selected regulatory ecosystem services, e. g. (1) retaining greenhouse gas/carbon sequestration, (2) flood regulation, (3) low water regulation, (4) sediment regulation, (5) soil formation in floodplains, and (6) cooling effects (waters and floodplains). These services were monetized if suitable. For this purpose, current data as well as data from the early 1990s were used for a historical comparison. It can be shown that the beneficial effects of water body restoration on humans and society have to be considered in a much broader sense than the consideration of single ecological aspects let assume.

The successes of renaturation in this respect are

- a reduction of greenhouse release from the peatlands of almost 20 % (approx. - 9,000 tonnes a⁻¹ CO₂ equivalent or damage reduction of approx. 720,000 € per year),
- an increase in the flood retention area by approx. 17 % (approx. + 119,000 m³ or monetary benefit of approx. 174 million €), and
- an increase in the cooling capacity of water bodies and soils by more than 12 % (+ 1,815 GWh a⁻¹).

Keywords: riverrestoration, ecological status, ecosystem services

1 Einleitung

Maßnahmen zur Verbesserung der Hydromorphologie leisten einen wesentlichen und häufig entscheidenden Beitrag zur Verbesserung des ökologischen Zustandes der Fließgewässer, indem eine ganz wesentliche Grundlage für die Etablierung standorttypischer Lebensraumverhältnisse geschaffen wird. Nur weitgehend intakte, dynamische Gewässerstrukturen auf der Basis möglichst natürlicher hydrologischer Verhältnisse können

eine selbsttragende Biokomplexität in den Fließgewässersystemen einschließlich ihrer Auen absichern (THORP et al., 2006; MEROT et al., 2006). Dies bildet zugleich die Grundvoraussetzung für das Erreichen des guten ökologischen Zustands im Sinne der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL).

In Deutschland ist das Gros der Fließgewässer hydromorphologisch degradiert. Der Schwerpunkt „Abflussregulierungen und morphologische Veränderungen“ vereint im aktuellen WRRL-Be-

wirtschaftungszyklus von 2016 bis 2021 demzufolge mit 41,5 % der Maßnahmen in Deutschland die größten Gewässerbelastungen auf sich (BMUB/UBA, 2016).

Nun geraten die bereits umgesetzten Renaturierungsmaßnahmen immer stärker in den Blickpunkt von Forschung und Öffentlichkeit (JANUSCHKE et al., 2009; DAHM et al., 2014). Es müssen vor allem solche Fragen beantwortet werden, wie:

- Führen die Renaturierungsmaßnahmen zum gewünschten Erfolg?
- Wie können die Maßnahmen ggf. optimiert werden?
- Was sind förderliche Umstände, was ggf. Hinderungsgründe für einen Erfolg?
- Welche Bedeutung kommt den einzelnen Umweltfaktoren für die Biozönose zu? Wie kann ihr Zusammenwirken besser analysiert und parametrisiert werden?
- Welche Indikatoren können neben den Qualitätskomponenten der EG-WRRL noch verwendet werden?
- Wie steht es um die Verhältnismäßigkeit der Kosten in Relation zu den Vorteilen für den Menschen?

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich dieser Beitrag mit Renaturierungsvorhaben an der mecklenburgischen Nebel, die über einen Zeitraum von gut 25 Jahren umgesetzt wurden. Fokussiert wird in besonderer Weise auf das Erreichte und seine Wirkungen. Es war damit das übergeordnete Ziel der zugrundeliegenden Arbeiten nachzuweisen, dass mit der Renaturierung nachweisbare Verbesserungen des Zustandes des Gewässers und seiner Aue erreicht werden konnten. Folgende Fragestellungen werden thematisiert:

1. Auswirkungen auf den ökologischen Zustand
Hierzu werden an einem beispielhaften Gewässerabschnitt der Nebel vieljährige Monitoringdaten ausgewählter Qualitätskomponenten der EG-WRRL (Anhang V EG-WRRL, OGewV) ausgewertet. Der bereits ausführlicher bei THIELE et al. (2015) und MEHL & THIELE (2017) geführte historische Vergleich soll die Fortschritte belegen.
2. Auswirkungen im Hinblick auf ausgewählte Ökosystemleistungen
Es erfolgt ein Rückgriff auf das Konzept der

Ökosystemleistungen (MA, 2005) für ausgewählte regulative Ökosystemleistungen. Ökosystemleistungen werden als die direkten und indirekten Beiträge von Ökosystemen zum menschlichen Wohlergehen definiert (TEEB, 2010). Das Vorgehen baut dabei u. a. auf Arbeiten für große Flussauen auf (SCHOLZ et al., 2012; MEHL et al., 2013; DEHNHARDT et al., 2016). Es wurde aber inhaltlich und methodisch erweitert, da die Arbeiten im Rahmen des ReWam-Verbundprojekts RESI „River Ecosystem Service Index“ erfolgten (bmbf.nawam-rewam.de/projekt/resi) und insofern eine Grundlage für umfassendere Bewertungen der Ökosystemleistungen der Flüsse und Auen darstellen.

2 Untersuchungsgebiet

Der mehr als 70 km lange Tieflandfluss Nebel stellt mit seinen Niederungen bzw. Auen den Untersuchungs-/Betrachtungsraum dar. Das 998 km² umfassende und überwiegend landwirtschaftlich genutzte Einzugsgebiet der Nebel liegt im mittleren Mecklenburg. Größere Städte sind Güstrow und Bützow; bei letzterer mündet die Nebel in die Warnow, welche wiederum bei Rostock-Warnemünde die Ostsee erreicht (Abb. 1). Für die Zeitreihe 1981 bis 2010 liegt die mittlere Jahrestemperatur für

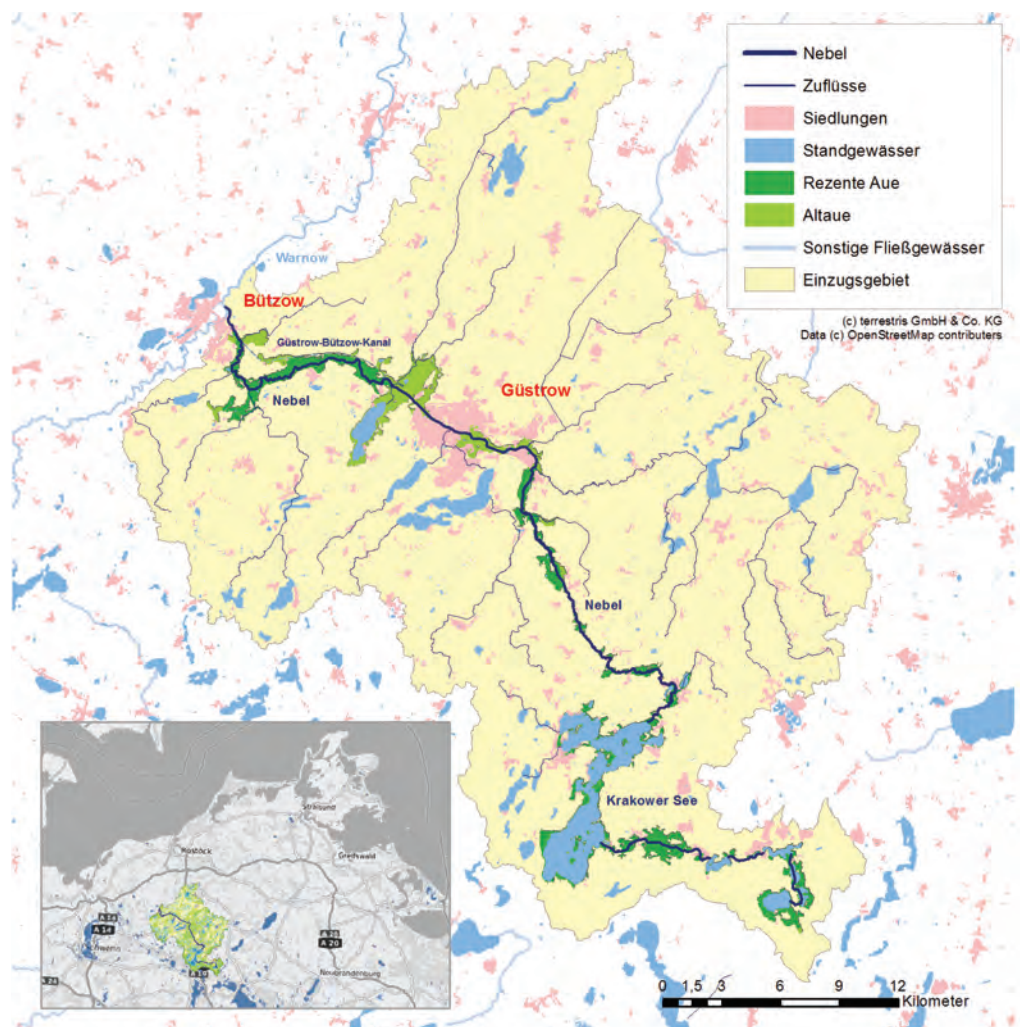


Abbildung 1

Einzugsgebiet der Nebel und Lage in Mecklenburg-Vorpommern.
Catchment area of the river Nebel and its location in Mecklenburg-West Pomerania.

die Station Laage des Deutschen Wetterdienstes (DWD) (knapp außerhalb und nördlich des Einzugsgebietes) bei 8,7 °C; der mittlere Jahresniederschlag beträgt für die im Osten des Nebelgebietes gelegene DWD-Station Lalendorf 609 mm (DWD, 2017).

Die Nebel ist ein vielgestaltiger Tieflandfluss, der unterschiedliche, für Deutschlands Nordosten typische Naturräume durchfließt. Besonders erwähnenswert sind die Strecken mittelgebirgsartiger, schmaler Durchbruchstäler in Endmoränenlagen. In den Niederungen dominieren dagegen Versumpfungs-, Verlandungs- und Durchströmungsmoore. Unter dem Einfluss der landwirtschaftlichen Nutzung erfolgte auf großen Flächen eine Degradation der Torfe (MEHL et al., 1995). Die Nebel durchfließt im Oberlauf mehrere Seen. Darunter ist der Krakower See mit einer Seefläche von rund 15 km² der größte. Die Auenflächen an der Nebel umfassen entsprechend der Methodik von BRUNOTTE et al. (2009) 22,9 km² rezente Aue und 13,2 km² Altaue.

Das Abflussregime der Nebel ist in Bezug auf den repräsentativen Pegel Güstrow und im landesweiten Vergleich in Mecklenburg-Vorpommern durch eine relativ hohe innerjährliche Abflussdynamik, insbesondere durch vergleichsweise geringe Niedrigwasserabflüsse gekennzeichnet. Hydrologische Hauptzahlen zum Durchfluss enthält Tabelle 1.

Entlang der Nebel und auch an den integrierten Seen erstrecken sich große Schutzgebiete des Natura-2000-Netzes (Flora-Fauna-Habitat-Gebiete: FFH, Special Protection Area: SPA). Bedeutsame Gebiete sind das sich entlang der gesamten Nebel erstreckende FFH-Gebiet „Nebeltal mit Zuflüssen, verbundenen Seen und angrenzenden Wäldern“ (DE 2239-301), das für den Oberlauf und den Krakower See bedeutsame SPA-Gebiet „Nossentiner/Schwinzer Heide“ (DE 2339-402) (nahezu deckungsgleich mit dem gleichnamigen Naturpark) sowie das SPA-Gebiet „Warnowtal, Sternberger Seen und untere Mildenitz“ im Nebelunterlauf (DE 2137-401).

3 Renaturierungsmaßnahmen: Hintergrund und Umfang

Land- und Gewässernutzungen haben über die Jahrhunderte an der Nebel zu vielfältigen Veränderungen geführt. Hydromorphologisch bedeutsame Beeinträchtigungen sind vor allem Mühlenstaue, Wehre, die Anlage des Güstrow-Bützow-Kanals als Wasserstraße sowie der Gewässerausbau zur Vorflutoptimierung (Begradigung, Vertiefung, hydraulisch optimierte Profile), der

auch ein verstärktes Gewässerunterhaltungserfordernis nach sich zog.

Vor allem die gefällereichen Fließstrecken in den Durchbruchstätern der Nebel und die tiefgründigen Moore blieben weitestgehend von umfangreichen Umgestaltungsmaßnahmen verschont, so dass die Nebel selbst zur politischen Wende 1989/1990 noch eines der natürlichsten und strukturell vielfältigsten Gewässer Mecklenburg-Vorpommerns war. Das zeigt sich u. a. am standorttypischen Artenreichtum der unterschiedlichen Lebensräume. So konnten in den 1990er-Jahren insgesamt 23 Fisch- und Rundmäulerarten nachgewiesen werden, darunter Steinbeißer, Bauchneunauge, Bachforelle, Hecht und Quappe (WINKLER et al., 1995). Auch lassen sich Referenzbiozöten beim Makrozoobenthos (BERLIN & MEHL, 1997) und den Niederungsartengruppen belegen (BERLIN & THIELE, 2012). So konnten allein im Naturschutzgebiet Nebel mehr als 130 Großschmetterlinge nachgewiesen werden, im Gesamtgebiet sind es über 400 Taxa (THIELE, 2003). Zudem werden in zahlreichen Bereichen der Nebel die z. T. hochgradig geschützten Taxa der Windelschnecken (u. a. *Vertigo moulinsiana*) und Großmuscheln (u. a. *Unio crassus*) in reproduzierenden Beständen gefunden.

Bereits Anfang der 1990er-Jahre wurden auf der damaligen rechtlichen Grundlage von Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) und Wasserhaushaltsgesetz (WHG) Maßnahmen zur Verbesserung der ökologischen Situation eingeleitet. Diese sind besonders seit dem Inkrafttreten von EG-WRRRL im Jahr 2000 und einer nachhaltigeren Verfolgung der Ziele von FFH-RL und der Vogelschutzrichtlinie (VSchRL) auch in der Umsetzung systematisch angegangen worden. Die explizit auf stoffliche Belastungsreduktion ausgerichteten Vorhaben, z. B. Kläranlagensanierung und -ausbau, sollen hier nicht betrachtet werden; vielmehr stehen hydromorphologisch orientierte Maßnahmen im Vordergrund (Abb. 2 bis 7, Tab. 2).

