

Auszug aus gis.Science 2/2022. Digitales Belegexemplar
ausschließlich zur elektronischen Speicherung.

AWI, Bremerhaven; Dresden; Hochschule München; Hamburg; Bundesamt für Naturschutz, Putbus; Jade Hochschule, Oldenburg

GIS-BASIERTE MODELLIERUNG VON EIGNUNGSFLÄCHEN FÜR DIE WIEDERANSIEDLUNG DER EUROPÄISCHEN AUSTER IN DER AWZ DER NORDSEE

Bernadette Pogoda, Sarah Hauser, Marko Rothe, Felix Bakker,
Tanja Hausen, Bérenger Colsoul, Kathrin Heinicke, Roland Pesch

Zusammenfassung: Austernriffe sind ökologisch bedeutsame Lebensräume, die im zurückliegenden Jahrhundert durch anthropogene Stressoren massiv geschädigt wurden. Bereits über 85 % der Austernriffe weltweit sind zerstört, verschwunden oder in ihrer Existenz bedroht. Aufgrund ihrer zentralen ökologischen Bedeutung für benthische und benthopelagische Systeme und Prozesse, die jeweils mit wichtigen Ökosystemfunktionen und -leistungen assoziiert sind, steht die Wiederherstellung von Austernriffen weltweit im Fokus von Meeresschutzmaßnahmen. Ziel der vorliegenden Studie ist die Modellierung und Identifizierung geeigneter Lebensräume für die Europäische Auster innerhalb der Schutzgebiete Borkum Riffgrund und Sylter Außenriff in der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Nordsee. In diesen Schutzgebieten ist eine Wiederherstellung von biogenen Riffen heimischer Auster über eingeleitete Naturschutzmaßnahmen bereits vorgesehen. Die zugrunde liegende Methodik beruht auf multikriteriellen Entscheidungsanalysen, die mittels der Open-Source-Software R in Form automatisierbarer Skripte konzipiert wurden. Basierend auf Geodaten der ökologischen Habitatpräferenzen der Europäischen Auster und relevanten logistischen Faktoren (kontraindizierte Nutzungen) konnten so großflächige Gebiete innerhalb der Schutzzonen identifiziert werden, innerhalb derer eine Wiederansiedlung der ehemals heimischen Art sinnvoll möglich ist. Bei einem Vergleich unterschiedlicher Standardisierungsszenarien mit Blick auf den für die Eignungsanalyse wichtigsten Faktor Fischerei sind dabei z. T. deutliche Unterschiede in der Ausweisung geeigneter Restaurationszonen festzuhalten. Die vorliegende Studie zeigt dabei, dass die innerhalb einer multikriteriellen Entscheidungsanalyse durchzuführende Klassifizierung der Eingangsfaktoren aus fachlicher, hier ökologischer und raumplanerischer, Sicht erfolgen sollte.

Schlüsselwörter: Multikriterielle Entscheidungsanalyse, Klassifikation, Analytical Hierarchy Process, AHP, Biotopmodellierung, Eignungsanalysen

GIS-BASED SUITABILITY MODELLING FOR THE EUROPEAN OYSTER WITHIN THE GERMAN EXCLUSIVE ZONE OF THE NORTH SEA

Abstract: Oyster reefs are ecologically important habitats that have been suffering from anthropogenic stressors and severe damages over the past century. More than 85 % of the world's oyster reefs have already been destroyed, have disappeared or their existence is under severe and immediate threat. Due to their central ecological importance for benthic and benthopelagic systems and processes associated with important ecosystem functions and services, the restoration of oyster reefs is a focus of marine conservation measures worldwide. In the context of marine spatial planning and complex land use conflicts, and aimed at maximising the ecological success of such restoration measures, GIS-based habitat suitability analyses for oyster reintroduction have been conducted. The aim of the present study was to model and identify suitable habitats for the European oyster within the marine protected areas of Borkum Reefground and Sylt Outer Reef in the German Bight for which the restoration of biogenic reefs, namely native oyster reefs is a designated measure. For this purpose, a multi-criteria decision analysis was designed and applied. Based on geodata of the ecological habitat preferences of the European oyster and relevant logistic factors (contraindicated uses), suitable large-scale areas were successfully identified for which a reintroduction of the formerly native species is favourable. Both suitable and unsuitable habitats could therefore successfully be identified for both nature reserves. Due to the large impact of different standardisation procedures for the suitability variables applied, corresponding results may differ quite severely. Hence four different classifications were applied on the most important factor, ground fisheries accounting for a relative weighting of ca. 30% in the derived suitability formula. The results undermine the necessity of well-grounded scientific and practical reasons to decide on a suitable classification procedure in the multicriteria analysis.

Keywords: Multicriteria decision analysis, classification, Analytical Hierarchy Process, AHP, biotope modeling, suitability analysis

Autoren

Dr. Bernadette Pogoda
 M. Sc. Tanja Hausen
 M. Sc. Bérenger Colsoul
 Alfred-Wegener-Institut (AWI)
 Helmholtz-Zentrum für Polar- und
 Meeresforschung
 Shelf Seas Systems and Coastal Ecology
 Am Handelshafen 12
 D-27570 Bremerhaven
 E: bernadette.pogoda@awi.de
 tanja.hausen@awi.de
 berenger.colsoul@awi.de

M. Sc. Marko Rothe
 Behringstr. 30B
 D-01159 Dresden
 E: markorothe@aol.com

M. Sc. Sarah Hauser
 Hochschule München
 Fakultät für Geoinformation
 Karlstraße 6
 D-80333 München
 E: sarah.hauser@hm.edu

M. Sc. Felix Bakker
 Hohe Weide 70
 D-20253 Hamburg
 E: felix.bakker@gmx.de

Kathrin Heinicke
 Bundesamt für Naturschutz –
 Außenstelle Insel Vilm
 FG II 3.2 Meeresschutzgebiete der AWZ
 D-18581 Putbus (Lauterbach)
 E: kathrin.heinicke@bfn.de

Prof. Dr. habil. Roland Pesch
 Jade Hochschule
 Institut für Angewandte Photogrammetrie
 und Geoinformatik
 Ofener Str. 16
 D-26121 Oldenburg
 E: roland.pesch@jade-hs.de

1 HINTERGRUND UND ZIEL

Der Zustand ökologisch bedeutsamer Meeresökosysteme hat sich über die letzten Jahrhunderte stetig verschlechtert. Verschmutzung, Lebensraumzerstörung, Artenverluste und Klimawandel sind gut dokumentierte Prozesse, ausgelöst durch vielfältig wirkende anthropogene Stressoren, vor allem in Küsten- und Schelfmeeren. Vor dem Hintergrund des Biodiversitätsverlusts wurden weltweit Meeresschutzgebiete (MPAs) ausgewiesen und die UN-Dekade für Ökologische Restauration (2021-2030) gestartet (IPBES 2019, UNEP/FAO 2020). Gemäß den Bestimmungen zu Schutzgebieten und räumlichen Schutzmaßnahmen nach EU-Recht (Flora-Fauna-Habitat Richtlinie (FFH RL), Meeresstrategierahmenrichtlinie (MSRL)) und den Vereinbarungen zu MPAs im Rahmen der regionalen Meeresschutzübereinkommen OSPAR und HELCOM müssen in Schutzgebieten Maßnahmen umgesetzt werden, die zur Erreichung eines guten Umweltzustands (GES) der europäischen Meere beitragen (Europäische Union 1992, HELCOM & OSPAR 2003, BLANO 2012, OSPAR 2017, European Commission of Environment 2019). Hierzu zählt auch die Förderung von Maßnahmen, die zur Wiederherstellung zerstörter Riffhabitats führen.

Die Europäische Auster *Ostrea edulis* ist eine riffbildende Art mit umfangreichen his-

torischen Vorkommen in der Deutschen Bucht und wird daher als eine Art mit besonderer naturschutzfachlicher Bedeutung angesehen (BfN 2017a). In den letzten 150 Jahren ist weltweit ein Rückgang heimischer Austernriffe um mehr als 85% zu verzeichnen; die wenigen noch existierenden natürlichen Austernhabitate befinden sich in schlechtem Zustand und gehören zu den am stärksten gefährdeten Lebensräumen (Beck et al. 2011). Als Hauptgrund für den Rückgang gelten nichtnachhaltige Befischung, Krankheiten und Umweltverschmutzung. Auch die heimischen Austernriffe der Deutschen Bucht sind vollständig verschwunden, die Art gilt in Deutschland als funktionell ausgestorben (Pogoda 2019). Durch den Verlust der strukturell komplexen Austernhabitate auf dem Meeresgrund verringern sich Artenreichtum, Produktivität und Stabilität des benthischen Ökosystems. Austern bilden durch ihr Schalenwachstum biogene Riffe und gelten als *Hotspots* der biologischen Vielfalt, da sie Siedlungssubstrat, Nahrung, Laichgrund, Kinderstube sowie Versteck- und Schutzraum für zahlreiche assoziierte Arten bieten (Abbildung 1) (Pogoda et al. 2021).

Dementsprechend wird davon ausgegangen, dass Renaturierungsmaßnahmen der heimischen Europäischen Auster wesentlich zur Verbesserung des Erhaltungsgangs der Riffe beitragen, für die ein her-

vorragender Erhaltungsgrad angestrebt wird (BfN 2017a). In der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Nordsee sind für die Naturschutzgebiete (NSG) Borkum Riffgrund (BRG) und Sylter Außenriff (SAR) (Abbildung 2) Maßnahmen zur Wiederherstellung von heimischen Austernriffen in den jeweiligen Managementplänen vorgesehen (BfN 2020a, b).

Die Festlegung von Meeresnaturschutzmaßnahmen und deren Verankerung in den Managementplänen der Schutzgebiete ist abgeschlossen. Für die nun anstehende Umsetzung konkreter und angewandter Erhaltungsmaßnahmen ist die Identifizierung geeigneter Flächen notwendig. Die Ermittlung geeigneter Standorte auf der Grundlage definierter Standortfaktoren (*site selection criteria*) ist von entscheidender Bedeutung, um einer wieder angesiedelten Art die bestmöglichen Bedingungen für Wachstum, Überleben und erfolgreiche Rekrutierung zu bieten (Pogoda et al. 2020b).