Das Gros der Renaturierungsmaßnahmen an der Nebel wurde im eigenen Hause konzeptionell und gutachtlich vorbereitet sowie ingenieur-/umweltplanerisch umgesetzt und begleitet. Zentraler Ausgangspunkt waren Gewässerentwicklungspläne für die beiden Gewässerteile ober- und unterhalb des Krakower Sees (BIOTA, 1994, 1995) sowie ein etwas später erarbeiteter Pflege- und Entwicklungsplan für das Naturschutzgebiet „Nebeltal“ (BIOTA, 1998). Seit 1994 wurden mehr als 7 Mio. € Euro Fördermittel von EU, Bund und Land für die Maßnahmenplanung und vor allem für die -umsetzung an der Nebel eingesetzt (LU, 2015).

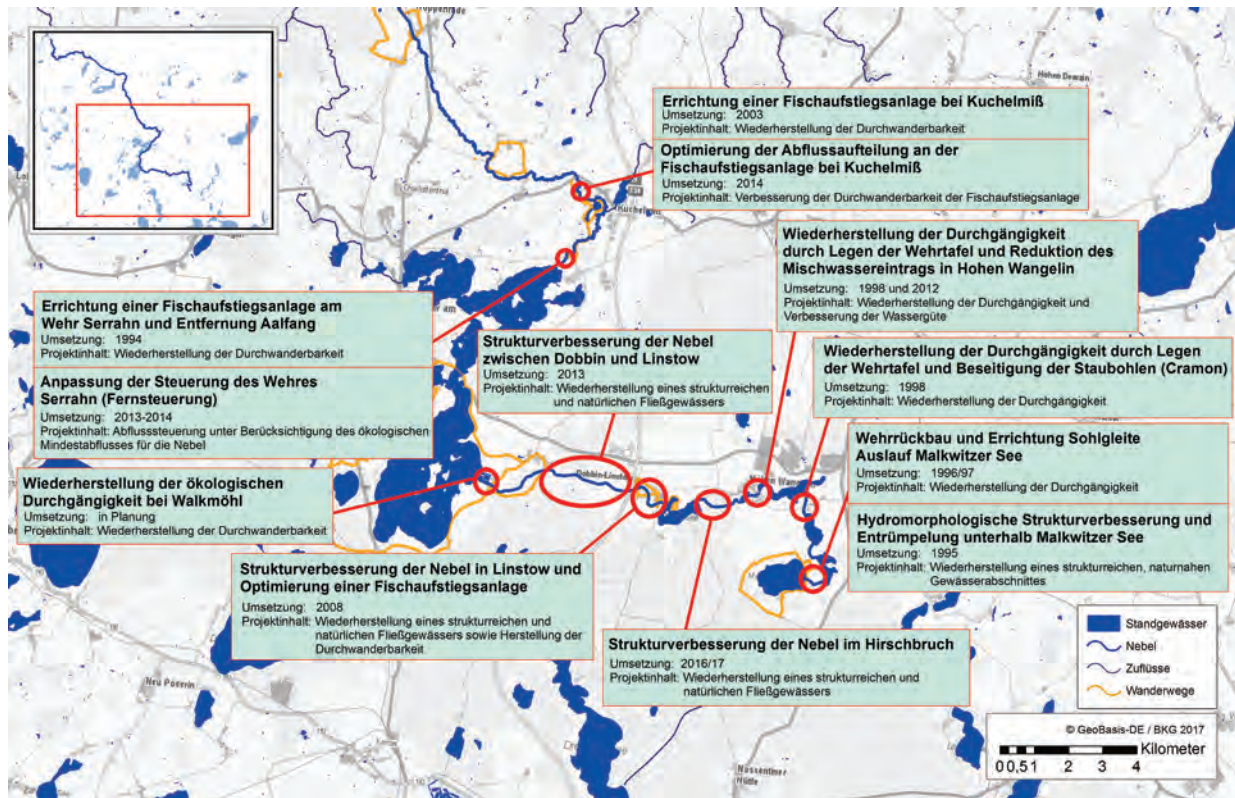
Alle Konzeptionen und Planungen integrieren grundsätzlich Entwässerungs- und Bewirtschaftungsfragestellungen durch spezifische Lösungen, wie

- konsequentes Anwenden hydrologischer und hydraulischer Modellierungstechniken zur Wirkungsabschätzung von Maßnahmen,
- Begrenzung der hydrologischen Auswirkungen auf die prognostizierten Auswirkungsräume,
- Anpassung einmündender Grabensysteme und Dränsammler und
- Schaffung von Grenzgräben und neuen Ent-/Bewässerungslösungen (z. B. Einstaumöglichkeiten in Gräben zur Optimierung des Wasserrückhaltes in Mooren).

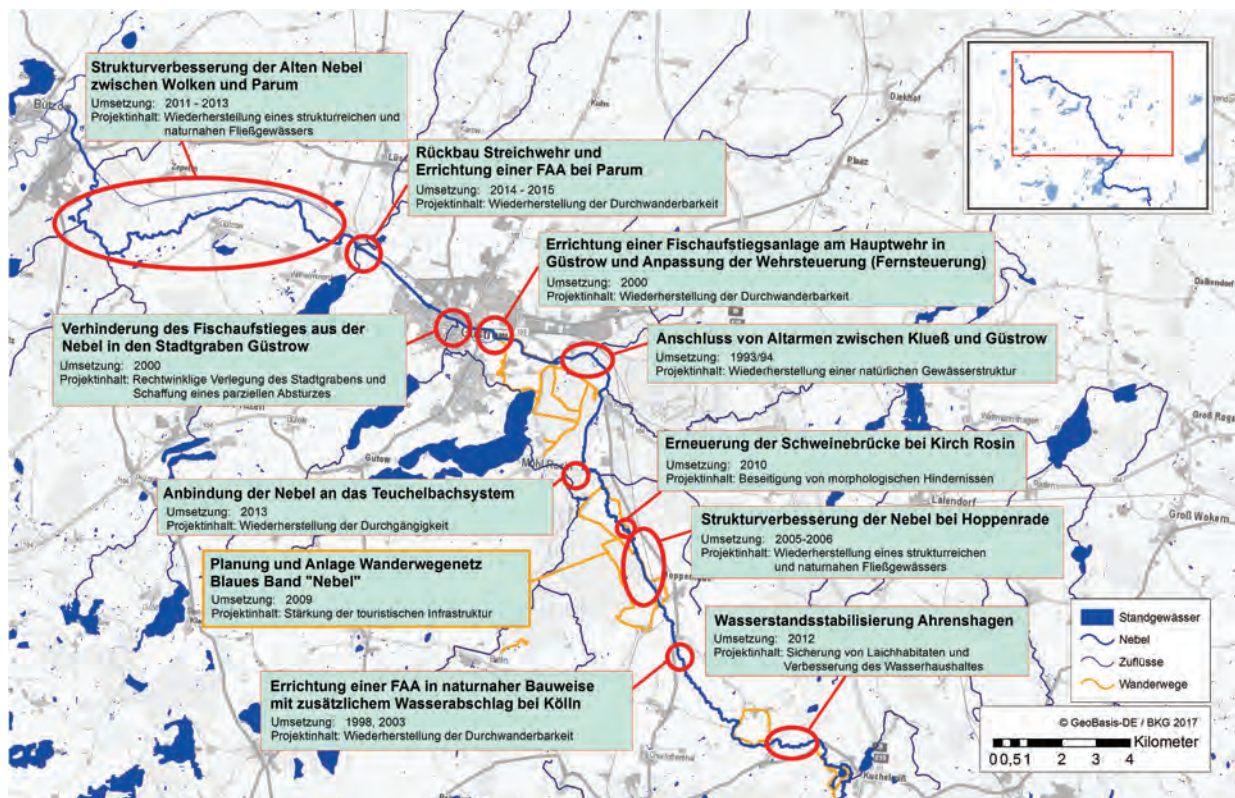
Tabelle 1

Hydrologische Hauptzahlen am Pegel Güstrow/Nebel, Pegelkennzahl: 04437.0, Einzugsgebietsfläche: 657 km², Zeitreihe: 1961 bis 2015 (Angaben aus: Pegelportal Mecklenburg-Vorpommern 2017).
Hydrological data at the gauge Güstrow/Nebel, gauge identification number: 04437.0, catchment area: 657 km², time series: 1961 to 2015 (data from the gauge portal Mecklenburg-West Pomerania 2017).

Hauptzahl	Durchfluss in m ³ /s
NQ	0,030
MNQ	0,611
MQ	3,66
MHQ	12,0
HQ	21,0

**Abbildung 2**

Umgesetzte Renaturierungsvorhaben an der oberen Nebel.
Restoration projects realized on the upper Nebel.

**Abbildung 3**

Umgesetzte Renaturierungsvorhaben an der unteren Nebel.
Restoration projects realized on the lower Nebel.

Tabelle 2

Kennzeichen ausgewählter Einzelvorhaben an der Nebel.
Characteristics of selected projects on the river Nebel.

Maßnahmenbereich Umsetzungszeitraum	Maßnahmenumfang und -ergebnisse	Kosten
Nebel bei Hoppenrade 2005 bis 2006	- Verlegung der Nebel in ein neues, naturnahes Bett mit wechselnden Breiten und Tiefen, naturraumtypische Lauform (stark schwingend). - Laufverlängerung von 1,5 km auf 2,5 km in diesem Gewässerabschnitt. 50 bis 150 m breiter Entwicklungskorridor einschließlich einer 25 bis 70 m breiten Wasserwechselzone (insgesamt ca. 20 ha).	ca. 300.000 € Baukosten, integriert in ein laufendes Bodenordnungsverfahren nach LwAnpG
Nebel im Abschnitt Linstow-Dobbin 2012 bis 2013	- Neuprofilierung des zuvor geraden Nebellaufes auf 2,5 km Länge als mäßig geschwungenes Gewässer inkl. Einbau von Totholz, dabei Schaffung typspezifischer Breiten- und Tiefenvarianz. 7 bis 10 m breite Wasserwechselzone auf Höhe des Mittelwasserstandes. - Durchgehender, 40 m breiter Entwicklungskorridor; hier Etablierung natürlicher Vegetation, keine Bewirtschaftung (insgesamt ca. 10 ha). - Abschnittsweise Initialbepflanzung (als Abgrenzung Korridor – Nutzfläche).	ca. 340.000 € Baukosten, integriert in zwei laufende Bodenordnungsverfahren nach LwAnpG
Alte Nebel 2011 bis 2013 Errichtung Fischaufstiegsanlage bei Parum 2014 bis 2015	- Hydrologische Bevorteilung durch deutlich erhöhten Durchfluss und weitgehend unregelmäßige hydrologische Dynamik (realisiert über Errichtung einer entsprechend konzipierten neuen Fischaufstiegsanlage; im Güstrow-Bützow-Kanal jetzt nur noch Mindestwasserführung). - Mindestens 45 m breite Wasserwechselzone auf Höhe des Mittelwasserstandes und engerer Entwicklungskorridor; hier Etablierung natürlicher Vegetation, keine Bewirtschaftung (insgesamt ca. 100 ha). - Weiterer Entwicklungskorridor auf ca. 300 ha Fläche mit Erhöhung der Grundwasserstände im Moorkörper und entsprechender Anpassung der Grünlandnutzungsintensität. - Altarmanschlüsse, Laufverlängerung von vormals 14,0 km auf 15,4 km; flache, strukturierte und unbefestigte Ufer.	ca. 1.500.000 € Baukosten Alte Nebel ca. 500.000 € Kosten für ein Flurbereinigungsverfahren nach FlurbG ca. 1.700.000 € Baukosten Fischaufstiegsanlage



Abbildung 4

Abschnitt an der Nebel unterhalb von Linstow, links vor, rechts nach Maßnahmendurchführung.
Section of the Nebel near to Linstow, before (left) and after realization of the measures (right).

**Abbildung 5**

Verlegung der Nebel in den Bruchwald bei Linstow, links nach Bauausführung (2009), rechts im Jahr 2015.

Relocating of the watercourse of the river Nebel in a forest near Linstow, after the realization in 2009 (left), in 2015 (right).

**Abbildung 6**

Abschnitte zwischen Linstow und Dobbin, links vor, rechts unmittelbar nach Bauausführung.

Stream sections between the villages Linstow and Dobbin, before (left), and immediately after realization of the measures (right).

**Abbildung 7**

Abschnitte an der Alten Nebel, links vor, rechts unmittelbar nach Maßnahmendurchführung.

Stream sections of the river "Alte Nebel", before (left), and immediately after realization of the measures (right).

Wegen zahlreicher geschützter Lebensräume und Arten, gerade in Niedermoorbereichen, bedurfte es häufig einer intensiven naturschutzfachlichen Betreuung (Umsetzen von Arten, Kontrolle von Sedimentdrift, ökologische Baubegleitung usw.), s. hierzu THIELE et al. (2014).

Betroffene Landeigentümer und -nutzer wurden von Anfang an kooperativ beteiligt. Um die Flächenverfügbarkeit abzusichern, wurde bevorzugt auf die Instrumente der integrierten Landentwicklung und der Bodenordnung gesetzt (MEHL & BITTL, 2005, MEHL et al., 2008, 2011). Insofern erfolgten viele Genehmigungen auf Grundlage des Landwirtschaftsanpassungsgesetzes (LwAnpG) und des Flurbereinigungsgesetzes (FlurbG). Das konzentrierte und letztlich sehr erfolgreiche Zusammenwirken von Wasserwirtschaftsverwaltung und Flurneuordnungsbehörde bildete somit eine zentrale Säule der Nebel-Renaturierung (BITTL & KOLBOW, 2014).