Ziel der vorliegenden Studie ist die Identifizierung geeigneter Standorte und Flächen in der Deutschen Bucht für die Wiederherstellung biogener Riffe der heimischen Europäischen Austernart *O. edulis*. Unter Berücksichtigung der marinen Raumplanung sowie logistischer und ökologischer Faktoren wird dies über eine GIS-basierte Habitatsignungsanalyse umgesetzt, wobei multikriterielle Entschei-

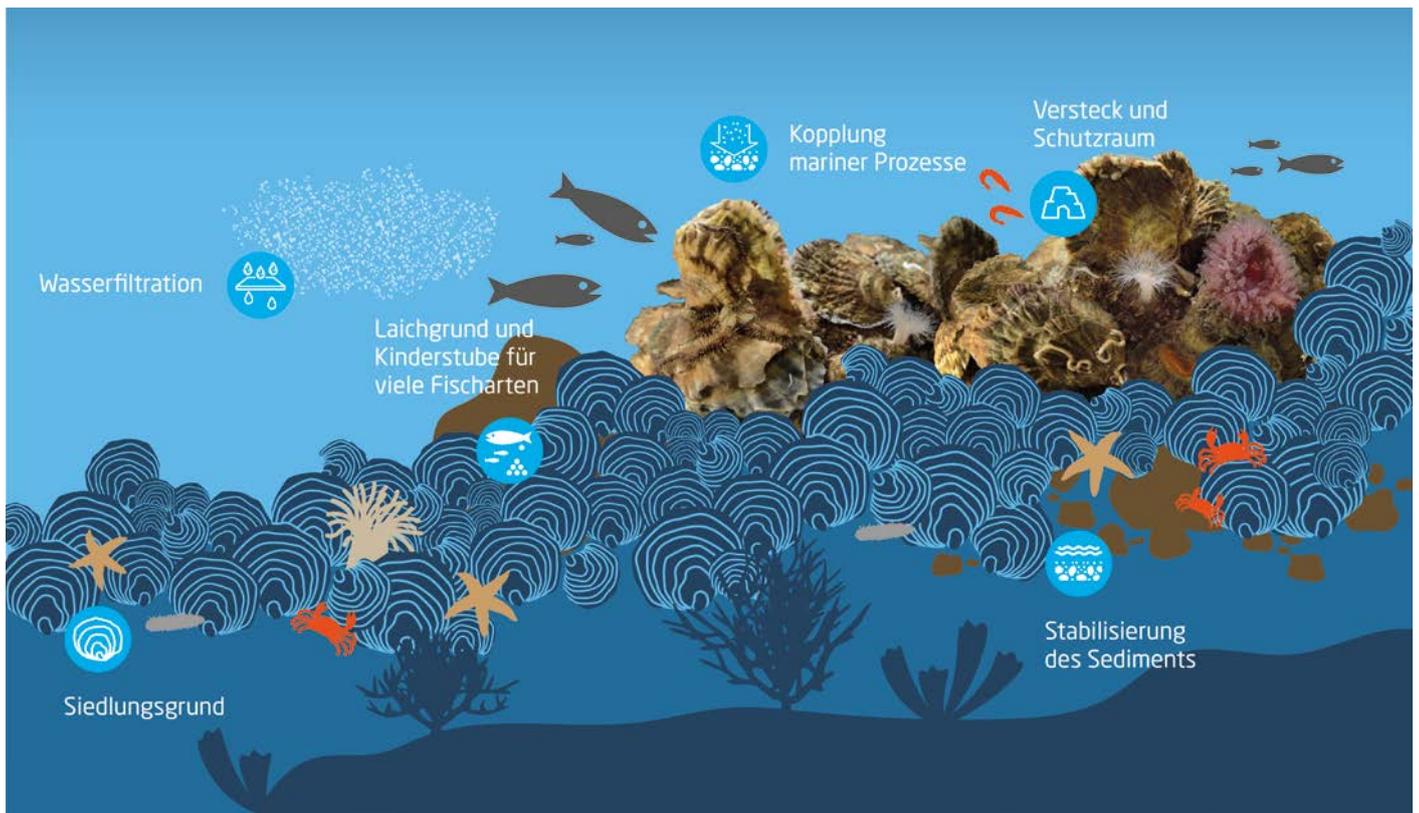


Abbildung 1: Auster sind Ökosystemingenieure und bilden durch ihr Schalenwachstum dreidimensionale Strukturen: biogene Riffe. Diese komplexen Habitats erfüllen wichtige ökologische Funktionen (Steigerung der Biodiversität) und erbringen vielfältige Ökosystemleistungen (AWVI, Foto Zankl).

dungsanalysen zum Einsatz kommen. Die Modellierung und Identifizierung geeigneter Lebensräume für die Europäische Auster wird hier am Beispiel der Naturschutzgebiete BRG und SAR in der Deutschen Bucht durchgeführt, für die eine Wiederherstellung von biogenen Riffen der heimischen Auster als Managementmaßnahme verbindlich vorgesehen ist und in den kommenden Jahren umgesetzt werden muss (BfN 2020a, b).

2 MULTIKRITERIELLE ENTSCHEIDUNGSANALYSEN

Die multikriterielle Entscheidungsanalyse (MKEA) ist eine Analysemethode, die bei komplexen (hier ökologischen und geographischen) Abhängigkeiten angewendet werden kann, insbesondere wenn eine detaillierte Berücksichtigung, Bewertung und Gewichtung multipler Faktoren angezeigt ist. Verfahren zur multikriteriellen Entscheidungsanalyse bei Unsicherheit haben grundsätzlich das Ziel, unterschiedliche Parameter (Kriterien, Faktoren) ggf. auch aus multiplen Herangehensweisen (ökologisch, ökonomisch, logistisch) zu integrieren. MKEAs werden daher für die Bestimmung der Landnutzung (hier Meeresnutzung) angewendet,

schließen Mehrdimensionalität, Unsicherheit und Risiko mit ein und erlauben eine standardisierte Bewertung, die zur Entscheidungsfindung führt. Hierfür können im direkten Vergleich Faktoren wie Biodiversität und wirtschaftliche Nutzungsformen einander gegenübergestellt werden (Drechsler 1999). Da MKEAs auch die Verarbeitung von räumlichen Daten gewährleisten sowie die Einbindung beteiligter Akteure und Expertenwissen erlauben, werden derartige Analysen in jüngster Zeit in vielen Studien mit einem räumlichen Planungsfokus eingesetzt. Konkrete Beispiele sind die räumliche Planung von On- und Offshore-Windparks (Gkeka-Serpetsidaki & Tsoutsos 2021, Höfer et al. 2016, Kim et al. 2021, Sánchez-Lozano et al. 2016), die Berechnung von Risikokarten für Naturgefahren (Ghosh & Kar 2018, Pourghasemi et al. 2012, Saha et al. 2019), Applikationen im Wassermanagement (Dar et al. 2021, Saranya & Saravanan 2020), in der Wärmeleitplanung (Schnabel et al. 2022) sowie landwirtschaftliche Anwendungen (Romeijn et al. 2016, Zandi et al. 2020).

GIS-basierte MKEA können nach einem schrittweisen Muster konzipiert und operationalisiert werden (in Anlehnung an

Estoque & Murayama 2010). Nachdem das eigentliche Ziel der Analyse definiert wurde (hier: die Identifizierung geeigneter großflächiger Wiederansiedlungsareale), erfolgt die fachlich begründete Festlegung geeigneter Eignungs- und Ausschlusskriterien sowie die Recherche diesbezüglich vorliegender Geodaten. Während Eignungskriterien den Untersuchungsraum gemäß dessen Eignung für das vorgegebene Ziel (hier: die Wiederansiedlung der Europäischen Auster) stratifizieren lassen, weisen Ausschlussfaktoren Teilgebiete aus, in denen das Ziel nicht erreicht werden kann (hier: innerhalb derer eine Wiederansiedlung der Europäischen Auster prinzipiell nicht möglich/nicht angezeigt ist). In einem nächsten Schritt werden die akquirierten Geodaten zu den Eignungs- und Ausschlusskriterien auf ein einheitliches Raster und Koordinatensystem transformiert. In Abhängigkeit des Geodatentyps der Eingangsdaten kann dies über Vektor-Raster-Transformationen oder Resampling-Prozeduren umgesetzt werden. Anschließend werden die Eignungsdaten in ein einheitliches Bewertungssystem, z. B. in Form von Schulnoten, reklassifiziert. Dieser Schritt ist für das Ergebnis der MKEA (hier: die Aus-

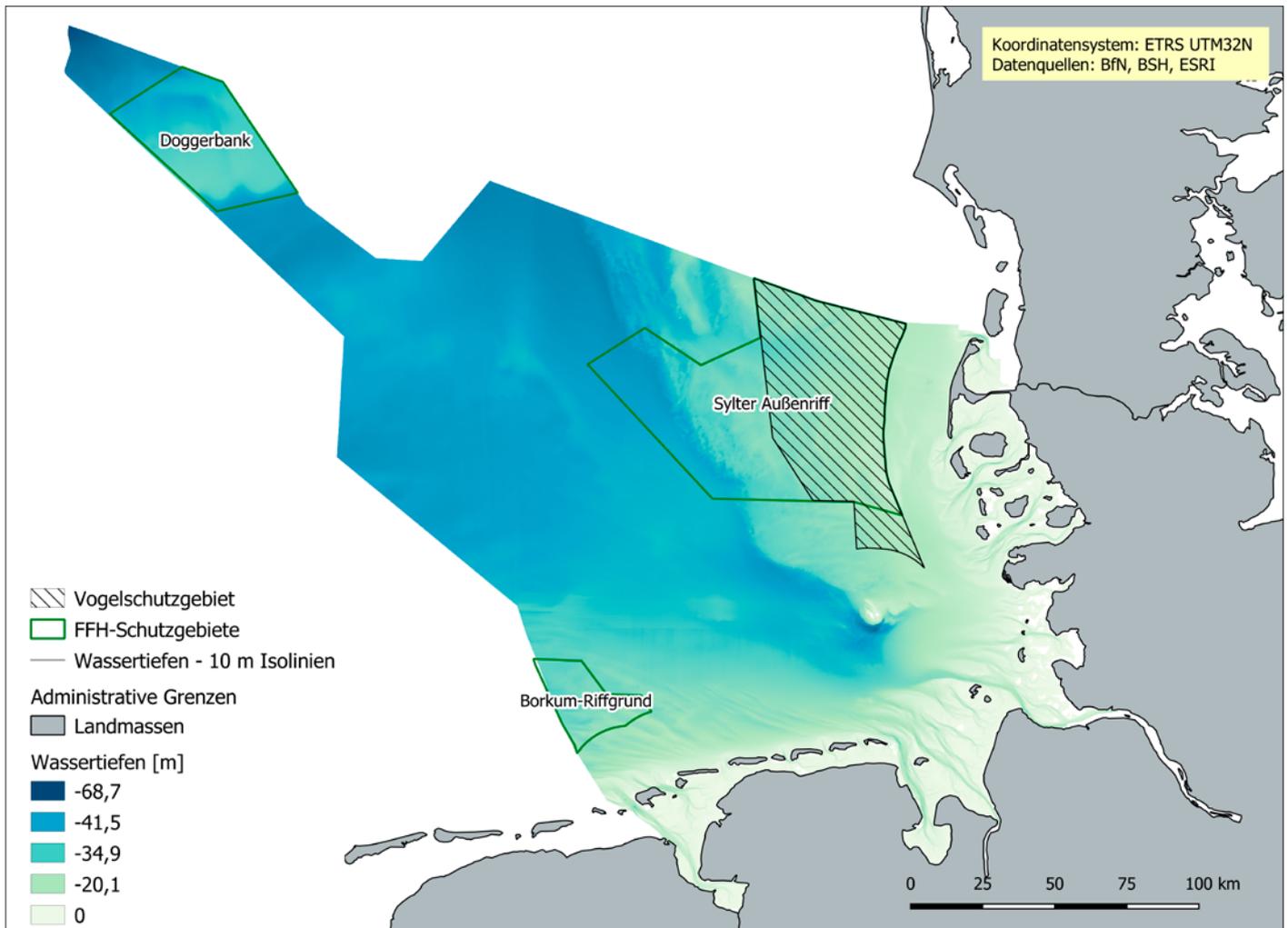


Abbildung 2: Die Deutsche Bucht mit den FFH-Schutzgebieten Borkum Riffgrund (BRG), Sylter Außenriff (SAR) inkl. des Vogelschutzgebiets Östliche Deutsche Bucht und Doggerbank (DGB) in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Nordsee

weisung geeigneter Flächen für die Wiederansiedlung der Europäischen Auster) wesentlich und sollte aus fachlicher (hier: ökologischer, benthos-biologischer) Sicht sinnvoll festgelegt werden: Je nach statistischer Verteilung der Ausgangsdaten (Abbildung 3) bzw. nach der Proportionalität zwischen Ausgangsdaten und deren eingeschätzter Förderung/Behinderung des Untersuchungsziels ist ein individuelles Reklassifizierungsschema zu wählen. Die Berechnung der Eignungskarte wird schließlich über eine gewichtete Mittelwertbildung aller reklassifizierten Eignungsdaten umgesetzt. Die Wichtungen werden dabei gemeinhin über den Ansatz von Saaty (1977) ermittelt. Dabei werden alle Eingangsfaktoren paarweise miteinander über eine festzulegende Index-Skala verglichen, die resultierenden Vergleichsindizes in einer Kreuztabelle festgehalten und zu den Faktoren bezogenen Wichtungen verrechnet. Weitere Details zur Umsetzung der Metho-

de nach Saaty (1977) werden in Kapitel 3.3 ausgeführt.

3 MATERIAL UND METHODEN

3.1 UNTERSUCHUNGSGEBIETE

Die vorliegende Analyse und Modellierung wurde für die zwei Natura-2000-Gebiete Borkum Riffgrund (BRG) sowie das Sylter Außenriff (SAR) in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone der Nordsee durchgeführt (Abbildung 2). Beide Gebiete sind gemäß der Schutzgebietsverordnung (NSGVR) als Naturschutzgebiet (NSG) ausgewiesen, haben jeweils den Status eines auch nach nationalem Recht geschützten „besonderen Schutzgebietes“ nach Art. 3 Abs. 2 S. 2 und Art. 4 Abs. 4 FFHRL (auch „Special Area of Conservation“ – SAC) (Europäische Union 1992) und sind Teil des zusammenhängenden europäischen ökologischen Netzes „Natura 2000“ (§ 31 BNatSchG Aufbau und

Schutz des Netzes „Natura 2000“). Entsprechende Schutz- und Erhaltungsziele ergeben sich aus § 3 der Schutzgebietsverordnung (NSGVR). Dazu gehören insbesondere die Erhaltung und Wiederherstellung eines günstigen Erhaltungszustands der Lebensraumtypen „Sandbänke“ Code 1110 und „Riffe“ Code 1170 mit ihren charakteristischen und gefährdeten Lebensgemeinschaften und Arten (BfN 2019). Der Schutz nach Absatz 1 umfasst die Erhaltung oder, soweit erforderlich, die Wiederherstellung der spezifischen ökologischen Werte und Funktionen des Gebiets (BfN 2019).

Das NSG BRG umfasst eine Fläche von etwa 625 km² mit Wassertiefen von 18 m bis 33 m. Es liegt im Südwesten der deutschen AWZ, außerhalb der 12-Seemeilen-Grenze nordwestlich der ostfriesischen Inseln Borkum und Juist, im Westen an die Niederlande angrenzend. Charakteristisch für das NSG BRG ist die hohe Substrat-

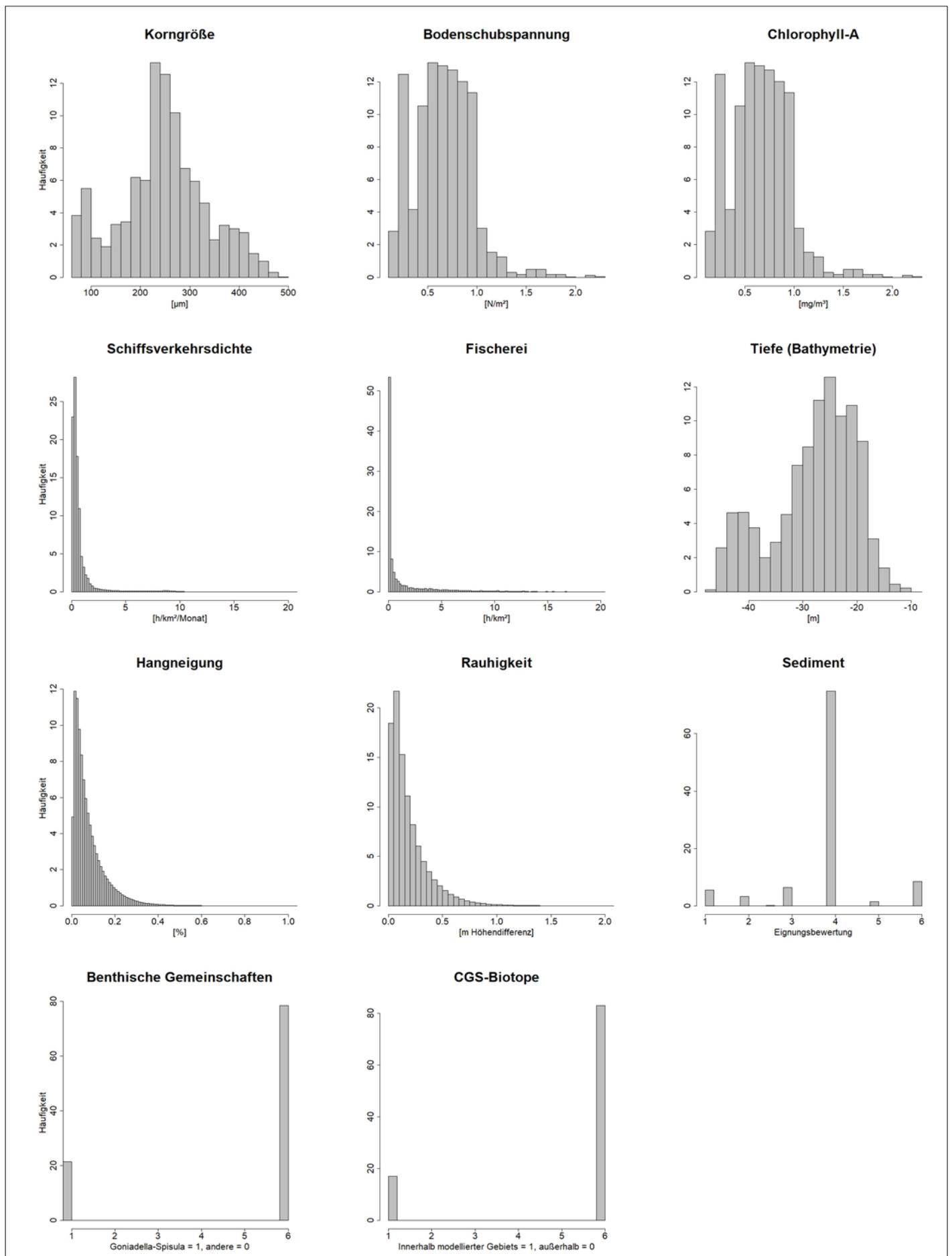


Abbildung 3: Histogrammдарstellung der elf Entscheidungskriterien: Metrisch skalierte Variablen sind in deren originalen Ausprägung, kategorial vorliegende Variablen in der standardisierten Form dargestellt (CGS = species rich gravel, coarse sand and shell gravel areas)

und Habitatvielfalt. Typisch für den Lebensraumtyp „Sandbänke“ sind die *Goniadela-Spisula*-Gemeinschaften im Grobsand und *Tellina fabula*-Gemeinschaften im Feinsand (BfN 2017). Die Riffe im NSG werden durch unterschiedlich große Steine gebildet, die der im Untergrund liegenden Saale-zeitlichen Grundmoräne zugehören. Auf diesen Riffen findet sich eine charakteristische Epifauna aus Schwammarten, sessilen Nesseltieren, Moostierchen, Würmern und Seescheiden sowie mobilen Arten, vor allem aus den taxonomischen Gruppen der Seeigel, Seesterne und Krebse (BfN 2018).

Das NSG SAR ist deutlich größer, umfasst eine Fläche von etwa 5.603 km² und erstreckt sich etwa 20 km westlich der nordfriesischen Inseln Sylt und Amrum nach Wes-

ten und Süden weit hinaus in die Nordsee. Charakteristisch für das NSG SAR ist die Heterogenität der vorkommenden Biotoptypen und eine enge Verzahnung des Lebensraumtyps „Riffe“ mit dem § 30 Biotop „Artenreiche Kies-, Grobsand- und Schillgründe“. Typisch für den Lebensraumtyp „Sandbänke“ sind auch hier die *Goniadela-Spisula*-Gemeinschaften im Grobsand und *Tellina-fabula*-Gemeinschaften im Feinsand sowie langlebige Muschelarten. Die Riffe im Schutzgebiet gelten als einmalig in den küstenfernen Gebieten der deutschen Nordsee. Sie ziehen sich als bandartige Steinfelder entlang der Flanken des Elbe-Urstromtals. Charakteristisch sind hartsubstrat-typische Epifauna-Gemeinschaften mit Schwammarten, sessilen Nesseltieren, Moostierchen, Würmern und Seescheiden sowie mobilen

Arten, vor allem aus den taxonomischen Gruppen der Seeigel, Seesterne und Krebse (BfN 2017, 2018).

Beide Gebiete, BRG und SAR, unterliegen trotz ihres Status als Meeresschutzgebiete einer Reihe von Nutzungen und Nutzungskonflikten (Schiffsverkehr, Fischerei, Rohstoffentnahme, Kabelanbindungen, militärische Nutzung u. v. m.), die für die vorliegende Analyse berücksichtigt werden mussten (Pogoda et al. 2020a, b).