4 Effekte im Hinblick auf den ökologischen Zustand

Der ökologische Zustand in natürlichen Fließgewässer-Wasserkörpern wird nach den Vorgaben der EG-WRRL integrativ mit den biologischen Qualitätskomponenten (QK) ermittelt; unterstützend wirken physikalisch-chemische und hydromorphologische QK (Anhang V EG-WRRL bzw. Oberflächengewässerverordnung, OGewV). Ein reales Problem bei der Umsetzung der EG-WRRL ist, dass nach erfolgten hydromorphologischen bzw. Renaturierungsmaßnahmen häufig nicht unmittelbar bzw. zeitnah eine ökologische Verbesserung nachweisbar ist (BMUB/UBA, 2016). Als mögliche Gründe, die auch an der Nebel partiell zutreffen, sind zu nennen:

- schwere Erreichbarkeit für die Organismen aus naturnahen Bereichen (Refugialräume) wegen hoher Entfernung,
- weiterhin bestehende Wanderungsbarrieren, stoffliche Belastungen, hydrologische Defizite/Belastungen,
- exzessives Aufwachsen von Makrophyten im noch unbeschatteten Fluss,
- erforderliche Zeit für die eigendynamische Entwicklung essentieller Habitatstrukturen, sowohl abiotisch als auch biotisch (Vegetation), und eine entsprechende Wiederbesiedlung,
- Verdrängung standorttypischer Arten durch Neobiota,
- ggf. synökologische Phänomene (Krankheiten, Parasiten, Fressfeinde) sowie
- ggf. auch unzureichende Planung und Umsetzung von Renaturierungsmaßnahmen.

Grundsätzlich kann zunächst das Problem der ökologischen Durchgängigkeit für die Nebel als weitestgehend gelöst angesehen werden. Nur noch oberhalb des Krakower Sees, im Bereich des Wehres Walkmöhl ist diese auf Grund konkurrierender Wassernutzungen (Fischwirtschaft) komplett unterbrochen; hier wird an einer Lösung gearbeitet. Ansonsten weisen die durchgeführten Effizienzkontrollen das Funktionieren der nunmehr fisch- und invertibraten-durchgängigen Umbauten oder Fischaufstiegsanlagen nach.

Die amtlichen biologischen Messstellen sind zumeist nach Wasserkörpern gemäß der EG-WRRL orientiert, so dass mit diesen vielfach nicht die eigentlichen Renaturierungen bewertet werden können. Im Auftrag des Staatlichen Amtes für Landwirtschaft

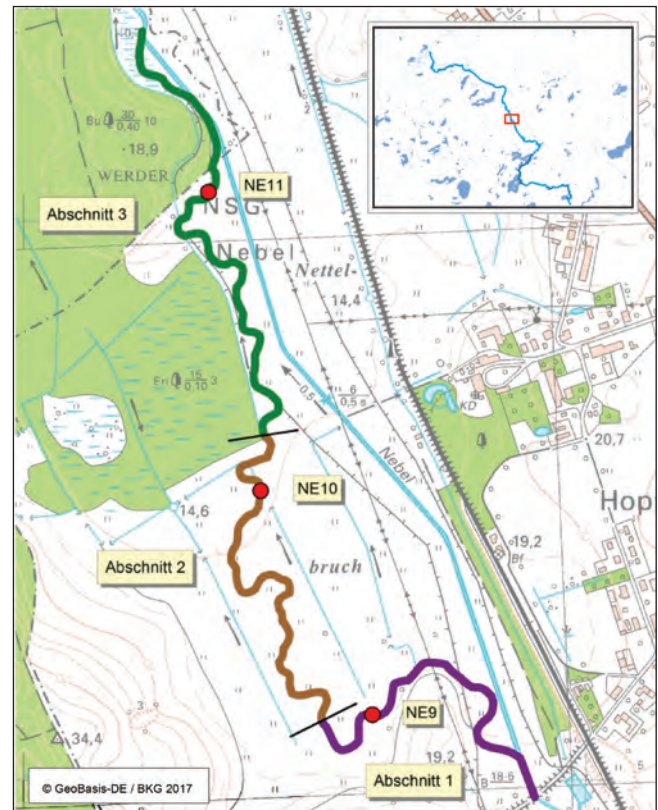


Abbildung 8

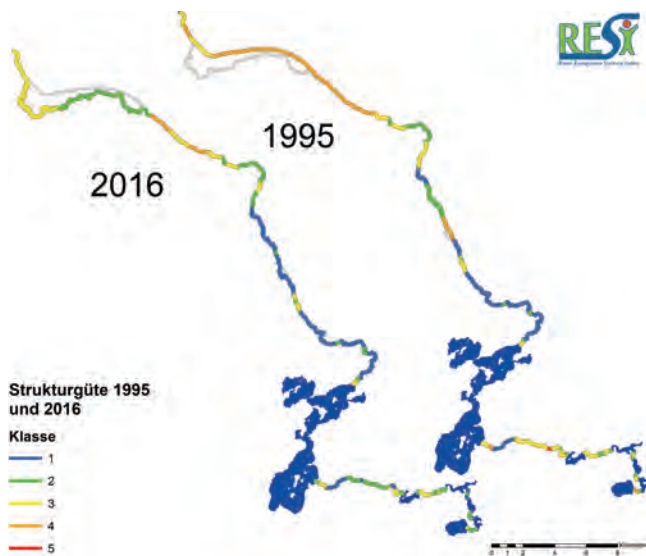
Kartierabschnitte der Fließgewässerstrukturkartierung und Lage der biologischen Monitoringabschnitte (NE 9...11) für Makrophyten, Makrozoobenthos, Ichthyofauna und Lepidopteren, verändert nach THIELE et al. (2015).

Mapping sections of the hydromorphological structural mapping and location of the biological monitoring sections (NE 9...11) for macrophytes, macrozoobenthos, ichthyofauna and lepidoptera, modified according to THIELE et al. (2015).

und Umwelt Mittleres Mecklenburg wurden jedoch beispielsweise für die Maßnahme bei Hoppenrade mehrjährige Effizienzkontrollen an drei repräsentativen Probestellen durchgeführt (BIOTA, 2014), so dass an diesem Beispiel auch die Auswirkungen auf die biologischen und auch die hydromorphologischen Qualitätskomponenten kurz beschrieben werden können (Abb. 8, vgl. ausführlich THIELE et al., 2015, MEHL & THIELE, 2017).

In den 10 Jahren seit Maßnahmenumsetzung haben sich in diesem Bereich sehr positive ökologische Veränderungen vollzogen. Diese hängen insbesondere mit der hydraulisch induzierten Substratsortierung im Gewässer, der Ausbildung typspezifischer Habitatstrukturen (Kolke, Erosionsufer, Akkumulationsstrecken etc.) und der forcierten Gehölzbestockung in einer bis zu 100 m breiten Sekundärraue zusammen. Im Ergebnis ist sowohl im Gewässer als auch in der Aue eine deutlich verbesserte biologische Güte nachweisbar. Hinsichtlich Fließgewässerstruktur und Morphologie konnten alle untersuchten Bereiche bereits als „sehr gut“ eingestuft werden.

Bei Makrophyten, Makrozoobenthos, Ichthyofauna und Lepidopteren verlief die Besiedlung trotz standorttypischer Artenausstattung unter- und oberhalb des sanierten Abschnittes des Gewässers in den ersten drei Jahren sehr ungerichtet. Spätestens

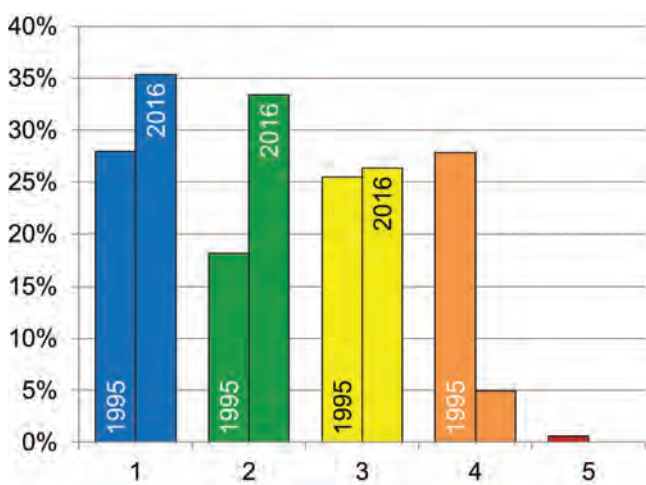
**Abbildung 9**

Klassifizierung der Fließgewässerstruktur der Nebel auf Grundlage der Daten und Methodik von BIOTA (1994, 1995); Vergleich der Jahre 1995 und 2016.

Results of the classification of the hydromorphological conditions of the river Nebel according to data and methodology of BIOTA (1994, 1995); Comparison of the years 1995 and 2016.

5 Jahre nach Sanierungsende hatte sich aber eine standorttypische Biozönose eingestellt. Ab dem 6. Jahr war sie weitestgehend typspezifisch ausgeprägt, so dass heute überwiegend gute bis sehr gute ökologische Einstufungen (Güteklassen 1 und 2) erreicht werden.

Die o. g. Gründe, die vielfach dem zeitnahen Erfolg von Renaturierungsmaßnahmen entgegenstehen, spielen für den hier vorgestellten Renaturierungsabschnitt keine oder nur eine untergeordnete Rolle. Dies lässt sich vornehmlich auf eine Planung und deren Umsetzung zurückführen,

**Abbildung 10**

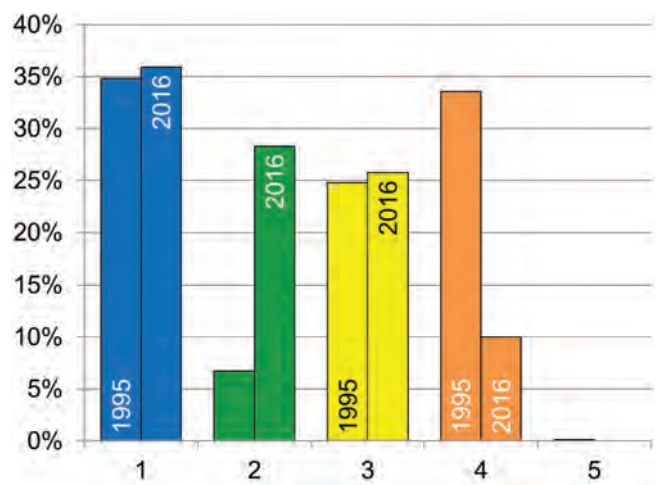
Anteile an der Fließstrecke der Nebel bezüglich Klassifizierung der Fließgewässerstruktur (Gesamt), Vergleich 1995 bis 2016.

Percentages of hydromorphological classes (total) of the river Nebel, comparing the years 1995 to 2016.

- die auf die bereits sehr weitgehende Schaffung naturnaher morphologischer Strukturen und die Ermöglichung eigendynamischer Prozesse ausgerichtet waren,
- die unmittelbar ober- und unterhalb gelegenen naturnahen Bereiche ohne explizite Wanderungshindernisse und die damit schnelle Erreichbarkeit für einwandernde Organismen berücksichtigte sowie
- eine sehr rasche und auch beschattungswirksame Vegetationsentwicklung erreichte (durch gezieltes Schaffen von Rohboden wurde das hohe Regenerationspotenzial autochtoner Gehölze und Pflanzengesellschaften genutzt).
- Zudem bilden die sehr gute physikalisch-chemische Güte und eine relative naturnahe hydrologische Dynamik weitere essentielle Faktoren.

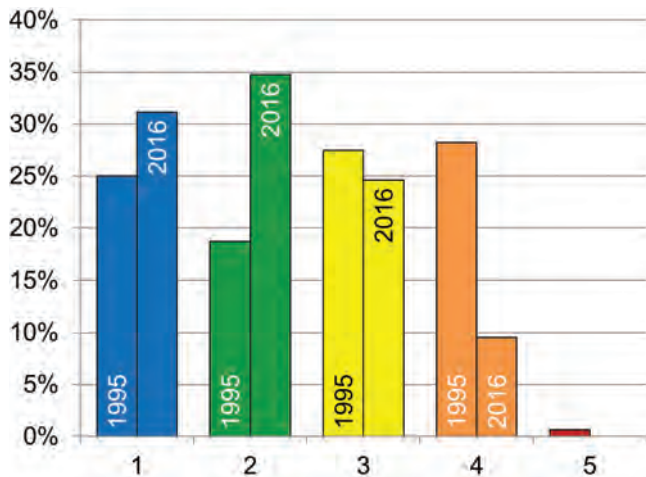
Eine gute und für die Nebel vollständige Vergleichsmöglichkeit des morphologischen Zustandes vor und nach den Renaturierungsmaßnahmen bietet auch die Fließgewässerstrukturgütekartierung, da durch BIOTA (1994) bereits seinerzeit mit einem annähernd der heutigen Methodik entsprechenden Parametersatz kartiert wurde und auch die Auswertung als adäquat angesehen werden kann (u. a. bereits 5-stufige Klassifizierungsskala wie bei der EG-WRRL). Um eine Vergleichsbasis zu erhalten, wurde die Nebel im Jahr 2016 mit dieser Methodik neu kartiert (Abb. 9).

Hiernach zeigt sich infolge der Renaturierung auf vielen Teilstrecken eine deutliche Verbesserung des morphologischen Zustandes (Abb. 10 bis 13). Von im Jahr 1995 ca. 46 % der Gewässerstrecke mit sehr guter und guter Gesamtklassifizierung verändert sich das Ergebnis im Jahr 2016 auf ca. 68 %, was einer Zunahme von fast 50 % der Fließstrecke entspricht. Am deutlichsten bemerkbar machen sich die Veränderungen in den Klassifizierungen der Sohle (Klasse 1 und 2 in 1995: ca. 42 %, in 2016: 64 %) und des Ufers (Klasse 1 und 2 in 1995: ca. 44 %, in 2016: 65 %). Wegen der langen Entwicklungszeit standorttypischer Landvegetation ist das Ergebnis für das Kompartiment „Land“ (noch) nicht so deutlich.

**Abbildung 11**

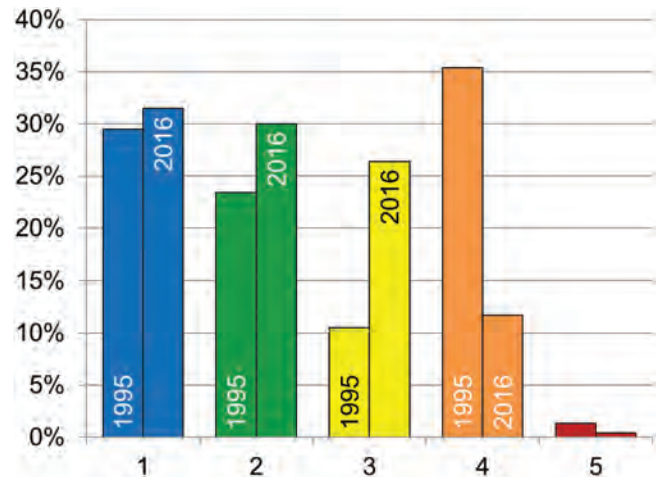
Anteile an der Fließstrecke der Nebel bezüglich Klassifizierung der Fließgewässerstruktur (Sohle), Vergleich 1995 bis 2016.

Percentages of hydromorphological classes (river bed) of the river Nebel, comparing the years 1995 to 2016.


Abbildung 12

Anteile an der Fließstrecke der Nebel bezüglich Klassifizierung der Fließgewässerstruktur (Ufer), Vergleich 1995 bis 2016.

Percentages of hydromorphological classes (river banks) of the river Nebel, comparing the years 1995 to 2016.


Abbildung 13

Anteile an der Fließstrecke der Nebel bezüglich Klassifizierung der Fließgewässerstruktur (Land/Umfeld), Vergleich 1995 bis 2016.

Percentages of hydromorphological classes (surrounding land) of the river Nebel, comparing the years 1995 to 2016.

Im Unterlauf wirkt sich erwartungsgemäß der Routenwechsel von Güstrow-Bützow-Kanal auf Alte Nebel bezüglich der Strukturgüte sichtbar aus (Abb. 9). Infolge der Maßnahme wird das Gros des Abflusses über die Alte Nebel geführt; der Kanal wird nur noch mit einer Mindestwasserführung beaufschlagt.

5 Wirkungen im Hinblick auf Ökosystemleistungen

5.1 Konzept der Ökosystemleistungen

Der Begriff Ökosystemleistungen (ÖSL) steht für den Nutzen, den der einzelne Mensch oder die Gesellschaft aus ökosystemaren Prozessen zieht. Ökologisch funktionsfähige und damit mindestens naturnahe Fließgewässer und Auen stellen zahlreiche Funktionen und Leistungen für die Gesellschaft zur Verfügung, darunter eine Vielzahl öffentlicher Güter (TOCKNER & STANFORD, 2002; TREPEL, 2009; POSTHUMUS et al., 2010; SCHOLZ et al., 2012; MEHL et al., 2013). Gerade aber der sich daraus ergebende hohe gesellschaftliche Wert (monetär sowie auch nicht-monetär) war in der Vergangenheit eher nicht im Blickfeld gesellschaftlicher Entscheidungen (DEHNHARDT et al., 2015, 2016; ALBERT et al., 2017). Vielmehr wurden an Flüssen und in Auen überwiegend einseitig vorteilhafte Nutzungen präferiert, welche letztlich die ökologische Funktionsfähigkeit beeinträchtigt haben. So sind nach dem Auenzustandsbericht, mit dem erstmals für insgesamt 79 Flüsse Deutschlands eine Übersicht zum Auenverlust und zur Landnutzung der rezenten Auen und Altauen vorliegt, zwei Drittel der ehemaligen Überschwemmungsgebiete durch Deichbau und andere Hochwasserschutzmaßnahmen verloren gegangen (BRUNOTTE et al., 2009). Der Grund liegt vor allem darin, dass Auen Schwerpunkte der Siedlungs- und Wirtschaftsentwicklung darstellen sowie umfassenden wasser- und kulturbaulichen Maßnahmen unterlagen (EHLERT & NEUKIRCHEN, 2012).

Aufbauend auf den Basisleistungen sind als Grundlage aller anderen, für den Menschen nutzenstiftenden Leistungen drei Typen von ÖSL für die Fließgewässer und deren Auen zu unterscheiden:

- (1) Versorgungsleistungen, z. B. Bereitstellung von Gütern wie Trink- und Brauchwasser, Nahrung, Rohstoffe,

- (2) Regulationsleistungen, z. B. Selbstreinigung, Abführung von Hochwasser (Minderung von Naturgefahren/Hochwasserschutz), Klimaregulation,
- (3) kulturelle Leistungen im Sinne von Landschafts- und Gewässerbild, Spiritualität und Inspiration, Freizeit- sowie Bildungsmöglichkeiten.

5.2 Material und Methoden

5.2.1 Grundlagen

Das ReWam-Verbundprojekt RESI „River Ecosystem Service Index“ (www.resi-project.info) zielt auf eine sektorenübergreifende, funktionsbasierte Ökosystemleistungs-Bewertung von Flüssen und ihren Auen ab. Den wesentlichen Ansatzpunkt für die Operationalisierung des ÖSL-Konzepts im RESI-Vorhaben bildet die Wirkungskaskade von natürlichen Strukturen und Prozessen, ökologischen Funktionen, ÖSL und menschlichem Wohlbefinden (DE GROOT et al., 2010). Die Analyse von Ökosystemfunktionen und -leistungen ist aber in hohem Maße von belastbaren Daten abhängig.

Da die in der Natur ablaufenden Prozesse dynamisch und komplex sind und im Detail kaum erfasst werden können, muss bei der Untersuchung größerer Landschaftsräume auf geeignete und skalengerechte Indikatoren gesetzt werden. Ergebnisse werden somit häufig mit vergleichsweise einfachen Ansätzen modelliert. Darauf basierende Bewertungen tragen insofern abschätzenden Charakter.

Der RESI soll als Index eine vergleichende Bewertung der ÖSL sowohl zwischen verschiedenen Flussauenabschnitten, als auch unter verschiedenen anthropogenen Belastungsbedingungen ermöglichen. Er soll, quantifiziert und skaliert, sowohl die einzelnen ÖSL als auch eine Gesamtbewertung abbilden. Hauptziel bildet mithin eine nützliche Erweiterung der Entscheidungsgrundlagen (ALBERT et al., 2017) für nachhaltige Nutzungen der Flüsse und Auen. Besondere Bedeutung könnte dem RESI auch als zusätzliches Instrumentarium einer Erfolgsmessung von Renaturierungen und anderen Maßnahmen des Gewässer- und Auenschatzes zukommen.

Tabelle 3 Fünfstufige Skalierung bei der Bewertung der Ökosystemleistungen. <i>Five-tiered scaling in the assessment of ecosystem services.</i>		
Klasse	Ökosystemleistung	Wertebereich der typabhängigen, relativen Ökosystemleistung (0 - 100 %)
5	Sehr hoch	> 80 %
4	Hoch	> 60 % bis ≤ 80 %
3	Mittel	> 40 % bis ≤ 60 %
2	Gering	> 20 % bis ≤ 40 %
1	Sehr gering bis fehlend	0 bis ≤ 20 %

Die Bewertung der Ökosystemleistungen erfolgt beim RESI 5-stufig auf der Basis einer linearen Skalierung zwischen 0 und 100 % bereitgestellter ÖSL (Tab. 3). Dabei ist die Skala gegenüber der Skala der EG-WRRL entgegengesetzt ausgerichtet (einheitliche Konvention im RESI-Vorhaben).

Um zu berücksichtigen, dass sich Fließgewässer und Auen bei den verschiedenen regulativen ÖSL im Hinblick auf die absoluten Beiträge stark unterscheiden, wird die Gewässer- und die Auentypabhängigkeit fallweise direkt oder indirekt berücksichtigt. Hierzu werden bereits typabhängige Daten (z. B. im Hinblick auf Fließgewässerstrukturgüte oder Auenzustand) oder flächennormierte Ansätze verwendet (Leistung je Flächeneinheit). Eine Monetarisierung wird generell nur durchgeführt, sofern eine tatsächliche (Aus-)Nutzung der ÖSL durch den Menschen unterstellt werden kann.

Im RESI-Vorhaben wird aktuell u. a. analysiert, wie sich Veränderungen der ÖSL bei geplanten sowie bei umgesetzten Renaturierungen darstellen. Die Nebel bildet ein RESI-Fallbeispiel, für das nachfolgend Methoden und Ergebnisse zu folgenden ausgewählten regulativen ÖSL vorgestellt werden:

Tabelle 4 Wesentliche Datengrundlagen zur Bestimmung der Ökosystemfunktionen. <i>Essential data bases for the determination of ecosystem functions.</i>			
Sektor	Grundlage	Stand	Quelle
Gewässeroute	Gewässernetz M-V: Gewässerrouten	2016	GeoBasis-DE/M-V (2017)
Topographische Karten	Historische topographische Karten 1 : 25 000 Normalblattschnitt (TK25-N)	1990	GeoBasis-DE/M-V (2017)
	WebAtlasDE.light	2016	GeoBasis-DE/BKG (2017)
Boden	Analyse des Bodenpotentials (Bodenfunktionsbereiche)	1993 bis 1996	GeoBasis-DE/M-V (2017)
Landnutzungsdaten	Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland (LBM-DE)	2012	GeoBasis-DE/BKG (2017)
	Biotop- und Nutzungstypenkartierung Mecklenburg-Vorpommern	1991	GeoBasis-DE/M-V (2017)
Hochwasserregulation	DGM 10: Digitales Geländemodell der Auflösung 10 m x 10 m	2006 bis 2012	GeoBasis-DE/BKG (2017)
Hydrometeorologie	Klimadaten nahegelegener Klima- und Niederschlagsstationen	2016	Deutscher Wetterdienst (2016), Homepage
Fließgewässerstrukturgüte	Altdaten und Neukartierung nach gleicher Methodik (2016)	1994 und 2016	BIOTA (1994, 1995)

- Rückhalt von Treibhausgasen bzw. Kohlenstoffsequestrierung
- Hochwasserregulation
- Niedrigwasserregulation
- Sedimentregulation
- Bodenbildung in Auen
- Kühlwirkung (Gewässer und Auenböden)

Für den zeitlichen Vergleich wurden die Jahre 1990 (vor den Renaturierungsmaßnahmen) und 2016 (aktuell) gewählt (s. Kapitel 3).

5.2.2 Datengrundlagen

Die genutzten Datengrundlagen (Tab. 4) variieren zeitlich etwas in Bezug auf die beiden Vergleichsjahre; die Abweichungen sind aber vernachlässigbar, weil die Daten dessen ungeachtet für die Landschafts- und Gewässerverhältnisse der Jahre 1990 und 2016 repräsentativ sind.

5.2.3 Räumliche Differenzierung

Analog zu BRUNOTTE et al. (2009) wurde die Nebel mit ihrem Auenraum in 57 orthogonal geschnittene 1-km-Segmente untergliedert; durchflossene Seen sind dabei integriert worden. Die sich ergebenden 57 Auensegmente bilden die räumliche Bezugsbasis für die nachstehenden Auswertungen (Abb. 14). Gegenüber der stärker schwingenden Fließstrecke der Nebel (ca. 70 km) ist die Länge der Auen mit maximal 57 km natürlich kürzer.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Ökosystemleistung „Rückhalt von Treibhausgasen/ Kohlenstoffsequestrierung in Mooren“

An der Nebel dominieren Niedermoore in den Auen. Moore bilden eine der wichtigsten globalen Ökosystemtypen im Zusammenhang mit der Verstärkung oder Verminderung des globalen Treibhauseffektes. Zwischen 329 und 550 Mrd. t Kohlenstoff sind nach Schätzungen von BRIDGHAM et al. (2006, 2008), KAAT & JOOSTEN (2008) und PARISH et al. (2008) in Mooren gebunden, dies entspricht bis zu 30 % des globalen, in Böden gebundenen Kohlenstoffes (BATJES, 1996). Moore sind aber auf Grund natürlicher und anthropogen induzierter Prozesse auch verantwortlich für ca. 10 % der globalen Methanemissionen (BARTLETT & HARRISS, 1993); gerade entwässerte und genutzte Moore müssen als ein bedeutender Emittent der unterschiedlich wirksamen Treibhausgase (THG) Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) betrachtet werden. Wasserstände und Nutzungen sind damit prozessbestimmend (SUCCOW & JOOSTEN, 2001).

Als Indikator für die THG-Emission in der morphologischen Aue wurden die



Abbildung 14

Gebildete Auensegmente/-abschnitte an der Nebel.
Formed segments/sections of floodplain on the river Nebel.

Emissionsfaktoren für Moor- und Nutzungstypen nach HÖPER (2007), modifiziert von SCHÄFER (2009), entsprechend Tabelle 5 verwendet. Datengrundlagen sind Landnutzungsformen, Grundwasserflurabstände, Geologie und Böden sowie Raum der Wasserwechselzone. Die Typabhängigkeit des einzelnen Auenabschnittes wird durch die Moorflächenanteile berücksichtigt. Eine kostenbasierte ökonomische Bewertung erfolgt auf der Basis von Schadenskosten (externe Umweltkosten). Hier können 80 € t⁻¹ CO₂ nach der Methodenkonvention des Umweltbundesamtes als Best-Practice-Kostensatz angesetzt werden (SCHWERMER et al., 2014).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Freisetzung der Treibhausgase (THG) in vielen Auensegmenten infolge der Renaturierungsmaßnahmen abgenommen hat, besonders stark im Unterlauf

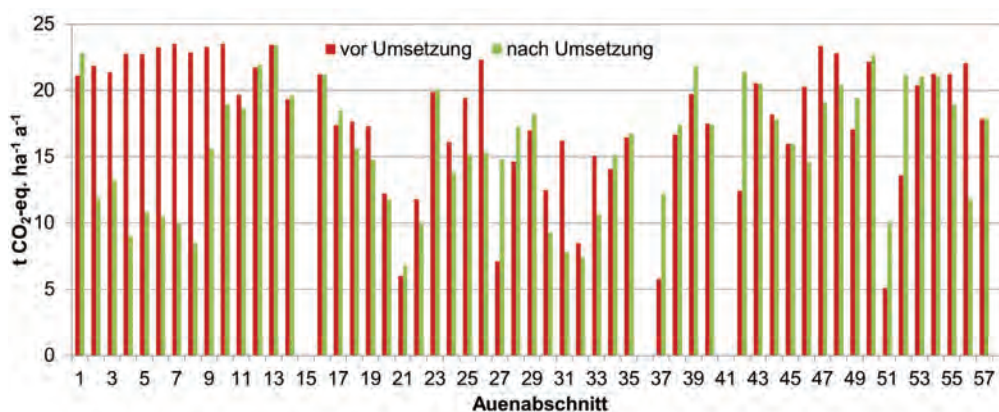


Abbildung 15

Freisetzung von THG in den Auensegmenten der Nebel in Tonnen CO₂-Äquivalent je ha und Jahr (Fließrichtung von rechts nach links).
Release of greenhouse gases in the floodplain segments of the Nebel in tons of CO₂ equivalent per hectare and year (flow direction from right to left).