3.2 AUSSCHLUSS- UND EIGNUNGSKRITERIEN

Zur Identifizierung und flächenhaften Kartierung geeigneter Flächen in beiden Schutzgebieten wurden insgesamt zwanzig Entscheidungsvariablen für die Wiederansiedlung der Europäischen Auster

Kriterientyp	Berücksichtigte Kriterien	Datenquelle (abgerufen am)
AK	Temperatur	BSH (06.06.2021)
AK	Salzgehalt	HZG 2013 (13.05.2021)
AK	Sauerstoff	BSH (18.05.2021)
AK	Munitionsverklappung	north.io GmbH (08.05.2020), Brenner et al. 2017
AK	Offshore-Kabel und -Pipelines	EMODnet 2020 (13.05.2021)
AK	Windparks	EMODnet 2020 (23.03.2020)
AK	Schiffswracks	BSH (05.05.2020)
EK	Fischereidruck	Global Fishing Watch (13.05.2021)
EK	Schiffsverkehrsdichte	Falco et al. 2019
EK	Tiefe (Bathymetrie)	BSH (08.05.2020)
EK	Hangneigung	BSH (08.05.2020)
EK	Rauigkeit	BSH (08.05.2020)
EK	Bodenschubspannung (<i>shear stress</i>)	HZG 2014 (13.05.2021)
EK	Chlorophyll-Konzentration	BSH (08.06.2021)
EK	Modellierte Vorkommen repräsentativer benthischer Lebensgemeinschaft	Schönrock 2016
EK	Modellierte Vorkommen des §-30-Biotops Artenreiche Kies-, Grobsand und Schillgründe	BfN (2017b)
EK	Mittlere Korngröße Sedimenttypen – hohe Auflösung (1:10.000)	Bockelmann et al. 2018 Propp et al. 2016, Holler et al. 2019a, Holler et al. 2019b, Holler et al. 2020, Michaelis et al. 2020, Papenmeier et al. 2019a, Papenmeier et al. 2019b, Papenmeier et al. 2019c, Richter et al. 2019, Richter et al. 2020
EK	Sedimenttypen – niedrige Auflösung (1:200.000)	Laurer et al. 2013

Tabelle 1: Sieben Ausschluss- und elf Eignungskriterien wurden nach Festlegung der Entscheidungsvariablen im Analytischen Hierarchieprozess (AHP) berücksichtigt; Darstellung der Datenquellen und Zeitpunkte der Zugriffe auf die Datenbanken. AK = Ausschlusskriterium, EK = Eignungskriterium, BSH = Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, HZG = Helmholtz-Zentrum Geesthacht (heute HEREON GmbH); weitere Referenzen im Literaturverzeichnis.

Beschreibung	Quelle	Format
Munitionsablagerung	EGEOS GmbH (2020)	Shapefile (.shp)
Kabelverlegung	EMODnet Human Activities (2020a)	Shapefile (.shp)
Windparkflächen	EMODnet Human Activities (2020b)	Shapefile (.shp)
Pipelines	EMODnet Human Activities (2020c)	Shapefile (.shp)
Schiffswracks	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)	WMS

Tabelle 2: Geodaten zu Ausschlusskriterien für die Wiederansiedlung der Europäischen Auster in den Schutzgebieten (WMS = Web Map Service)

festgelegt (Pogoda et al. 2020). Dabei ist zwischen den in Kapitel 2 beschriebenen Ausschluss- und Eignungskriterien zu unterscheiden:

- ▶ Als Ausschlusskriterien (AK) wurden sieben Faktoren festgelegt: Temperatur $< 1,5\text{ °C}$ im Winter und $> 30\text{ °C}$ im Sommer, Salzgehalt außerhalb 20–36 PSU, Sauerstoff $< 3,5\text{ mg/l}$, Munitionsverklappungsareale, Offshore-Kabeltrassen und -Pipelines, Windparkflächen, Schiffswracks. Liegen ein oder mehrere dieser Ausschlusskriterien für eine Fläche vor, wird diese als nicht geeignet identifiziert und klassifiziert.

- ▶ Als Eignungskriterien (EK) wurden dreizehn Faktoren festgelegt: bodenberührende Fischerei, Schiffsverkehrsdichte, Wassertiefe, Hangneigung und Rauigkeit des Reliefs, Bodenschubspannung (*shear stress*), Chlorophyll-Konzentration der unteren Wassersäule, Substrattyp (*sediment type*), mittlere Korngröße, benthische Weichbodengemeinschaften und modellierte Habitate von artenreichen Kies-, Grobsand und Schillgründen (KGS), Strömungsgeschwindigkeit am Meeresboden und Wassertrübung. Entsprechende Daten wurden im Rahmen einer umfassenden Datenrecherche von nationalen und internationalen Behörden, Institutionen und Projekten akquiriert (Tabelle 1 und 2). Sedimenttypen wurden dabei in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen und Klassifikationssystemen berücksichtigt. Aus der bathymetrischen Karte wurden EK Rauigkeit und EK Hangneigung (Burrough & McDonnell 2015) abgeleitet und in die Eignungsanalyse eingebunden. Für EK Strömungsgeschwindigkeit am Meeresboden und EK Wassertrübung konnten keine Daten akquiriert werden. Sie konnten daher im folgenden Analytischen Hierarchieprozess (AHP) nicht berücksichtigt werden.

Abbildung 3 zeigt die Verteilungsfarmen der eingebrachten elf Eignungskriterien

als Histogramme, wobei die ursprünglich kategorial vorliegenden Eignungsvariablen (Sedimenttypen, benthische Lebensgemeinschaften, artenreiche Kies-, Grobsand und Schillgründe) schon entsprechend der für die MKEA notwendigen Standardisierung transformiert dargestellt sind. In den Abbildungen 4 und 5 sind die modellierten Flächen artenreicher Kies-, Grobsand und Schillgründe und mittlerer Korngrößen (Abbildung 4) sowie zur grundberührenden Fischerei und zur Schiffsverkehrsdichte (Abbildung 5) kartographisch veranschaulicht.

3.3 ANALYTISCHER HIERARCHIEPROZESS

Paarweise Faktorenvergleiche

Der analytische Hierarchieprozess (AHP), der 1977 von T. Saaty eingeführt wurde, ist eine Methode, die eine Entscheidungsfindung auf der Grundlage einer fachlich gestützten Auswahl von Eignungs- und Ausschlusskriterien bzw. -faktoren ermöglicht (Saaty & Vargas 1987). Dabei wird die Bedeutung jedes einzelnen Faktors im Vergleich zu jedem anderen Faktor subjektiv geschätzt. Um eine derartige paarweise Bedeutung zu quantifizieren, wurde im vorliegenden Fall eine reziproke 9-Punkte-Skala eingeführt: 1/9 steht für relative Unwichtigkeit, 1 für gleiche Wichtigkeit und 3 für eine dreifach stärkere relative Wichtigkeit (Eastman 1999). Die Faktorgewichte füllen die untere Diagonale einer $n \times n$ -Kreuzmatrix aus. Da die umgekehrten relativen Faktorgewichte reziprok sind und die Hauptdiagonale mit Einsen gefüllt ist, werden insgesamt $n(n-1)/2$ paarweise Gewichte benötigt. Im Gegensatz zu Saaty's Ansatz, die Menge von Faktorgewichten aus den Elementen des Haupteigenvektors der Matrix zu bilden, wird in dieser Studie ein arithmetischer Ansatz verwendet: Die Spalten werden zunächst mit ihrer jeweiligen Summe normiert, dann werden die Einträge

zeilenweise gemittelt, um den endgültigen Satz von Gewichten zu erhalten.

Sechs Experten für marine Ökosystemwiederherstellung und Austernriffhabitate (Diplombiologen und M. Sc. Biologen, mit den Schwerpunkten Meeresbiologie, Zoologie, Ökologie) haben die Faktorvergleiche nach subjektiver Einschätzung vorgenommen. Dabei wurden jeweils 55 Vergleichspaare mit einer Zahl der Saaty-Skala zwischen 1/9 und 9 bewertet. Auch wenn mit einer Anzahl an individuellen Einschätzungen mehr Objektivität erwartet werden kann, ist die Qualität individueller Urteile für die Güte des Ergebnisses entscheidend (Saaty & Tran 2007). Deshalb wurde großer Wert auf die Sensibilisierung der Entscheidenden für Methodik und Datenlage gelegt.

Standardisierung der Eignungskriterien

Um räumlich verteilte Faktoren unterschiedlicher Größenordnungen vergleichen zu können, ist es notwendig, die Faktoren auf eine (beliebige) ordinale Skala zu normieren. Die Eignung eines bestimmten Standorts x lässt sich als Summe von n Linearkombinationen der standardisierten Faktorwerte $X(x)$ und der erhaltenen Gewichte w_i ausdrücken (Formel 1). An Orten $C(x)$, an denen bis zu m Einschränkungen definiert sind, führt die Multiplikation mit 0 auf eine lokale Gesamteignung von $S(x) = 0$.

Tabelle 3 zeigt, wie die Eignungskriterien für die Analyse unterteilt wurden. Die Klassengrenzen wurden im Schulnotensystem eingeteilt und erleichtern dadurch die Beurteilung der generierten Karten individueller Eignungskriterien sowie die Gesamtbeurteilung unter der Annahme aller Eignungskriterien. Die Klassengrenzen 1 bis 3 bedeuten für die Wiederansiedlung der Europäischen Auster in den Schutzgebieten sehr gute bis befriedigende Voraussetzungen, eine Klassengrenze von 4 ist nur noch ausreichend und die Klassengrenzen 5 bis 6 sind mangelhaft bis ungenügend geeignet.

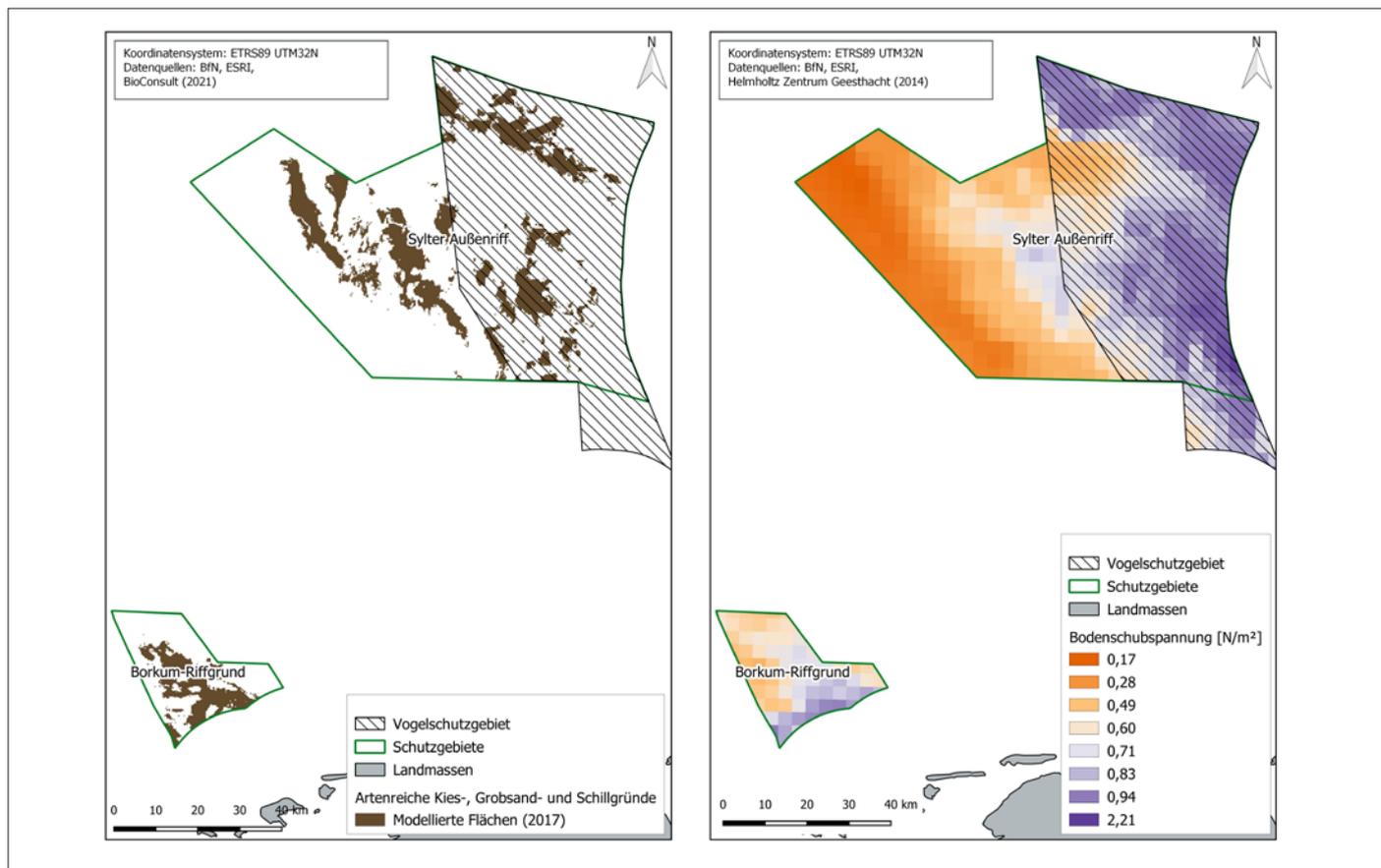


Abbildung 4: Modellierte artenreiche Kies-, Grobsand- und Schillgründe (links) und Bodenschubspannung (rechts), basierend auf Geodaten zu Eignungskriterien für die Wiederansiedlung der Europäischen Auster in den untersuchten Schutzgebieten der Deutschen Bucht

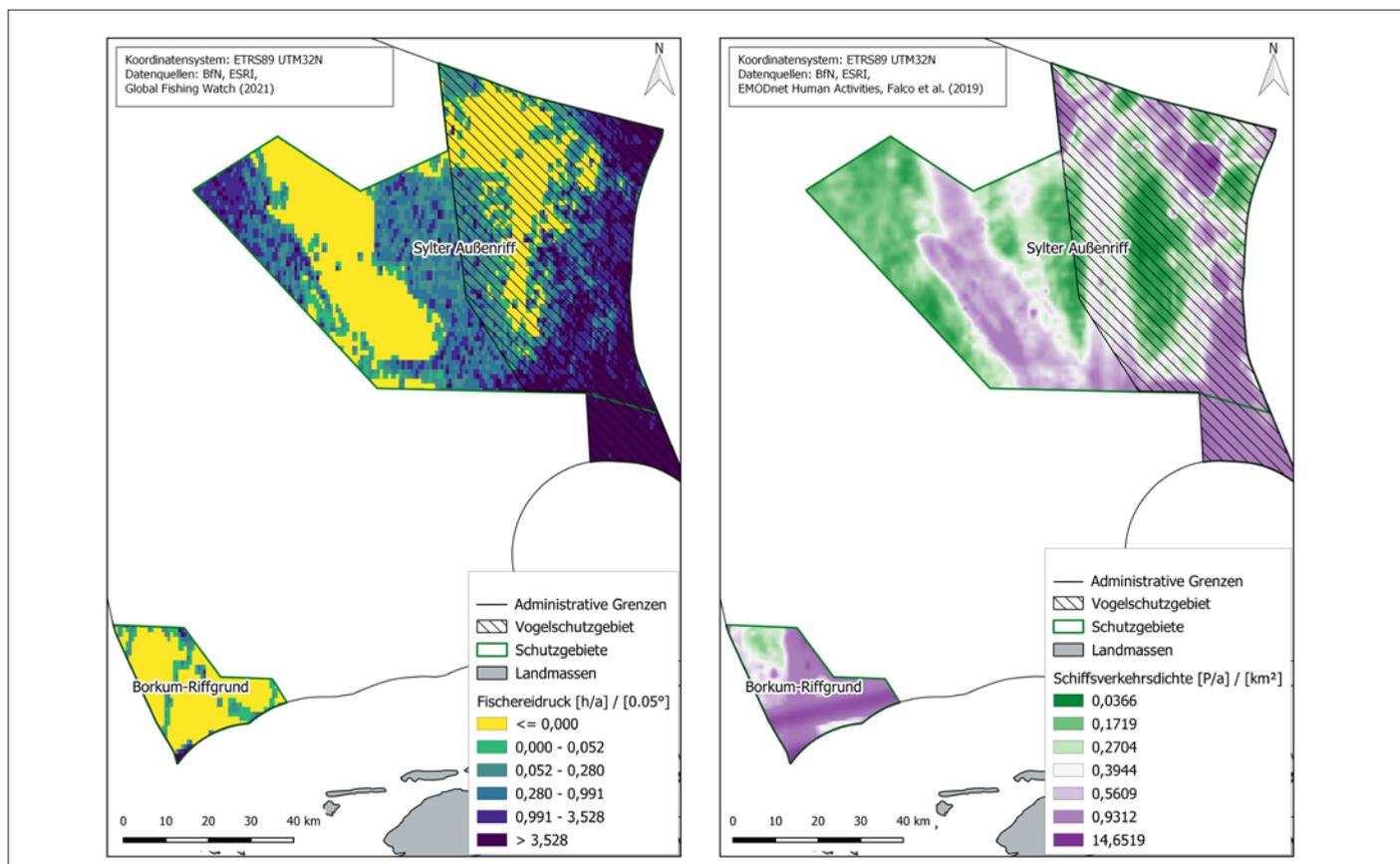


Abbildung 5: Modellierter Fischereidruck (links) und modellierte Schiffsverkehrsdichte (rechts), basierend auf Geodaten zu Eignungskriterien für die Wiederansiedlung der Europäischen Auster in den untersuchten Schutzgebieten der Deutschen Bucht

Kriterium	Klassengrenzen					
	1	2	3	4	5	6
Sedimenttypen (vereinfacht)	Restsedimente, kein Weichboden	CSed	S	FSed	–	n/a
Bathymetrie [m]	≥ -19.83	≥ -24.87	≥ -29.91	≥ -34.95	≥ -39.99	< -39.99
Rauigkeit [m]	≥ 0.7213	≥ 0.5777	≥ 0.4342	≥ 0.2906	≥ 0.1471	< 0.1471
Hangneigungswinkel [°]	< 0.0630	≤ 0.1253	≤ 0.1877	≤ 0.2500	≤ 0.3123	≤ 0.3747
Korngrößen [µm]	≥ 380.3896	≥ 319.3665	≥ 258.3435	≥ 197.3204	≥ 136.2973	< 136.2973
Bodenschubspannung [N/m²]	< 0.4217	≤ 0.6573	≤ 0.8930	≤ 1.1287	≤ 1.3643	> 1.3643
Chlorophyll-A [µg/l]	≥ 1.4823	≥ 1.3183	≥ 1.1543	≥ 0.9904	≥ 0.8264	< 0.8264
Weichboden-gemeinschaften	Goniadella-Spisula	–	–	–	–	Bathyporeia tellina, Amphiura filiformis, Nucula nitidosa, Tellina fabula
KGS	Habitat vorhanden	–	–	–	–	Nicht vorhanden
Schiffverkehrsdichte [h/km²/Monat]	< 1.4720	≤ 2.8740	≤ 4.2759	≤ 5.6778	≤ 7.0797	≤ 8.4817
Fischereidruck [h/(0.01°)²]	4 Standardisierungsvarianten (vgl. Abbildung 5)					

Tabelle 3: Standardisierung der Eignungskriterien im Schulnotensystem. CSed, S und FSed beinhalten vornehmlich grobe Sedimenttypen, Sande und Feinsedimente. CSed = grobe Sedimente (coarse sediments), S = Sand, FSed = feine Sedimente, n/a = nicht anwendbar. Die Klassen wurden aus den vorliegenden Sedimenttypisierungen vorliegender, hochauflösender Sidescan-Auswertungen (Propp et al. 2016, Holler et al. 2019a, Holler et al. 2019b, Holler et al. 2020, Michaelis et al. 2020, Papenmeier et al. 2019a, Papenmeier et al. 2019b, Papenmeier et al. 2019c, Richter et al. 2019, Richter et al. 2020) sowie der kleinmaßstäbigen Sedimentkarte nach Laurer et al. (2013) abgeleitet.

Die dargestellte Klassifizierung erfolgte sowohl automatisiert (gemäß gleicher Werteintervalle oder Quantilklassen) wie auch manuell gestützt. In beiden Fällen wurden entsprechende Klassifizierungen mit den oben erwähnten Experten abgestimmt, da diese einen großen Effekt auf die Eignungskarte haben kann und daher fachlich fundiert erfolgen sollte. Dies ist besonders dort der Fall, wo die aus dem paarweisen Faktorenvergleich resultierende relative Wichtigkeit sehr hohe Werte anzunehmen lässt. Da dies besonders bei dem Stressor grundberührende Fischerei der Fall ist, wurden für diese Eignungsvariable insgesamt vier verschiedene Standardisierungen angewendet und als Szenarien in die Eignungsanalyse eingebracht. So erfolgten einerseits eine automatisierte Klassifizierung gemäß gleicher Werteintervalle (Standardisierung A) und Quantilgrenzen (Standardisierung B) als auch zwei manuell festgelegte Klassifi-

zierungen (Standardisierung C, D) in Schrittwerten von 0,5 bzw. 1,0. Die entsprechend standardisierten Daten sind den Abbildungen 6 (für das Sylter Außenriff) sowie 7 (für den Borkum Riffgrund) zu entnehmen.

Automatisierung

Innerhalb europaweiter Aktivitäten zur Wiederansiedlung der Auster in den Küsten- und Schelfmeeren (Pogoda et al. 2019, 2020a) soll die in dieser Arbeit beschriebene MKEA übergreifend auch anderen entsprechend ausgerichteten Vorhaben zur Verfügung gestellt werden. Die Habitat-eignungsanalyse wurde daher zur weiteren

Anwendung in der Programmiersprache R realisiert. Diesbezüglich stehen den Nutzern eine Vielzahl von freien Bibliotheken zur Verfügung, darunter *ahpsurvey* (Cho 2019), das die Anwendung des AHP nach Saaty & Vargas (1987) ermöglicht.