Tabelle 5

Globales Erwärmungspotenzial (GWP100) unterschiedlicher Nutzungsformen auf Moorböden in der morphologischen Aue, Grundlage sind die GWP100-Ansätze nach HÖPER (2007) und SCHÄFER (2009), eq = Äquivalent, leicht geändert nach SCHOLZ et al. (2012).
Global warming potential (GWP100) of different uses on moor soils in the morphological floodplain, based on the GWP100 approaches according to HÖPER (2007) and SCHÄFER (2009), e = equivalent, slightly modified according to SCHOLZ et al. (2012).

Landnutzung aus Basis-DLM	Zugeordneter Niedermoor-Nutzungstyp	GWP100 in kg CO ₂ eq ha ⁻¹ a ⁻¹
Acker	Acker	24.000 *
Feuchtgebiete	Naturnah/ungenutzt	4.921
Gewässer	Ohne GWP	0
Grünland	Gründland	23.678
Siedlung	Sonstige	17.835
Vegetationslos	Sonstige	17.835
Wald	Forst	17.835

* nach SCHÄFER (2009), basierend auf COUWENBERG et al. (2008)

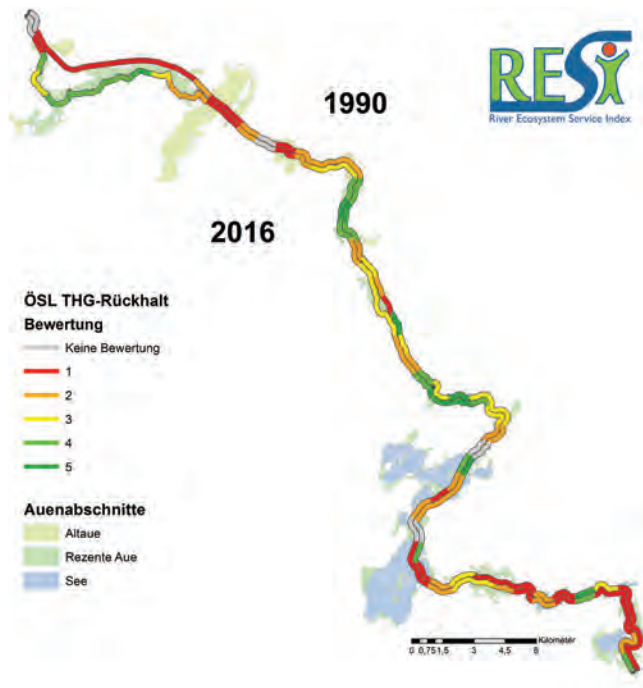
infolge der Renaturierung der Alten Nebel (Abb. 15 und 16). In den Auensegmenten an den oberen Nebelseen sind die Werte des Jahres 2016 im Vergleich zu 1990 teilweise leicht erhöht. Dies ist insofern plausibel, da der Wasserstand von Beginn der 1990er-Jahre bis zumindest ca. 2009 beispielsweise im Orthsee klimatisch bedingt um ca. 2 Dezimeter gefallen ist und zusätzlich Verlandungstendenzen wirken. Der größere Flächenumfang an randlichen Feuchtgebieten vergrößert damit die THG-Freisetzung.

Insgesamt führen die Renaturierungsmaßnahmen an der Nebel zur deutlichen Reduktion der THG-Freisetzung: 1990: 46.711 t a⁻¹ CO₂-Äquivalent, 2016: 37.748 t a⁻¹ CO₂-Äquivalent. Dies drückt sich in einer sehr deutlichen Schadenskostenreduktion von ca. 720.000 € je Jahr aus.

5.3.2 Ökosystemleistung „Hochwasserregulation“

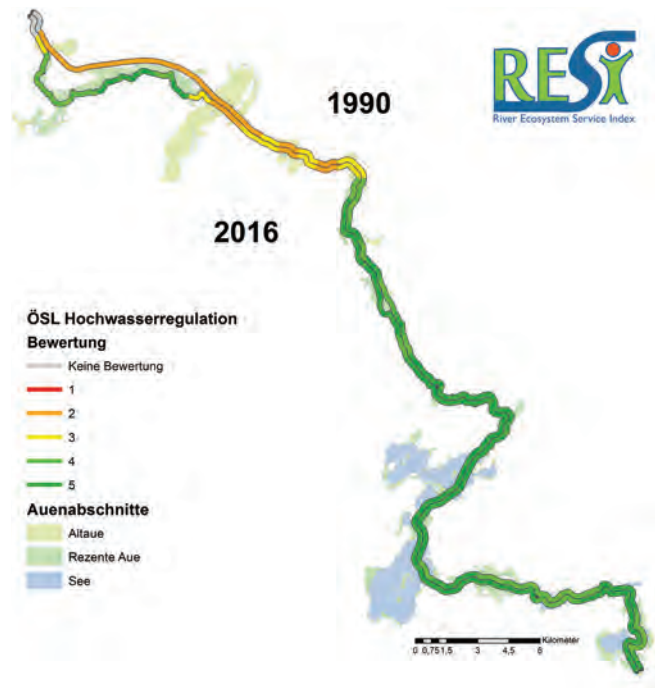
Die Hochwasserregulation ist eine bedeutsame Ökosystemleistung der Fließgewässer und ihrer Auen. Die wesentlichen Leistungen bestehen in der Bereitstellung von Überschwemmungsräumen und der Dämpfung der Fließgeschwindigkeit infolge natürlicher Rauheit. 70 % der Flussauen der 79 größten deutschen Flüsse sind als Überschwemmungsflächen aber nicht mehr vorhanden (BRUNOTTE et al., 2009).

Gerade naturnahe Fließgewässer und Auen können jedoch eine wichtige Rolle bei der Anpassung an den Klimawandel spielen, da sie Hochwasser in der Fläche zurückhalten und den Abfluss verzögern. Eine naturnahe Entwicklung von Fließgewässern und die Erhaltung und

**Abbildung 16**

Klassifizierte ÖSL „THG-Rückhalt“ an der Nebel im Jahr 1990 (rechtes Band) und 2016 (linkes Band).

Classified ecosystem service “Greenhouse gas retention” in the area of the river Nebel in the year 1990 (right line) and in 2016 (left line).

**Abbildung 17**

Klassifizierte ÖSL „Hochwasserregulation“ an der Nebel in den Jahren 1990 und 2016.

Classified ecosystem service “Flood regulation” in the area of the river Nebel in the years 1990 (right line) and in 2016 (left line).

Schaffung bzw. Rückgewinnung von Retentionsräumen sind daher als bedeutsame Anpassungsstrategie an den Klimawandel anzusehen (ZEBISCH et al., 2005), vor allem vor dem Hintergrund des vorsorgenden Hochwasserschutzes (vgl. § 77 WHG).

Liegen keine hydraulischen Modellierungsdaten vor, dann müssen zur Bewertung der Hochwasserregulation zwangsweise einfache Ansätze genutzt werden (SCHOLZ et al., 2012; MEHL et al., 2013). Für die Auensegmente an der Nebel wurde auf zwei Methoden zurückgegriffen.

Als erster Indikator wurde das Verhältnis des Hochwasservolumens der rezenten zu demjenigen der morphologischen Aue genutzt (vgl. ähnlichen Ansatz bei GLEASON & LABHAN, 2008). Bestehen keine Abdeichungen, Verwallungen oder Beeinträchtigungen durch Infrastrukturanlagen (z. B. Straßendämme), dann ist das Hochwasservolumen praktisch unbeeinträchtigt.

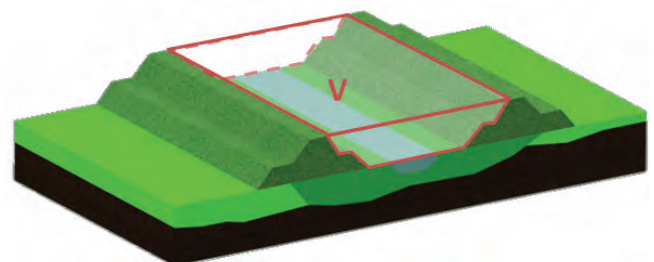
Zentrale Datengrundlage für alle Berechnungen bildet das digitale Geländemodell. In der rezenten Aue ergibt sich der Raum über die Differenzen des digitalen Geländemodells der Höhe (H) der Deiche und Dämme (Kronenhöhe) und der Höhe bei mittlerem Wasserstand sowie der Länge des Auensegments (Abb. 18). In der morphologischen Aue wird die Grenze der morphologischen Aue pragmatisch als Höhendatensatz interpretiert.

Diese Ökosystemleistung „Hochwasserrückhaltevolumen“ nimmt im zeitlichen Vergleich praktisch allein im Bereich der Alten Nebel zu, da hier gegenüber dem Güstrow-Bützow-Kanal eine deutliche Laufverlängerung und Wiedererschließung größerer Teile der ehemaligen morphologischen Aue durch die Maßnahmenumsetzung zu konstatieren ist.

Der Hochwasserrückhalteraum an der Nebel beträgt nach dieser Abschätzung für das Jahr 1990 ca. 44.562.280 m³ und für das Jahr 2016 ca. 51.534.561 m³, was einer Zunahme von rd. 16 % entspricht.

Monetär lässt sich diese Ökosystemleistung plausibel über die Ersatzkosten einer technischen Rückhaltung über volumengleiche (ungesteuerte) Polder abbilden. Als Kostensatz wurde ein Wert von 25,- €/m³ angesetzt, was dem Mittelwert für Erdbau, Bodenverbringung, Planung und Untersuchung aus umgesetzten regionalen Vorhaben entspricht. Nicht berücksichtigt werden hingegen Kosten für eine Flächenverfügbarkeit (im Regelfall Erwerb). Auch weitere mögliche Kosten sind zunächst schwer prognostizierbar. Deshalb stellt der o. g. Kostensatz eher eine Annahme minimaler Kosten dar.

Die Differenzbetrachtung der Volumina in 1990 und in 2016 ergibt so einen monetären Vorteil in Höhe von 174 Mio. €. Relevante Hochwasserrisikoabschnitte nach der Hochwasserrisiko-

**Abbildung 18**

Volumenbestimmung (V) in der rezenten Aue.
Volume determination (V) in the recent floodplain.

management-Richtlinie (HWRM-RL) sind im Gewässersystem unterhalb der Gewässerabschnitte der Warnow bei Bützow und bei Schwaan zu lokalisieren (MEHL et al., 2014). Die hohe mögliche Mengenableitung über den Abschlag/die Fischaufstiegsanlage bei Parum (Güstrow-Bützow-Kanal/Alte Nebel) wirkt im Übrigen auch nach oberhalb (Stadt Güstrow) hydraulisch verbessernd, weil der Kanal seine hydraulische Leistungsfähigkeit behalten hat. Somit wird hier eine ÖSL bereitgestellt, die jedoch ober- und unterhalb genutzt wird. Der Einfluss solcher Leistungen ist damit nicht nur bedeutsam für landschaftliche Prozesse, sondern zeigt die Vorteile systemübergreifenden Gewässermanagements gerade für den Hochwasserschutz auf.

Als weiterer Indikator wurde der Mittelwert der Klassifizierungen für Ufer, Sohle und Land der Fließgewässerstrukturgüte (s. o.) verwendet, da die Strukturgütedaten die hydraulischen Einflüsse auf die Rauigkeit und damit die Fließgeschwindigkeit bzw. die Wellenabflachung (Scheiteldämpfung) hilfsweise abbilden.

Bei der abschließenden Bewertung wurden die Klassifizierungsergebnisse beider Ansätze gemittelt (arithmetisches Mittel), um das hydraulische Zusammenwirken darzustellen (Abb. 17). Die Gewässer-/Auentypabhängigkeit einer Bewertung wird in diesem Fall durch die Ausgangsdaten abgesichert (Strukturgüte, ggf. Auenzustandsklasse).

5.3.3 Ökosystemleistung „Niedrigwasserregulation“

Vor allem die Querschnittsform und die hydraulische Rauigkeit, gerade auch infolge von Bewuchs, sowie die Lauflänge bzw. das

Krümmungsverhalten bestimmen darüber, wie sich Gewässer in Niedrigwassersituationen verhalten. Alle hydraulischen Faktoren, die zu einer Dämpfung des mit Niedrigwasser einhergehenden Wasserstandsabfalls beitragen, sind für den Menschen eher vorteilhaft. So kann z. B. eine verringerte bzw. verzögerte Grundwasserabsenkung in den Auen zu besserer Bodenwasserversorgung und damit stabileren Erträgen in der Land- und Forstwirtschaft beitragen.

Als Indikator wurde der Mittelwert aus den Klassifizierungen für Ufer und Sohle der Fließgewässerstrukturgüte berechnet. Die Gewässer-/Auentypabhängigkeit einer Bewertung wird auch in diesem Fall durch die Ausgangsdaten abgesichert (Strukturgüte). Die Ergebnisse zeigen, dass die Renaturierungsmaßnahmen deutliche Verbesserungen bringen (Abb. 19). Eine monetäre Bewertung kann zusammen mit der Ökosystemleistung „Sedimentregulation“ über die Ersatzkostenmethode und entsprechende Renaturierungskosten erfolgen (s. im Weiteren).

5.3.4 Ökosystemleistung „Sedimentregulation“

Zum Sediment wird die an der Gewässersohle transportierte Bodenfracht (Geschiebe) und die in Suspension transportierte Schwebstofffracht gezählt (vgl. zu den Definitionen z. B. DWA-M 525, 2012). Welche Korngrößen transportiert oder abgelagert werden, hängt entscheidend von den hydrodynamischen Verhältnissen ab (Fließgeschwindigkeit, Sohlschubspannung). Schwebstoffe werden durch die Turbulenz der Strömung in Suspension gehalten. In einem ungestörten, über lange Zeiträume entwickelten, naturnahen Fließgewässer stellt sich dabei ein morphologisches Gleichgewicht ein. Das heißt, dass bei Betrachtung eines ausreichend langen, der hydrologischen Dynamik gerecht werdenden Zeitfensters von mindestens 5 bis 10 Jahren eine ausgeglichene Bilanz zwischen den externen Sedimenteinträgen, der gewässerinternen Erosion und Akkumulation sowie den Sedimentausträgen an der Mündung zu erwarten ist (MANGELSDORF & SCHEURMANN, 1980).

Diese Verhältnisse werden indirekt auch durch sehr gute gewässerstrukturelle Verhältnisse angezeigt. So gibt z. B. das Krümmungsverhalten eines Gewässers Aufschluss über seinen morphologischen Entwicklungsstand, mit anderen Worten über seine „Reife“ (MEHL, 2006). Auch die Kolk-zu-Kolk-Abstände bzw. die Ausprägung von Kolken und Furten sind entsprechende Indizien (HARNISCHMACHER, 2002; DWA-M 526, 2015). Deshalb kann ersatzweise die ÖSL

Tabelle 6

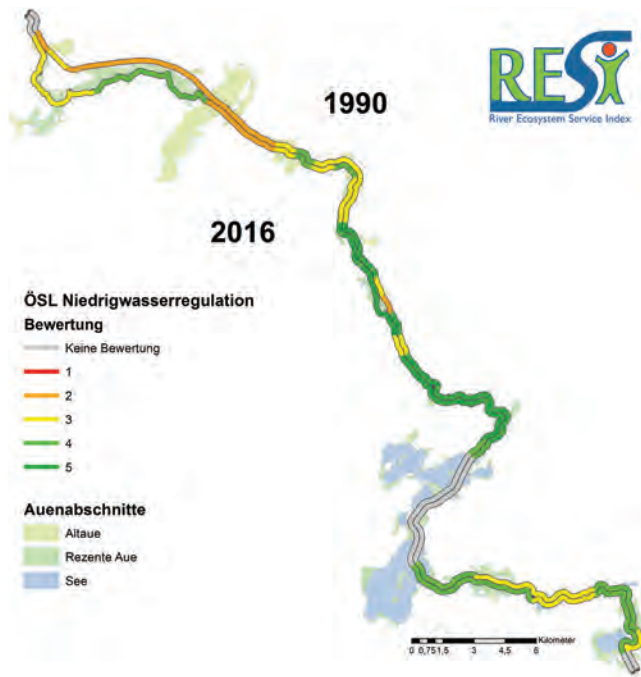
Abgeschätzte Renaturierungskosten für die Nebel nach Größenordnungen (je km Lauflänge).
Estimated restoration costs for to the river Nebel according to size of waterbody (per km watercourse length).

Kostenposition	Kleines Gewässer	Mittleres Gewässer	Mittelgroßes Gewässer
Sohlbreite	< 2 m	≥ 2 bis < 5 m	≥ 5 m
Aushubmengen je laufenden Meter	ca. 8 m ³	ca. 15 m ³	ca. 25 m ³
Baukosten brutto	159.600 €	223.600 €	307.100 €
Planungskosten brutto	65.600 €	81.600 €	100.300 €
Begleituntersuchungen/-arbeiten brutto	24.400 €	24.400 €	24.400 €
Summe brutto	249.600 €	329.600 €	431.800 €

Tabelle 7

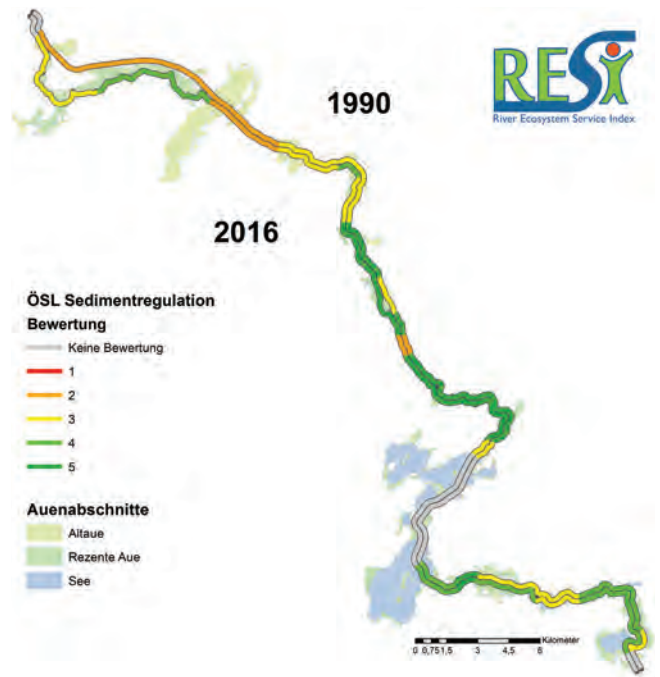
Berechnung der Ersatzkosten entsprechend der Differenz „Strukturgütekategorie 5 zur -kategorie 1“, der Gewässergröße, der Renaturierungskosten sowie der Lauflänge.
Calculation of the replacement costs according to the difference „class 5 to class 1“, water body size, restoration costs and length of the water course.

Güteklassendifferenz (Kostenansatz)	Gewässergröße	Ersatzkosten € pro m	Lauflänge in m	Renaturierungskosten
keine	klein	-	3.226	-
keine	mittel	-	3.081	-
keine	mittelgroß	-	29.140	-
1 (25 %)	klein	62,40 €	615	38.376 €
1 (25 %)	mittel	82,40 €	3.923	323.255 €
1 (25 %)	mittelgroß	107,95 €	5.790	625.031 €
2 (50 %)	mittelgroß	215,90 €	11.518	2.486.674 €
3 (75 %)	mittelgroß	323,85 €	3.847	1.245.851 €
			Gesamt	4.719.187 €

**Abbildung 19**

Klassifizierte ÖSL Niedrigwasserregulation an der Nebel in den Jahren 1990 und 2016.

Classified ecosystem service "Low water regulation" in the area of the river Nebel in the years 1990 (right line) and 2016 (left line).

**Abbildung 20**

Klassifizierte ÖSL Sedimentregulation an der Nebel in den Jahren 1990 und 2016.

Classified ecosystem service "Sediment regulation" in the area of the river Nebel in the years 1990 (right line) and 2016 (left line).

Sedimentregulation im Hinblick auf den gewässerinternen Sedimenthaushalt über die Naturnähe morphologischer Strukturen indiziert werden. Als Indikator wurde die Klassifizierung für „Sohle“ der Fließgewässerstrukturgüte verwendet. Die Gewässer-/Auentypabhängigkeit einer Bewertung wird in diesem Fall wiederum durch die Ausgangsdaten abgesichert (Strukturgüte). Auch hier zeigen die Ergebnisse, dass die Renaturierungsmaßnahmen wirken (Abb. 20).

Für die Monetarisierung von Niedrigwasser- sowie Sedimentregulation kann auf die Ersatzkostenmethode zurückgegriffen werden. Hierzu wurden die Renaturierungskosten zur Erreichung des sehr guten hydromorphologischen Zustands ins Verhältnis zum jeweiligen Ausgangszustand gesetzt. Bei einer Differenz „Strukturgütekategorie 5 zur -klasse 1“ wurden 100 % der Renaturierungskosten veranschlagt, 75 % bei Klasse 4, 50 % bei Klasse 3 und 25 % der Kosten bei Klasse 2. Die Renaturierungskosten wurden für die Nebel nach der jeweiligen Gewässergröße ohne Spezialbauwerke wie z. B. Fischaufstiegsanlagen und ohne die integrierten Seen abgeschätzt (Tab. 6). Hiernach ergibt sich summarisch ein Unterschiedsbetrag vom Jahr 1990 zu 2016 in Höhe von 4,7 Mio. € (Tab. 7).

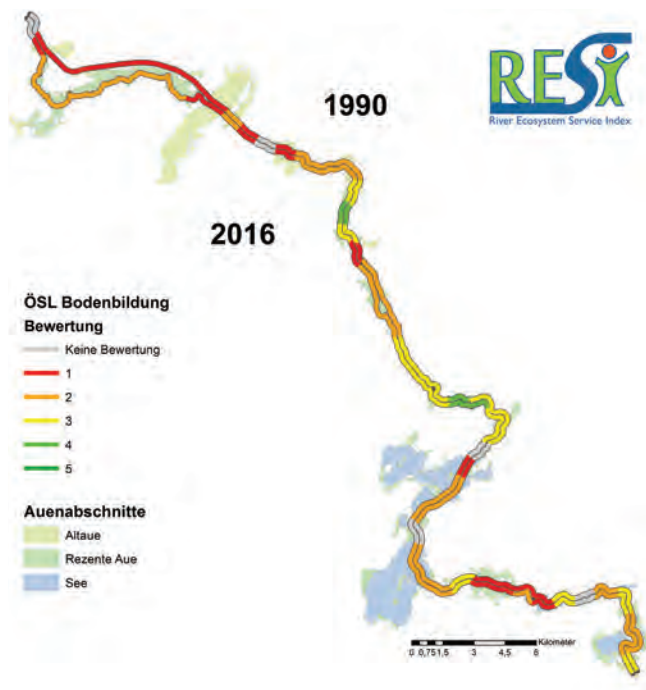
5.3.5 Ökosystemleistung „Bodenbildung in Auen: hier Moordegradationsstufen“

Eine weitere Ökosystemleistung bildet als Grundlage ökologischer Prozesse bzw. Funktionen und vielfacher Möglichkeiten der Landnutzung (z. B. Land- und Forstwirtschaft) die Bodenbildung in den Auen. Die Dominanz der Niedermoore an der Nebel rechtfertigt, dass bei dieser ÖSL auf die natürliche Moorbildung (Torfakkumulation) bzw. die anthropogen verursachte Moordegradation abgestellt wird. In moorerfüllten Niederun-

gen können Gewässervertiefungen, Grundwasserspiegelabsenkungen und die Veränderung der Überschwemmungsdynamik zur Moordegradation führen. Wasser muss im langfristigen Mittel jedoch nahe an, in oder über der Mooroberfläche stehen, damit Torf akkumuliert wird, das Moor also wächst (EDOM, 2001). Fehlendes Wasser bewirkt eine Volumenkontraktion des Torfes und damit Moorsackungserscheinungen. In dem Maße, wie Wasser durch Entwässerung aus den oberen Moorbodenschichten abgeführt wird, dringt Luft in die Grobporen ein. Infolge der Belüftung werden sekundäre Bodenbildungsprozesse ausgelöst. Die Belüftung führt zum bodenbiologischen Prozess der Mineralisierung, wobei leicht abbaubare Torfsubstanzen unter Freisetzung anorganischer Nährstoffe (vor allem Stickstoff und Phosphor) zerlegt und schwer abbaubare Torfsubstanzen in höhermolekulare Huminstoffe umgewandelt werden. Mineralisierung und Humifizierung der Niedermoore können über die Vererdungsstufe bis hin zur Vermüllung führen, einem sehr ungünstigen bodenökologischen Zustand bedingt durch negative Gefügeeigenschaften (SUCCOW & JOOSTEN, 2001).

Über die Prozesskonstellation bei Mooren entscheidet das Wasserregime, das demnach ein geeigneter ÖSL-Indikator ist, insbesondere durch seinen Bezug auf den mittleren Grundwasserflurabstand (mGWFA). Deshalb wurden für den mGWFA folgende fünf Klassen nach Flächenanteilen analysiert, in Klammern angegebene adäquate Wasserstufen (in Anlehnung an SUCCOW & JOOSTEN, 2001):

- Klasse 5: mGWFA ≤ 0 (Überstau oder flurgleich) sowie die Flächen der abgrenzbaren Bereiche der Auenüberflutungszone/Wasserwechselzone aus den Planungsdaten der Maßnahmen (Wasserstufen 6+, 5+)


Abbildung 21

Klassifizierte ÖSL Bodenbildung an der Nebel in den Jahren 1990 und 2016.

Classified ecosystem service "Pedrogenesis" in the area of the river Nebel the years 1990 (right line) and 2016 (left line).

- Klasse 4: mGWFA > 0...≤ 35 cm (4+, 3+)
- Klasse 3: mGWFA > 35...≤ 70 cm (2+)
- Klasse 2: mGWFA > 70...≤ 120 cm (2-)
- Klasse 1: mGWFA > 120 cm (2- bis 5-)

Als wesentliche Datengrundlage ist auf das digitale Geländemodell zurückgegriffen worden. Die Grundwasserflurstände wurden auf der Basis der mittleren Wasserstände in der Nebel ermittelt. (einfaches Wasserspiegellagenmodell). Die Typspezifität der Aue wurde über die Flächengewichtung, bezogen auf die Moorfläche, berücksichtigt.

Die Ergebnisse (Abb. 21) zeigen, dass der Moorzustand an der Nebel nur in einzelnen Auenabschnitten als gut zu bewerten ist; vornehmlich wegen der landwirtschaftlichen Nutzung ist der Umfang der Moorentwässerung einfach zu groß. Immerhin konnten mit den Renaturierungsmaßnahmen im Gewässernahbereich auch ökologisch nachweisbare Verbesserungen und in vielen Fällen deutliche Stützungen der Grundwasserstände erreicht werden.

5.3.6 Ökosystemleistung „Kühlwirkung - Gewässer und Böden“

Das hohe Potenzial der Gewässer und Feuchtgebiete im Hinblick auf die Temperatur- und die Feuchteregulierung des Umfeldes wird häufig unterschätzt (KASTLER et al., 2015). Die Gewässer- und feuchten Auenbereiche übernehmen tagsüber mikroklimatisch relevante Kühlfunktionen (Verdunstungskälte = latente Wärme) und können nächtliche Dämpfungen der ausstrahlungsbedingten Abnahme der Lufttemperatur bewirken (Kondensationswärme). Am meisten spürbar dürfte diese Kombination in innerstädtischen Wärmeinseln, an urbanen Ge-


Abbildung 22

Klassifizierte ÖSL Kühlwirkung an der Nebel in den Jahren 1990 und 2016.