Das die MKEA ausführende Programm zur Erkundung geeigneter Flächen für eine Austerrestauration ist auf der Plattform Kaggle zugänglich (Rothe et al. 2022). Die Schnittstelle zu den Antwortbögen paarweiser Faktorenvergleiche bilden standardisierte Excelformulare. Jede Tabelle wird in eine Matrix übersetzt und mit der AHP-Routine von Cho (2019) arithmetisch

$$s(x) = \sum_{i=1}^n w_i X(\mathbf{X})_i \prod_{j=i}^m C(x)_j, \quad C(x)_j \in (0,1) \quad (1)$$

Formel 1

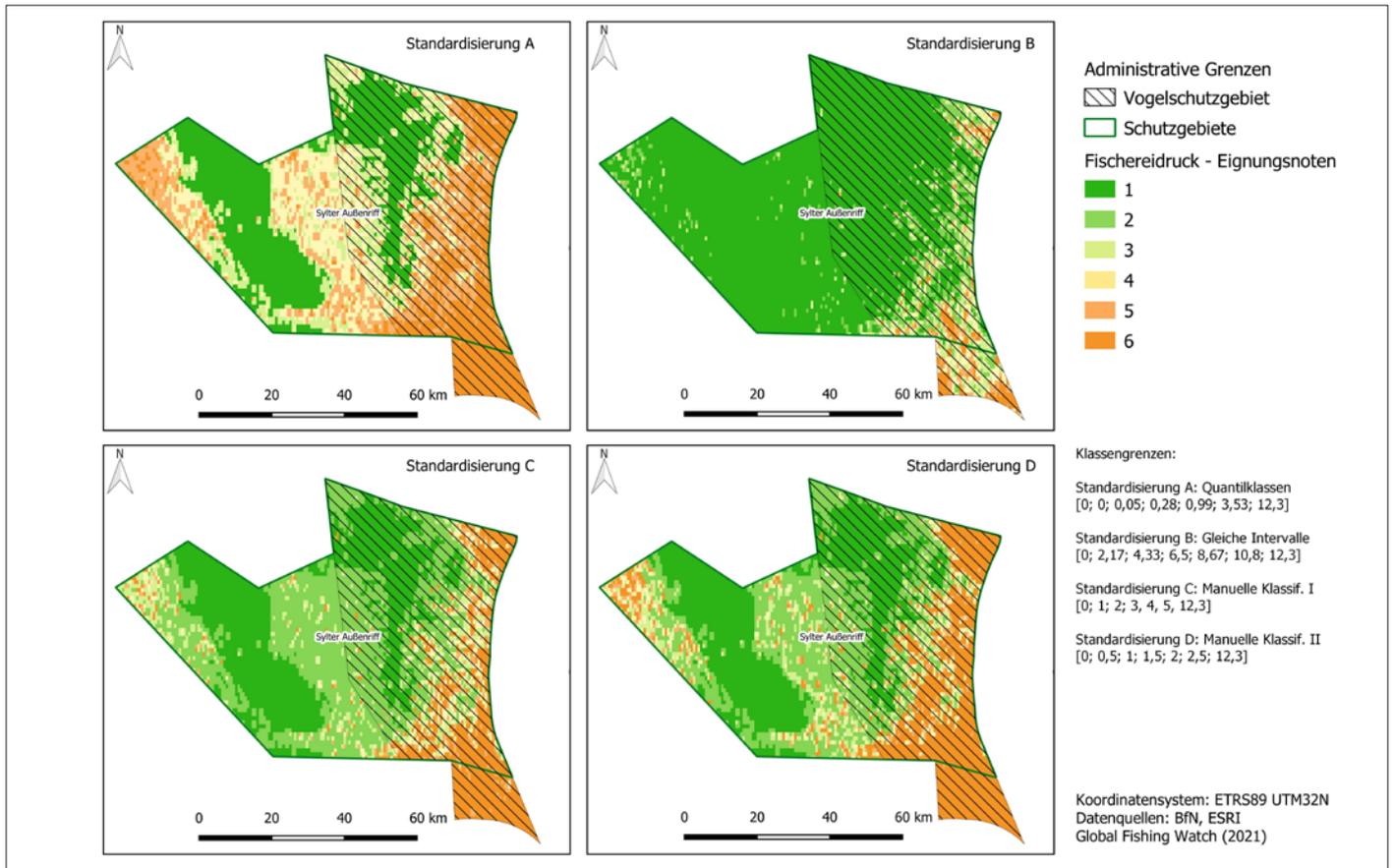


Abbildung 6: Standardisierung des Fischereidrucks gemäß unterschiedlicher Klassifikationsvorgaben – Sylter Außenriff

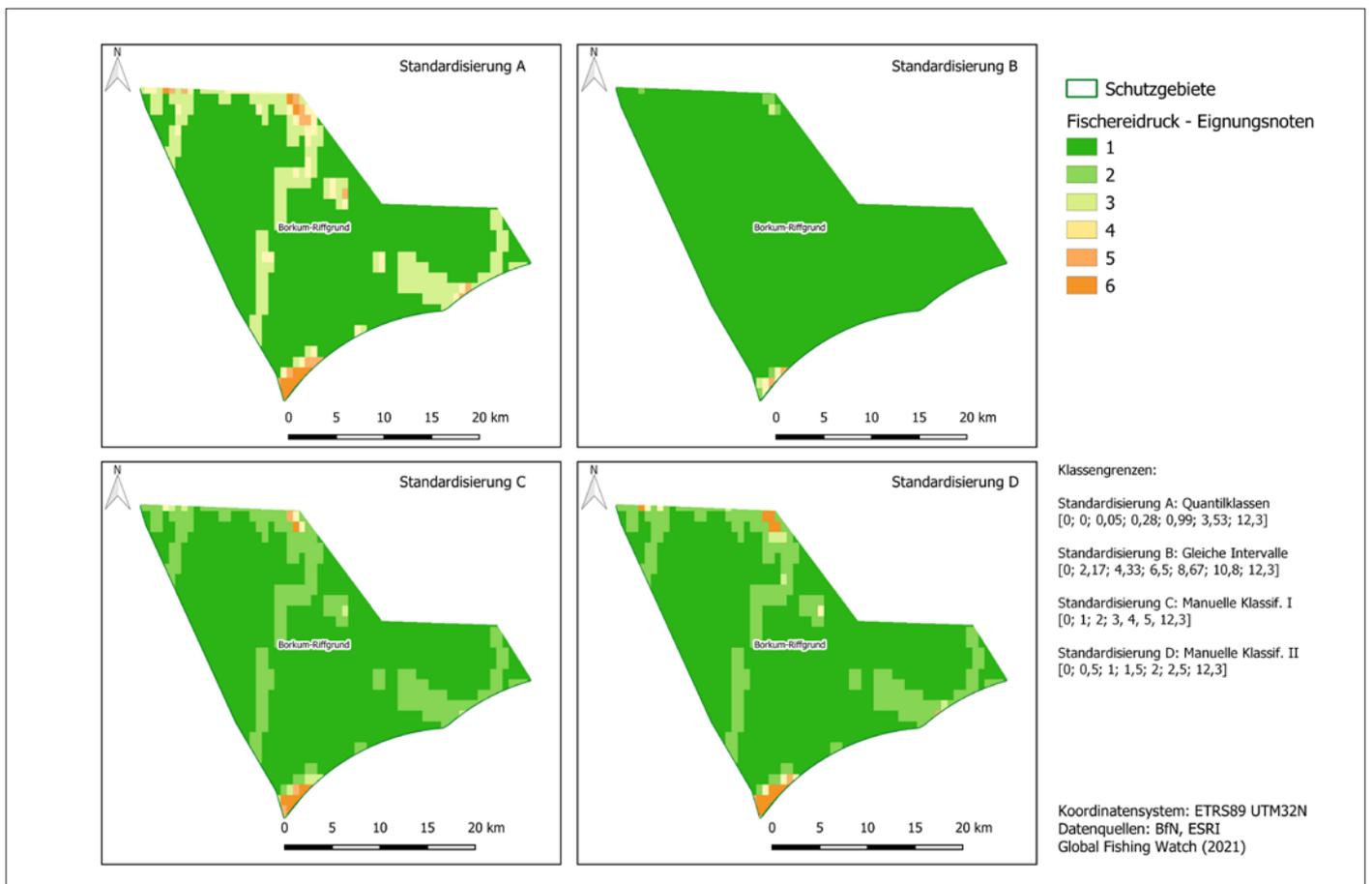


Abbildung 7: Standardisierung des Fischereidrucks gemäß unterschiedlicher Klassifikationsvorgaben – Borkum Riffgrund

gelöst. Den teils divergierenden Antworten unterschiedlicher Experten wird durch Medianbildung der individuellen Lösungsvektoren Rechnung getragen. Dadurch übertragen sich extrem abweichende Einzelbewertungen schwächer in die finalen Faktorengewichte (vgl. Tabelle 4) als durch Mittelwertbildung. Die Summe der resultierenden AHP-Gewichte addiert sich allerdings nicht auf 1.

Die räumliche Bezugsgeometrie für alle Eingangsdaten ist durch die Naturschutzgebiete Borkum Riffgrund und Sylter Außenriff gegeben. Sie werden eingelesen und mit einer Auflösung von 50 m gerastert (UTM 32N). Aufbereitete Rasterdatensätze der Eignungs- und Ausschlusskriterien werden im TIFF-Format eingelesen und in jeweils einer Liste abgespeichert. Zudem wird ein beschreibender R-Dataframe mit Informationen über die Klassenbildungsvorschrift und -richtung für den Standardisierungsprozess angelegt. Alle Rasterdatensätze werden mit den Geometrien der Schutzgebiete ausgestanzt. Durch die Datenverwaltung in R-Listen lassen sich dieser und nachfolgende Prozesse in Form von Schleifen ausführen. Im Reklassifizierungsprozess werden die Rasterdatensätze der Faktoren gemäß oben festgelegter Definition ins Schulnotensystem übersetzt (1 = sehr gut geeignet, 6 = ungenügend geeignet). Um Ausreißern im Datenhistogramm gerecht zu werden, beschränkt sich die Intervallbildung auf den Bereich zwischen 2. und 99. Perzentil. Die Intervallgrenzen aller Eignungskriterien sind in Tabelle 3 aufgeführt. Anschließend werden in einer Schleife AHP-Gewichte an korrespondierende standardisierte Eignungskriterien angebracht und die Produkte sukzessive aufaddiert (Formel 1). In einer weiteren Schleife werden letztlich die Ausschlusskriterien angewandt. Orte, die die Ansiedlung von Austerkolonien verhindern, werden aus dem Ergebnistraster gelöscht.

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Anhand der hier angewendeten Methode konnten in den Meeresschutzgebieten Borkum Riffgrund (BRG) und Sylter Außenriff (SAR) potenziell geeignete weiträumige Flächen für die Wiederansiedlung der Europäischen Auster identifiziert werden. Für beide Gebiete wurden 2020 Managementpläne veröffentlicht, die Maßnahmen zur Wiederansiedlung der Europäischen

Auster vorsehen (BfN 2020a, b). Vor diesem Hintergrund fließen die hier dargestellten Ergebnisse und Erkenntnisse unmittelbar in die Maßnahmenplanung im Rahmen des Gebietsmanagements ein (Prinz/BfN, pers. Mitt.).

4.1 AHP-FORMEL

Es zeigt sich, dass die Fischereiintensität mit großem Abstand als wichtigster Eignungsfaktor ermittelt wurde (33,2%), gefolgt von der Bodenschubspannung (16,2%) und dem Chlorophyll-A-Gehalt in der Wassersäule (12,2%). Aufgrund der invasiven und mechanischen Belastung des Meeresbodens reduziert die grundberührende Fischerei den Wiederansiedlungserfolg erheblich, während Bodenschubspannung (Strömungsbelastung) und Chlorophyll-A-Gehalt (Nahrungsverfügbarkeit) zunächst lediglich Effekte auf das Wachstum (Wachstumsgeschwindigkeit) der Austern haben. Die saisonal schwankenden Chlorophyll-A-Werte sind für Austern nur in bestimmten Temperaturbereichen (siehe Ausschlusskriterien, Tabelle 1) relevant, da Austern z. B. bei Temperaturen $< 7^{\circ}\text{C}$ nicht filtrieren (Winterruhe) (Pogoda et al. 2020, Merk et al. 2020). Mit einer relativen Wichtigkeit von unter 5% wurden die Faktoren Tiefe, Hangneigung, Rauigkeit, Artenreiche KGS, Benthische Lebensgemeinschaften sowie die Schiffsverkehrsdichte als nur untergeordnet für die Restauration der Europäischen Auster bewertet. Die (historische) Verbreitung der Europäischen Auster über weite Gebiete der Deutschen Bucht und in Wassertiefen $> 30\text{ m}$ erklärt diese Ergebnisse geringerer Wichtigkeit und die untergeordnete Bedeutung dieser Faktoren bei der Flächeneinstufung (Pogoda 2019). Aufgrund der großen Wassertiefe in den Schutzgebieten sind bei störungsfreiem Schiffsverkehr (keine Havarie, keine Ankermanöver, keine Belastung durch austretende Schadstoffe) keine negativen Auswirkungen auf die Europäische Auster und den Wiederansiedlungserfolg von Riffhabitaten zu erwarten. Bei der Aufsummierung der elf Wichtigkeiten fällt auf, dass diese sich nicht auf 1, sondern auf 0,99 aufsummieren. Bedingt ist dies durch die Verwendung des Medians in der Aggregation der Einzelantworten in der in R umgesetzten AHP-Prozedur.

Methodisch gilt zu beachten, dass Entscheidungen auf Basis der aktuellen Umstände und des Fachwissens der Experten

Eignungskriterien	Wichtung
Tiefe	0,04837851
Hangneigung	0,01925756
Rauigkeit	0,01880718
Sedimenttyp	0,06298804
Median Korngröße	0,06709456
Artenreiche KGS	0,04155089
Benthische LG	0,06717966
Chlorophyll-A	0,12249083
Bodenschubspannung	0,16175545
Schiffsverkehrsdichte	0,04776893
Fischereiintensität	0,33185542

Tabelle 4: Ermittelte Wichtigkeiten für die elf Habitat-eignungsvariablen, basierend auf den in Kapitel 3 beschriebenen und in R umgesetzten Analysen

(paarweiser Vergleich) getroffen werden. Ungewissheiten aufgrund fehlender oder unbekannter Daten oder aufgrund fehlender Kriterien und Auswahlmöglichkeiten werden entsprechend nicht berücksichtigt. Daher basieren die hier dargestellten Ergebnisse auf der Summe der Entscheidungen der aufgesuchten Experten und deren aktuellem und individuellem Wissensstand (Karthikeyan et al. 2019).

4.2 EIGNUNGSSZENARIEN

Die Übertragung der Wichtigkeiten der akquirierten und standardisierten Eignungsdaten in die Schutzgebietskarten ergab vier Szenarien, die sich aus der unterschiedlichen Standardisierung des wichtigsten Eignungsfaktors Fischereidruck ergeben (Abbildung 7). So werden die Szenarien A (Standardisierung gemäß Quantilbildung), B (Standardisierung gemäß gleicher Intervalle), C (Standardisierung gemäß manueller Klassifikation $-1,0$ Intervall) sowie D (Standardisierung gemäß manueller Klassifikation $-0,5$ Intervall) unterschieden.

Die in den Karten innerhalb der Schutzgebiete auftretenden weißen Flächen beruhen auf den in der MKEA festgelegten Ausschlusskriterien (Windparks, Kabeltrassen, Pipelines, deponierte Munitionsbestände, registrierte Standorte von Schiffswracks).

Unter Berücksichtigung der verwendeten Eignungskriterien kann eine Wiederansiedlung auf Flächen der Noten 1 bis 3 empfohlen werden. Daraus ergeben sich

Klasse	Einheit [ha]			
	A	B	C	D
1	0	0	0	0
2	13296	19038	13413	13413
3	202261	441311	295529	275895
4	246521	131516	225943	198828
5	141610	11823	68802	115551
6	0	0	0	0

Klasse	Einheit [%]			
	A	B	C	D
1	0,0	0,0	0,0	0,0
2	2,2	3,2	2,2	2,2
3	33,5	73,1	49,0	45,7
4	40,8	21,8	37,4	32,9
5	23,5	2,0	11,4	19,1
6	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 5: Flächen der Eignungsklassen innerhalb beider Schutzgebiete in ha und %

jeweils entsprechende für die Wiederansiedlung der Europäischen Auster geeignete Flächenanteile in den Schutzgebieten BRG und SAR (Abbildung 8). Im Vergleich ergeben die vier Szenarien unterschiedlich große Flächen. So weist das Szenario A mit einem mittleren Eignungswert von 3,36 die schlechtesten durchschnittlichen Eignungswerte auf, gefolgt von dem Szenario D (3,17), C (3,07) und B. Letzteres zeigt mit einer durchschnittlichen Bewertung von 2,75 die deutlich besten Eignungswerte im Vergleich zu den anderen Szenarien auf. Insgesamt ergeben sich für jedes Schutzgebiet und jedes Szenario geeignete Flächen. Betrachtet man die Größe der für eine Wiederansiedlung geeigneten Flächen, so sind diese bei einem maximalen Score von 3 in Szenario B mit 76,3% der Gesamtschutzgebietsfläche (BRG + SAR) im Vergleich zu den anderen Szenarien am höchsten (Tabelle 5).

Die Unterschiede zwischen den vier Szenarien demonstrieren die Sensitivität des Entscheidungsprozesses bzgl. der gewählten Klassendefinitionen eines Entscheidungskriteriums. Weitere neuralgische Punkte der Modellgüte bestehen in der Ableitung der Faktorgewichte aus subjektivem paarweisen Vergleich sowie aus bestehenden Korrelationen unter den Faktoren. Da in der Realität vielfach physikalische Größen direkt oder indirekt voneinander ab-

hängen, lassen diese sich oftmals nicht gänzlich vermeiden. Geeignete Faktorbewertungen lassen sich individuell oder in einem moderierten Konsensansatz erlangen (Dong & Saaty 2014). In beiden Fällen ist auf die Konsistenz der ausgewählten Bewertungen der Faktoren untereinander zu achten. Wird eine globale Konsistenzbedingung nicht erreicht, sind adaptierte paarweise Bewertungen anzusetzen (für Konsistenzvorschrift vgl. Saaty 1990, Dong & Saaty 2014). Die Faktorstandardisierungen korrelieren über die Faktorgewichte direkt mit der finalen Eignung. Die Wahl geeigneter Intervalle sollte vor allem aus fachlichen Überlegungen heraus erfolgen.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Anhand der hier angewendeten Methode konnten erfolgreich weiträumige Flächen für die Wiederansiedlung der Europäischen Auster in den Meeresschutzgebieten Borkum Riffgrund (BRG) und Sylter Außenriff (SAR) identifiziert werden, denen aufgrund der Experteneinschätzung eine Eignung zuerkannt wird. Grundlegende Voraussetzungen für eine optimale und fachlich abgesicherte Umsetzung der Methode sind einerseits die Mitwirkung von methodisch geschulten Experten aus dem entsprechenden Fachgebiet (hier Austernwiederansiedlung und Schutzgebietsmanagement) so-

wie die Verfügbarkeit aktueller Datensätze zu den zuvor definierten Eignungskriterien (Pogoda et al. 2020).

Die Eignungskartierung zur Ansiedlung der Europäischen Auster in den Schutzgebieten BRG und SAR durch Fachexperten basiert auf dem derzeit aktuellen benthosökologischen Forschungsstand. Ein Zugrundelegen derartiger Karten steigert die Akzeptanz entsprechender Maßnahmen in den Schutzgebieten. Dies betrifft sowohl die obligatorische Umsetzung der Managementmaßnahmen (BfN 2020a, b) als auch die geplante Umsetzung von Real-kompensationen für Eingriffe gemäß Naturschutzrecht, wie sie sich beispielsweise aus dem Bau von Offshore-Windkraftanlagen sowie den damit verbundenen Kabelverlegungen ergeben (Bundeskompensationsverordnung (BKompV) vom 2.6.2020; § 13 Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG), § 56 BNatSchG Absatz 4).

Die für die vorliegende Kartierung ausgewählten Geodaten bilden den bis 2020 verfügbaren Datenbestand für beide Schutzgebiete ab, sollten aber für zukünftige Kartierungen weiter aktualisiert werden. Eine Aktualisierung kann aufgrund der Verfügbarkeit der programmierten R-Routine problemlos umgesetzt werden.

Eine Einbindung des Fachwissens weiterer, auch international ausgewiesener Experten bei der Eignungskartierung ist möglich und sinnvoll. Die in diesem Beitrag beschriebene Vorgehensweise kann so auch mit einer beliebig größeren Expertengruppe wiederholt werden. Zusammen mit den akquirierten Geodaten bestimmen die Antworten der Experten das Ergebnis der gesamten Untersuchung. Daher ist darauf zu achten, dass die Experten vor der Befragung gut in die Methode eingeführt werden, denn trotz der relativen Einfachheit des Verfahrens sind durch den individuellen Beitrag der Experten die komplexen Ergebnisprodukte (hier Karten mit geeigneten und weniger geeigneten Flächen) nicht immer schrittweise oder im Detail nachvollziehbar (Drechsler 1999).

Im Ergebnis zeigt die grundberührende Fischerei den mit Abstand bedeutendsten Faktor für die Wiederansiedlung der Auster in den Schutzgebieten. Bezogen auf diese werden verschiedene Klassifizierungsszenarien für die Standardisierung angewendet. Das Ergebnis zeigt die Wichtigkeit der Wahl von Klassifizierungen bei

Eignungsanalysen mittels des AHP-Ansatzes und deren fachliche Fundierung. Für die hier untersuchten Schutzgebiete BRG und SAR läuft derzeit ein Fischereiaus-schlussverfahren über die Gemeinsame Europäische Fischereipolitik (GFP). Derzeit ist absehbar, dass weite Teile beider Schutzgebiete in Zukunft nicht mehr durch mobile grundberührende Fischerei belastet werden

(Pusch/BfN, persönliche Mitteilung). Vor diesem Hintergrund wäre dann eine aktualisierte Wichtung und Flächenidentifizierung wie -berechnung ohne den fachlich wie im Resultat rechnerisch bedeutsamen Faktor „Fischereidruck“ angezeigt.

Die Aufarbeitung der Operationalisierung des gezeigten Ansatzes mit dem Notebook Kaggle ermöglicht eine flexible

Anpassung des Ansatzes bezogen auf die Auswahl an Geodaten, Standardisierungsfragen sowie Expertenbefragungen.

Darüber hinaus kann diese methodische Vorgehensweise aufgrund der R-Routine leicht auf andere Untersuchungsräume übertragen werden.