Classified ecosystem service "Cooling effect" in the area of the river Nebel in the years 1990 (right line) and 2016 (left line).

wässern sowie in Feuchtgebieten sein. Auch für die Landwirtschaft oder in bzw. im Umfeld der Flussauen sind diese Effekte nachweislich positiv (JOOSTEN et al., 2013). Hier führen, neben der Kühlung, die Auffeuchtung der Luft über Gewässern und Feuchtgebieten zur Verringerung des Sättigungsdefizits und damit zur Dämpfung der Verdunstung über Agrarflächen, sowie die verstärkte morgendliche Taubildung zur Wasserversorgung der Pflanzenbestände.

Als Indikator für die Kühlwirkung wird die latente Verdunstungswärme (notwendige Energie zur Umwandlung von Wasser in Wasserdampf) herangezogen und mit ihrer Relevanz im hydrologischen Sommerhalbjahr (1.4. bis 30.9.) bewertet. Hierzu wurden die reale Verdunstung nach dem Verfahren von BAGROV (1953) bzw. GLUGLA et al. (2003) und die dafür erforderliche potenzielle Verdunstung nach TURC-WENDLING (WENDLING et al., 1991) für den Zeitraum 1981 bis 2010 berechnet. Datengrundlagen für das BAGROV-Verfahren stellen im Wesentlichen hydrometeorologische Werte dar, wie Niederschlag, Sonnenscheindauer/Globalstrahlung, Lufttemperatur, bodenkundliche Daten, Landnutzung, Versiegelungsgrade sowie vereinfachte Abschätzungen zu Grundwasserflurabständen in der Aue aus mittleren Wasserspiegellagen und der Geländeoberfläche mit Daten des digitalen Geländemodells. Die berechneten realen Verdunstungen in mm können in l m⁻² und folglich wegen der Dichte des Wassers von ca. 1 kg l⁻¹ einfach in Masse je Flächeneinheit umgerechnet werden. Die Verdunstungswärme L berechnet sich bei T ≥ 0 zu L = 2498 - 2,42 · T [J/g]; 1 kJ = 0,278 Wh.

Wiederum zeigt sich im Vergleich zwischen dem Jahr 1990 und dem Jahr 2016 vor allem die sehr positive Wirkung der Renaturierung der Alten Nebel (Abb. 22). Im Jahr 1990 betrug danach die

jährliche Kühlleistung ca. 11.480 GWh, 2016 ca. 13.295 GWh, was einer Zunahme um mehr als 12 % entspricht.

6 Schlussfolgerungen

Die an der Nebel über ca. ein Vierteljahrhundert umgesetzten Renaturierungsmaßnahmen sind im Hinblick auf die ökologische Wirkung bereits jetzt als sehr erfolgreich zu bewerten. Der ökologische Zustand wird sich mit fortschreitender morphologischer Entwicklung und entsprechender biologischer Wiederbesiedlung weiter verbessern. Es kann anhand ausgewählter regulativer Ökosystemleistungen auch gezeigt werden, dass der Nutzen der Renaturierung für den Einzelnen und die Gesellschaft in weit größerem Maße gegeben ist (Tab. 8).

Bei einer Ausweitung auf weitere Leistungen, wie beispielsweise auf kulturelle, sind weitere deutliche Effekte zu erwarten. Dies zeigt, dass es möglich ist, die Leistungs- und Funktionsfähigkeit der Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts einschließlich der Regenerationsfähigkeit und nachhaltigen Nutzungsfähigkeit (§§ 1, 6 WHG, § 1 BNatSchG) zu erhalten und auch in der Kulturlandschaft mit geeigneten Maßnahmen in hohem Umfang zu rückzugewinnen.

Kritisch ist zu diskutieren, dass die Berechnungen der Ökosystemleistungen auf der vorliegenden Datenbasis und der angewandten einfachen Berechnungsmethoden hinsichtlich der Ex-

aktheit natürlich als Abschätzungen einzustufen sind. Allerdings sind sowohl die Größenordnungen und die darauf basierenden Skalierungen und Bewertungen plausibel. Der vorgestellte RESI-Ansatz lässt sich damit in die Ebene eines Übersichtsverfahrens einordnen. Das war und ist aber auch das Forschungsziel. Detailliertere Berechnungen erfordern fachlich geeignetere und im Regelfall räumlich und zeitlich höher aufgelöste Daten. Aber auch die Skalenabhängigkeit der Prozesse und damit der Berechnungen und benötigter Daten muss im Blick behalten werden.

Der „Mehrwert“ der hydromorphologischen und ökologischen Zustandsverbesserung der Gewässer im Sinne gesteigerter Ökosystemleistungen sollte, soweit möglich, bei der Umsetzung der EG-WRRL sichtbar gemacht werden. Viele Leistungen nehmen in ihrer Bedeutung im Zusammenhang mit dem globalen Klimawandel zu (Thema: Mitigations- und Adaptionsmaßnahmen). Damit besteht eine gute Chance, den überragenden gesellschaftlichen Nutzen von Gewässer- und Auenschutz im gesellschaftlichen und politischen Raum noch besser zu kommunizieren.

Conclusions

The restoration measures that have been implemented along the river Nebel over the past 25 years can already be considered as very successful in terms of ecological effects. The ecological state will continue to improve due to the proceedings of the morphological development and the corresponding biological resettlement.

Based on selected regulative ecosystem services it can also be shown that the benefits of restoration are much greater for individuals and society than suspected (Table 8).

Transferring this knowledge to other services such as cultural ones, more significant effects can be expected. This shows that it is possible to preserve the performance and functionality of water bodies as a component of the natural environment, including regeneration and sustainable viability (§§ 1, 6 WHG, § 1 BNatSchG) and also to regain these features in the cultural landscape to a high extent by using appropriate measures. It can be seen critical that the calculations of the ecosystem services based on the available data sets and the simple calculation methods are rather estimates than exact results. However, both the magnitudes and the underlying scales are plausible. The presented RESI approach

Tabelle 8 Ergebnisse der Bewertung ausgewählter regulativer Ökosystemleistungen an der Nebel (1990: Ausgangssituation, 2016: nach Renaturierungsmaßnahmen), Skala der Bewertung: 5 = sehr hoch, 4 = hoch, 3 = mittel, 2 = gering, 1 = sehr gering bis fehlend. <i>Results of the evaluation of selected regular ecosystem services of the river Nebel (1990: initial situation, 2016: after restoration measures), rating scale: 5 = very high, 4 = high, 3 = medium, 2 = low, 1 = very low to absent.</i>					
Ökosystemleistung	Bewertung		Bilanzgröße		Kostenvorteil
	1990	2016	1990	2016	
Freisetzung von Treibhausgasen	2,8	3,2	46.711 t a ⁻¹ CO ₂ -Äquivalent	37.748 t a ⁻¹ CO ₂ -Äquivalent	0,7 Mio. € a ⁻¹
Hochwasserregulation: Rückhalteräume	3,6	4,2	44.562.280 m ³	51.534.561 m ³	174 Mio. €
Hochwasserregulation: Einfluss der Rauigkeit	3,2	3,9	-	-	-
Niedrigwasserregulation	3,4	3,9	-	-	4,7 Mio. €
Sedimentregulation	3,3	3,8	-	-	-
Bodenbildung in Auen	1,8	2,0	-	-	-
Kühlwirkung (Gewässer und Auenböden)	4,4	4,5	11.480 GWh a ⁻¹	13.295 GWh a ⁻¹	-

Table 8 Results of the evaluation of selected regular ecosystem services of the river Nebel (1990: initial situation, 2016: after restoration measures), rating scale: 5 = very high, 4 = high, 3 = medium, 2 = low, 1 = very low to absent.					
Ecosystem services	Assessment		Balance		Cost advantages
	1990	2016	1990	2016	
Release of greenhouse gases	2.8	3.2	46,711 t a ⁻¹ CO ₂ -equivalent	37,748 t a ⁻¹ CO ₂ -equivalent	0.7 Mio. € a ⁻¹
Regulation of flood, retention	3.6	4.2	44,562,280 m ³	51,534,561 m ³	174 Mio. €
Flood control: Influence of roughness	3.2	3.9	-	-	-
Low water regulation	3.4	3.9	-	-	4.7 Mio. €
Sediment regulation	3.3	3.8	-	-	-
Soil formation in floodplains	1.8	2.0	-	-	-
Cooling effect (waters and floodplains)	4.4	4.5	11,480 GWh a ⁻¹	13,295 GWh a ⁻¹	-

can thus be classified as a survey procedure. But this was and is also the research objective. More detailed calculations require technically more suitable data and, as a rule, spatially and temporally higher resolution data. But also the dependence of scaling procedures of the processes and thus the calculations and data sets required must be kept in mind.

The „overvalue“ of the improved hydromorphological and ecological state of the waters in terms of increased ecosystem services should, as far as possible, be displayed by the implementation of the WFD. Many service features gain importance in the context of global climate change (theme: mitigation and adaptation measures). This gives us a good chance to better communicate the superior social benefits of water and flood protection in a social and political context.

Anmerkung und Danksagung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben „ReWaM-Verbundprojekt RESI: River Ecosystem Service Index“ wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03W024F gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Die Autoren möchten sich für die langjährige, sehr gute und sehr konstruktive Zusammenarbeit insbesondere bei den Herren Behrens und Segebarth, ehemals Umweltministerium Mecklenburg-Vorpommern, bei Herrn Reimann, Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern, bei Frau Dr. Börner, Frau Kaussmann, und Frau Kolbow, den Herren Bittl, Ohde und Rudolph, Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg, sowie bei Herrn Koch, Naturpark Nossentiner/Schwinzer Heide, bedanken. Nicht zuletzt danken wir den Reviewern für die sehr konstruktiven Hinweise.

Anschriften der Verfasser

Dr. Dr. D. Mehl

Dr. T. G. Hoffmann

B.Sc. J. Iwanowski

Dipl.-Ing. K. Lüdecke

Dr. V. Thiele

biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH
Nebelring 15, 18246 Bützow
postmaster@institut-biota.de

Literaturverzeichnis

ALBERT, C., SCHRÖTER, B. & VON HAAREN, C. (2017): Ökosystemleistungen von Flusslandschaften: Nützliche Informationen für Entscheidungen. – Wasser und Abfall 19 (5), 24-29

BAGROV, N. A. (1953): O srednem mnogoletnem isparenii s poverchnosti susi (Über den vieljährigen Durchschnittswert der Verdunstung von der Oberfläche des Festlandes). – Meteorologia i Hidrologia 10, 20-25

BARTLESS, K. B. & R. C. HARRISS, (1993): Review and assessment of methane emissions from wetlands. – Chemosphere 26, 261-320

BATJES, N. H. (1996): Total carbon and nitrogen in the soils of the world. – European Journal of Soil Science 47, 151-163

BERLIN, A. & D. MEHL (1997): Die Trichoptera der Nebel (Mecklenburg-Vorpommern). – Lauterbornia 31, 83-97

BERLIN, A. & V. THIELE (2012): Ephemeroptera, Plecoptera und Trichoptera. Ansprüche, Bioindikation, Gefährdung. – Friedland (Steffen-Verlag), 304 S.

BIOTA (1994): Modellvorhaben „Gewässerpflegeplan Nebel“. – biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH im Auftrag von Umweltministerium Mecklenburg-Vorpommern/Staatliches Amt für Umwelt und Natur Rostock

BIOTA (1995): Gewässerentwicklungsplan „Obere Nebel“. – biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH im Auftrag von Landesnationalparkamt Mecklenburg-Vorpommern/Naturpark Nossentiner/Schwinzer Heide

BIOTA (1998): Erarbeitung eines Pflege- und Entwicklungsplanes für das Naturschutzgebiet „Nebetal“. – biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH im Auftrag des Staatlichen Amtes für Umwelt und Natur Rostock

BIOTA (2014): Strukturverbesserung der Nebel im Raum Hoppenrade. Vierte Effizienzkontrolle. – biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH im Auftrage des Staatlichen Amtes für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg

BITTL, R. & D. KOLBOW (2014): Zusammenwirken von Wasserwirtschaftsverwaltung und Flurneuordnungsbehörde bei der Umsetzung von Maßnahmen nach WRRL. – Wasser und Abfall 12; 16-22

BMUB/UBA (2016): Die Wasserrahmenrichtlinie – Deutschlands Gewässer 2015. – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit/Umweltbundesamt [Hrsg.], 144 S.

BNatSchG: Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz - BNatSchG) vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), zuletzt geändert durch Gesetz vom 07.08.2013 (BGBl. I S. 3154) m.W.v. 15.08.2013.

BRIDGHAM, S. D., MEGONIGAL, J. P., KELLER, J. K., BLISS, N. B. & TRETTIN, C. (2006): The carbon balance of North American wetlands. – Wetlands 26, 889-916

BRIDGHAM, S. D., PASTOR, J., DEWEY, B., WELTZIN, J. F. & F. UPDEGRAFF (2008): Rapid carbon response of peatlands to climate change. – Ecology 89 (11), 3041-3048

BRUNOTTE, E., DISTER, E., GÜNTHER-DIRINGER, D., KOENZEN, U. & D. MEHL [Hrsg.] unter Mitarbeit von: AMBERGE, P., BONN, R., DÖPKE, M., KISCHKA, J., KURTH, A., LANGER, S., LINDEN, J., LÜBKER, T., MACH, S., QUICK, I., STEINHÄUSER, A., SCHOTT, M., VAN DE WEYER, K. & U. ZELLMER (2009): Flussauen in Deutschland. Erfassung und Bewertung des Auenzustandes. – Schriftenr. Naturschutz und biologische Vielfalt 87, 141 S.

COUWENBERG, J., AUGUSTIN, J., MICHAELIS, D., WICHTMANN, W. & H. JOOSTEN (2008): Entwicklung von Grundsätzen für eine Bewertung von Niedermooren hinsichtlich ihrer Klimarelevanz. Endbericht. – Institut für Dauerhaft Umweltgerechte Entwicklung von Naturräumen der Erde (DUENE) e.V. und Institut für Botanik und Landschaftsökologie der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, 33 S.

DAHME, V., KUPILAS, B., ROLAUFFS, P., HERING, D., HAASE, P., KAPPES, H., LEPS, M., SUNDERMANN, A., DÖBBELT-GRÜNE, S., HARTMANN, C., KOENZEN, U., REUVERS, C., ZELLMER, U., ZINS, C. & F. WAGNER (2014): Strategien zur Optimierung von Fließgewässer-Renaturierungsmaßnahmen und ihrer Erfolgskontrolle. – UBA-Texte 43, 178 S.

DE GROOT, R. S., ALKEMADE, R., BRAAT, L., HEIN, L. & L. WILLEMEN (2010): Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. – Ecological Complexity 7, 260-272

DEHNHARDT, A., HORBAT, A. & J. MEYERHOFF (2016): Der Nutzen des Schutzes von Flussauen aus volkswirtschaftlicher Perspektive. – KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 9 (5), 306-311

- DEHNHARDT, A., SCHOLZ, M., MEHL, D., SCHRÖDER, U., FUCHS, E., EICHORN, A. & G. RAST (2015): Kapitel 7, „Die Rolle von Auen und Fließgewässern für den Klimaschutz und die Klimaanpassung“, in: HARTJE, V., WÜSTEMANN, H. & A. BONN [Hrsg.]: Naturkapital Deutschland – TEEB DE. Naturkapital und Klimapolitik – Synergien und Konflikte. – Technische Universität Berlin, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Berlin, Leipzig, <http://www.naturkapitalteeb.de>, 172-181
- DWA-M 525: Sedimentmanagement in Fließgewässern – Grundlagen, Methoden, Fallbeispiele. Merkblatt. – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. – DWA [Hrsg.], 2012
- DWA-M 526: Grundlagen morphodynamischer Phänomene in Fließgewässern. Merkblatt. – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. – DWA [Hrsg.], 2015
- DWD (2017): Daten des Deutschen Wetterdienstes, http://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/langj_mittelwerte.html, Abruf am 07.04.2017.
- EDOM, F. (2001): Hydrologische Eigenheiten, in: SUCCOW, M. & H. JOOSTEN [Hrsg.]: Landschaftsökologische Moorkunde. – Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung), 92-111
- EG-WRRL (Europäische Wasserrahmenrichtlinie): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, Amtsblatt der EG Nr. L 327/1 vom 22.12.2000
- EHLERT, T. & B. NEUKIRCHEN (2012): Zustand und Schutz der Flussauen in Deutschland. – Natur und Landschaft 87 (4), 161-167
- FFH-Richtlinie: Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Pflanzen und Tiere (Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie). – (Abl. EG Nr. L 206 S. 7), zuletzt geänd. durch Akte v. 23.09.2003 (Abl. EG Nr. L 236 S. 33)
- FlurbG: Flurbereinigungsgesetz vom 14. Juli 1953 in der Fassung vom 13. März 1976 (BGBl. I 1976 S. 546), zuletzt geändert durch das Gesetz vom 20.12.2001
- GLEASON, R. A. & M. K. LABHAN (2008): Chapter A: Background and Approach to Quantification of Ecosystem Services, in: GLEASON, R. A. & LAUBHAN, M. K. & N. H. Jr. EULISS [Hrsg.]: Ecosystem Services Derived from Wetland Conservation Practices in the United States Prairie Pothole Region with an Emphasis on the U.S. Department of Agriculture Conservation Reserve and Wetlands Reserve Programs. – Professional Paper 175, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 3-14
- GLUGLA, G., JANKIEWICZ, P., RACHIMOW, C., LOJEK, K., RICHTER, K., FÜRTIG, G. & P. KRAHE (2003): Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses. – Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), BfG-Bericht Nr. 1342, 103 S.
- HARNISCHMACHER, S. (2002): Fluvialmorphologische Untersuchungen an kleinen, naturnahen Fließgewässern. – Bochumer Geographische Arbeiten 70, 323 S.
- HÖPER, H. (2007): Freisetzung von Treibhausgasen aus deutschen Mooren. – TELMA 37, 85-116
- JANUSCHKE, K., SUNSERMANN, A., ANTONS, C., HAASE, P., LORENZ, A. W. & D. HERING (2009): Untersuchung und Auswertung von ausgewählten Renaturierungsbeispielen repräsentativer Fließgewässertypen der Flusseinzugsgebiete Deutschlands, in: Schriftenreihe des Deutschen Rates für Landespflege 82: Verbesserung der biologischen Vielfalt in Fließgewässern und ihren Auen, 23-39
- JOOSTEN, H., BRUST, K., COUWENBERG, J., GERNER, A., HOLSTEN, B., PERMIEN, T., SCHÄFER, A., TANNEBERGER, F., TREPEL, M. & A. WAHREN (2013): MoorFutures®. Integration von weiteren Ökosystemdienstleistungen einschließlich Biodiversität in Kohlenstoffzertifikate – Standard, Methodologie und Übertragbarkeit in andere Regionen. – BfN-Skripten 350, 130 S.
- KAAT, A. & H. JOOSTEN (2008): Fact book for UNFCCC policies on peat carbon emissions. – Wetlands International, Ede, 26 S.
- KASTLER, M., MOLT, C., KAUFMANN-BOLL, C. & M. STEINRÜCKE (2015): Kühlleistung von Böden. Leitfaden zur Einbindung in stadtklimatische Konzepte in NRW. – LANUV-Arbeitsblatt 29, 69 S.
- LU (2015): Renaturierung der Nebel abgeschlossen. – Pressemitteilung Nr. 334/15 des Ministeriums für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern vom 09.10.2015
- LwAnpG: Gesetz über die strukturelle Anpassung der Landwirtschaft an die soziale und ökologische Marktwirtschaft in der Deutschen Demokratischen Republik vom 29. Juni 1990 (GBl. DDR I 1990, Nr. 42, 642) in der Fassung der Bekanntmachung vom 3.7.1991 (BGBl. I S. 1418), zuletzt geändert durch das Gesetz vom 19.06.2001 (BGBl. S. 1149)
- MA (2005): Millennium Ecosystem Assessment, Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. – World Resources Institute, Island Press, Washington, D.C.
- MANGELSDORF, J. & K. SCHEURMANN (1980): Flußmorphologie. Ein Leitfaden für Naturwissenschaftler und Ingenieure. – München, Wien (Oldenbourg), 262 S.
- MEHL, D. & R. BITTL (2005): Der Beitrag integrierter ländlicher Entwicklungskonzepte und der Flurneuordnung zur Umsetzung von FFH- und Wasserrahmenrichtlinie in Mecklenburg-Vorpommern. – zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 130 (2), 63-69
- MEHL, D. & V. THIELE (2017): Renaturierung der Nebel bei Hoppenrade, in: SCHNEIDER, E., WERLING, M., STAMMEL, B., JANUSCHKE, K., LEDESMA-KRIST, G., SCHOLZ, M., HERING, D., GELHAUS, M., DISTER, E. & G. EGGER [Hrsg.]: Biodiversität der Flussauen Deutschlands. – Naturschutz und Biologische Vielfalt. – in Druck
- MEHL, D. (2006): Erreichtes und Probleme bei der Einfügung der Fließgewässer in das Verfahren der übergreifenden Naturraumerkundung. – Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung 45, 91-116
- MEHL, D., BOLLMOHR, A., BITTL, R. & T. REIMANN (2008): Regionalmanagement in drei kooperierenden Amtsbereichen – ein innovatives Pilotvorhaben integrierter ländlicher Entwicklung zur Umsetzung von GAKG und ELER-Verordnung in Mecklenburg-Vorpommern. – Raumforschung und Raumordnung 1/2008, 76-83
- MEHL, D., BOLLMOHR, A., ZEDLER, S., REIMANN, T., BITTL, R. & D. WINKELMANN (2011): Funktion und Bedeutung der Flurneuordnung bei der Integrierten ländlichen Entwicklung am Fallbeispiel eines Regionalmanagements nach GAK-Grundsätzen. – AVN – Allgemeine Vermessungsnachrichten 2/2011, 49-58
- MEHL, D., HOFFMANN, T. G., BOLLMOHR, A. & J. SCHENTSCHISCHIN (2014): Leitfaden Hochwasserrisikomanagementplanung in Mecklenburg-Vorpommern. – Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern [Hrsg.], 84 S.
- MEHL, D., KÖNKER, H., HELLMUTH, O. & R. PIVARCI (1995): Das Flussgebiet der Nebel – eine naturräumliche Charakterisierung, in: MEHL, D. & V. THIELE [Hrsg.]: Ein Verfahren zur Bewertung nordostdeutscher Fließgewässer und deren Niederungen unter besonderer Berücksichtigung der Entomofauna. – Nachr. entomol. Ver. Apollo (Frankfurt/Main), Suppl. 15, 19-40

- MEHL, D., SCHOLZ, M., SCHULZ-ZUNKEL, C., KASPERIDUS, H.-D., BORN, W. & T. EHLERT (2013): Analyse und Bewertung von Ökosystemfunktionen und -leistungen großer Flussauen. – KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 6 (9), 493-499
- OGewV: Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung) vom 20. Juni 2016 (BGBl. I Nr. 28 S. 1373)
- PARISH, F., SIRIN, A., CHARMAN, D., JOOSTEN, H., MINAYEVA, T., SILVIUS, M. & STRINGER, L. (Eds.) (2008): Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report. – Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen, http://www.imcg.net/media/download_gallery/books/assessment_peatland.pdf, 179 S.
- Pegelportal Mecklenburg-Vorpommern (2017): http://www.pegelportal-mv.de/pdf/pegelsteckbrief_04437.0.pdf, Abruf am 07.04.2017
- POSTHUMUS, H., ROUGETTE, J. R., MORRIS, J., GOWING, D. J. G. & T. M. HESS (2010): A framework for the assessment of ecosystem goods and services; a case study on lowland floodplains in England. – Ecological Economics 69, 1510-1523
- SCHÄFER, A. (2009): Moore und Euros - die vergessenen Millionen. – Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie 43 (4), 156-160
- SCHOLZ, M., MEHL, D., SCHULZ-ZUNKEL, C., KASPERIDUS, H.-D., BORN, W. & K. HENLE (2012): Ökosystemfunktionen in Flussauen. Analyse und Bewertung von Hochwasserretention, Nährstoffrückhalt, Treibhausgas-Senken-/Quellenfunktion und Habitatfunktion. – Naturschutz und biologische Vielfalt 124, 257 S.
- SCHWERMER, S., PREISS, P. & W. MÜLLER (2014): Best-Practice-Kostensätze für Luftschadstoffe, Verkehr, Strom- und Wärmeerzeugung. – Umweltbundesamt, 44 S.
- SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. [Hrsg.] (2001): Landschaftsökologische Moorkunde. – Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele & Obermiller)), 2. völlig neu bearb. Aufl., 622 S.
- TEEB (2010): Die Ökonomie von Ökosystemen und Biodiversität: Die ökonomische Bedeutung der Natur in Entscheidungsprozesse integrieren. Ansatz, Schlussfolgerungen und Empfehlungen von TEEB – eine Synthese. – Münster (Landwirtschaftsverlag), 48 S.
- THIELE, V. (2003): NSG Nebel. – Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern [Hrsg.], Schwerin, 8 S.
- THIELE, V., DEGEN, B., BERLIN, A., MELIß, C., BLUMRICH, B. & R. BÖRNER (2015): Dokumentation der Erfolge bei der ökologischen Sanierung eines kleinen Fließgewässers im mittleren Mecklenburg mittels zehnjährigem Langzeitmonitoring. – Wasser und Abfall 12, 50-56
- THIELE, V., LÜDECKE, K. & R. KOCH (2014): Ökologische Sanierung eines naturschutzfachlich hochsensiblen, niedermoor geprägten Tieflandflusses. – Wasser und Abfall 16 (10), 36-43
- THORP, J. H., THOMS, M. C. & M. D. DELONG (2006): The riverine ecosystem synthesis: biocomplexity in river networks across space and time. – River Research and Applications 22 (2), 123-147
- MEROT, P., L. HUBERT-MOY, C. GASCUEL-ODOUX, B. CLEMENT, P. DURAND, J. BAUDRY & C. THENAIL (2006): Environmental Assessment. A method for improving the management of controversial wetland. – Environmental Management 37 (2), 258-270
- TOCKNER, K. & J. A. STANFORD (2002): Riverine floodplains: present state and future trends. – Environmental Conservation 29, 308-330
- TREPEL, M. (2009): Nährstoffrückhalt und Gewässerrenaturierung. – Korrespondenz Wasserwirtschaft 2 (4), 211-215
- VSchRL: Richtlinie 2009/147/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. November 2009 über die Erhaltung der wildlebenden Vogelarten (kodifizierte Fassung) (Vogelschutzrichtlinie – VSchRL), Amtsblatt der EG Nr. L 20/7 vom 26.1.2010
- WENDLING, U., SCHELLIN, H.-G. & THOMÄ, M. (1991): Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für Zwecke des agrarmeteorologischen Beratung. – Z. Meteorol. 34, 82-85
- WHG: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 15. November 2014 (BGBl. I S. 1724) geändert worden ist.
- WINKLER, H. M., LILL, D. & R. LEMCKE (1995): Die Fischfauna der Nebel - ein Indikator zur Bewertung des ökologischen Gewässerzustandes, in MEHL, D. & V. THIELE [Hrsg.]: Ein Verfahren zur Bewertung nordostdeutscher Fließgewässer und deren Niederungen unter besonderer Berücksichtigung der Entomofauna. – Nachr. entomol. Ver. Apollo (Frankfurt/Main), Suppl. 15, 215-230
- ZEBISCH, M., GROTHMANN, T., SCHRÖTER, D., HAASE, C., FRITSCH, U. & W. CRAMER (2005): Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. – UBA-Texte 08/2005, 203 S.