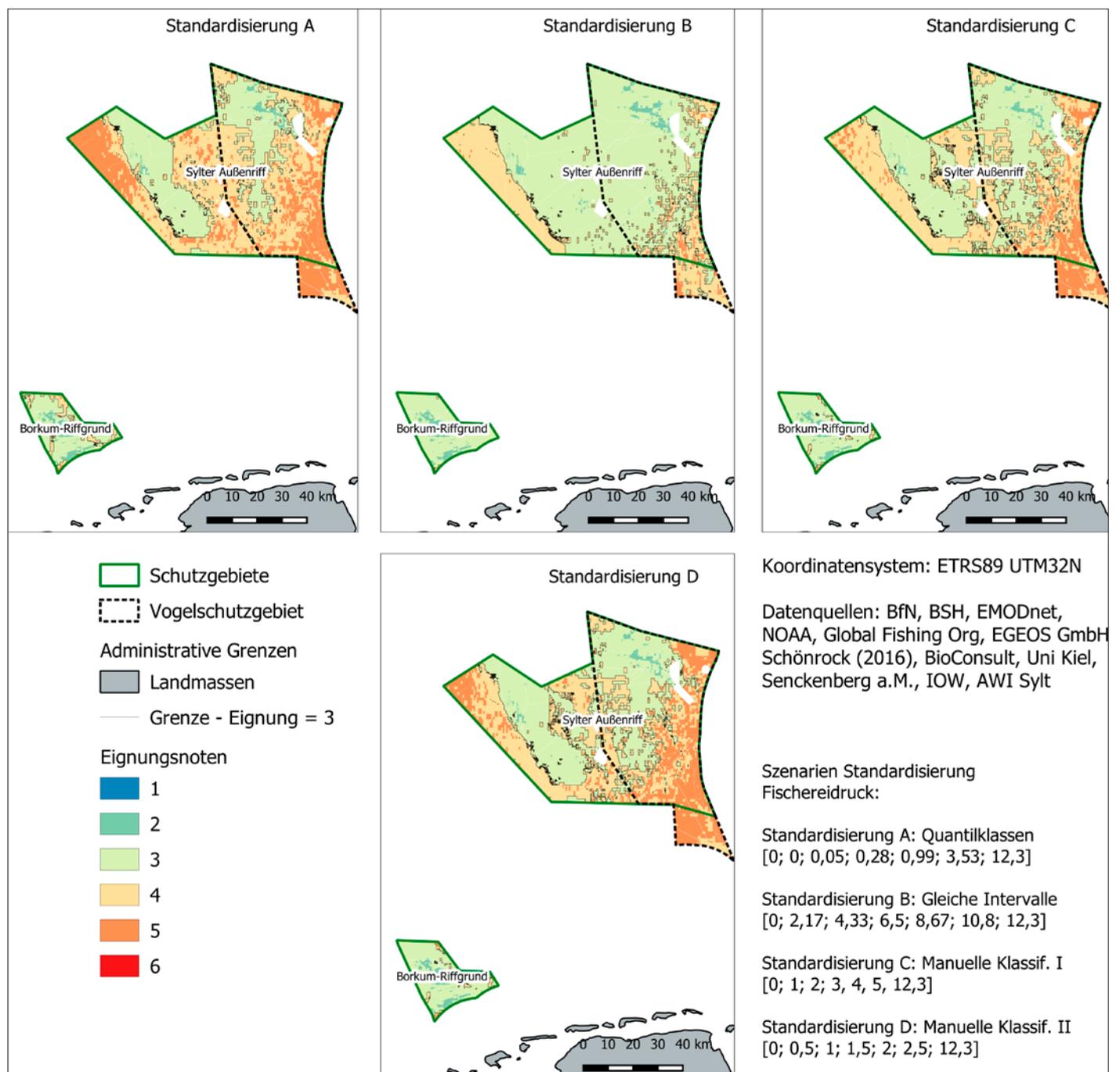


Abbildung 8: Szenarien zur Kartierung von Eignungskriterien der Europäischen Auster in den Schutzgebieten

Literatur

- Beck, M. W.; Brumbaugh, R. D.; Airoidi, L.; Caranza, A.; Coen, L. D.; Crawford, C.; Defeo, O.; Edgar, G. J.; Hancock, B.; Kay, M. C.; Lenihan, H. S.; Luckenbach, M. W.; Toropova, C. L.; Zhang, G.; Guo, X. (2011): Oyster Reefs at Risk and Recommendations for Conservation, Restoration, and Management. In: *Bioscience*, 61 (2), S. 107-116. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.2.5>.
- BfN – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.) (2017a): Die Meeresschutzgebiete in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone der Nordsee – Beschreibung und Zustandsbewertung (Erstellung: Bildstein, T.; Schuchardt, B.; Bleich, S.; Bennecke, S.; Schückel, S.; Huber, A.; Dierschke, V.; Koschinski, S.; Darr, A.). Bonn, 486 S.
- BfN – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.) (2017b): Kleinmaßstäbige Abgrenzung des nach § 30 BNatSchG geschützten Biotoptyps „Artenreiche Kies-, Grobsand- und Schillgründe“ in den FFH-Gebieten der AWZ der Nordsee. Bonn.
- BfN – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.) (2018): BfN-Kartieranleitung für „Riffe“ in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ). Bonn, 43 S.
- BfN – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.) (2019): Bewertung des Erhaltungszustandes der Lebensraumtypen der atlantisch biographischen Region. Bonn.
- BfN – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.) (2020a): Managementplan für das Naturschutzgebiet „Borkum Riffgrund“ (MPBRG). Bonn, 123 S.
- BfN – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.) (2020b): Managementplan für das Naturschutzgebiet „Sylter Außenriff – Östliche Deutsche Bucht“. Bonn, 151 S.
- BIANO (2012): Festlegung von Umweltzielen für die deutsche Nordsee nach Artikel 10 Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie. 48 S. https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/N/natura2000/Downloads/msri.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (Zugriff 3/2022).
- Bockelmann, F.-D.; Puls, W.; Kleeberg, U.; Müller, D.; Emeis, K.-C. (2018): Mapping mud content and median grain-size of North Sea sediments – A geostatistical approach. In: *Marine Geology*, 397, S. 60-71. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.11.003>.
- Brenner, M.; Bostelmann, A.; Kloepper, S. (2017): Military Activities. In: *Wadden Sea Quality Status Report 2017*. Common Wadden Sea Secretariat (Kloepper, S. (Eds.) et al.). Wilhelmshaven.
- BSH – Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2021): BSH Database. https://www.bsh.de/DE/DATEN/daten_node.html;jsessionid=EFA5B275F24055EBABC80BDA8448BDF5.live21304 (Zugriff 5/2020, 5/2021, 6/2021).
- Burrough, P. A.; McDonnell, R. A.; Lloyd, C. D. (2015): *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press.
- Cho, F. (2019): Analytic Hierarchy Process for Survey Data in R. *Vignettes Ahpsurvey Package* (Vers. 0.4. 0) 26.
- Dar, T.; Rai, N.; Bhat, A. (2021): Delineation of potential groundwater recharge zones using Analytical Hierarchy Process (AHP). In: *Geology, Ecology, and Landscapes*, 5 (4), S. 292-307. <https://doi.org/10.1080/24749508.2020.1726562>.
- Dong, Q.; Saaty, T. L. (2014): An Analytic Hierarchy Process model of group consensus. In: *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 23 (3), S. 362-374. <https://doi.org/10.1007/s11518-014-5247-8>.
- Drechsler, M. (1999): Verfahren zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung bei Unsicherheit. Leipzig. In: Horsch, H.; Ring, I. (Hrsg.): *Naturschutz und wirtschaftliche Entwicklung. Nachhaltige Wasserbewirtschaftung und Landnutzung im Elbeinzugsgebiet*. UFZ Leipzig-Halle GmbH, Leipzig, S. 87-214.
- Eastman J. R. (1999): Multi-criteria evaluation and GIS. In: *Geographical Information Systems*, 1 (1), S. 493-502.
- EMODnet (2020): Data Services. The European Marine Observation and Data Network. EMODnet Human Activities. <https://www.emodnet-humanactivities.eu/view-data.php>.
- Estoque, R.; Murayama, Y. (2010): Suitability analysis for beekeeping sites in La Union, Philippines, using GIS and multi-criteria evaluation techniques. In: *Research Journal of Applied Sciences*, 5 (3), S. 242-253.
- Europäische Union (1992): Richtlinie 92/43/EEC vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanze (FFH-Richtlinie). Europäische Union (Ed.), 68 S.
- European Commission of Environment (2019): *The EU Nature Directives: Protecting Europe's Marine Biodiversity*.
- Falco, L.; Pitiito, A.; Adnams, W.; Earwaker, N.; Greidanus, H. (2019): EU vessel density map – detailed method. *European Marine Observation and Data Network (EMODnet)*.
- Ghosh, A.; Kar, S. K. (2018): Application of Analytical Hierarchy Process (AHP) for flood risk assessment: a case study in Malda district of West Bengal, India. In: *Natural Hazards*, 94 (1), S. 349-368. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3392-y>.
- Gkeka-Serpetsidaki, P.; Tsoutsos, T. (2021): Sustainable site selection of offshore wind farms using GIS-based multi-criteria decision analysis and Analytical Hierarchy Process. Case study: Island of Crete (Greece). In: *Low Carbon Energy Technologies in Sustainable Energy Systems*. Elsevier, S. 329-342. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822897-5.00013-4>.
- Global Fishing Watch (2021): Fishing Density. Global Fishing Watch, Inc. www.globalfishingwatch.org (Zugriff 5/2021).
- HELCOM & OSPAR (2003): Joint HELCOM/OSPAR Work Programme on Marine Protected Areas. First Joint Ministerial Meeting of the Helsinki and OSPAR Commissions (JMM), 25. – 26. Juni 2003, Bremen.
- Höfer, T.; Sunak, Y.; Siddique, H.; Madlener, R. (2016): Wind farm siting using a spatial Analytic Hierarchy Process approach: A case study of the Städteregion Aachen. In: *Applied Energy*, 163, S. 222-243. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.138>.
- Holler, P.; Bartholomä, A.; Propp, C.; Thiesen,

M.; Zeiler, M. (2019): Map of sediment distribution in the German EEZ (1:10.000). BSH, GeoSeaPortal. https://www.bsh.de/DE/DATEN/GeoSeaPortal/geoseaportal_node.html (Zugriff 4/2020).

Holler, P.; Bartholomä, A.; Valerius, J.; Thiese, M.; Mulckau, A. (2019): Map of sediment distribution in the German EEZ (1:10.000). BSH, GeoSeaPortal. https://www.bsh.de/DE/DATEN/GeoSeaPortal/geoseaportal_node.html (Zugriff 4/2020).

Holler, P.; Bartholomä, A.; Valerius, J.; Thiese, M.; Mulckau, A. (2020): Map of sediment distribution in the German EEZ (1:10.000). BSH, GeoSeaPortal. https://www.bsh.de/DE/DATEN/GeoSeaPortal/geoseaportal_node.html (Zugriff 4/2020).

HZG – Helmholtz-Zentrum Geesthacht (2013): NOAA/Salinity (MapServer). <https://coastmap.hzg.de/server/rest/services/NOAH/Salinity/MapServer> (Zugriff 5/2021).

HZG – Helmholtz-Zentrum Geesthacht (2014): NOAA/Shear Stress by wave. https://coastmap.hzg.de/coastmap/maps/data/NOAH/details/DataPages_ShearStressWave.pdf (Zugriff 5/2021).

IPBES (2019): Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES Secretariat, Bonn, 1148 S. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>.

Karthikeyan, R.; Venkatesan, K.; Chandrasekar, A. (2016): A comparison of strengths and weaknesses for Analytical Hierarchy Process. In: Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences, 9 (3), S. 12-15.

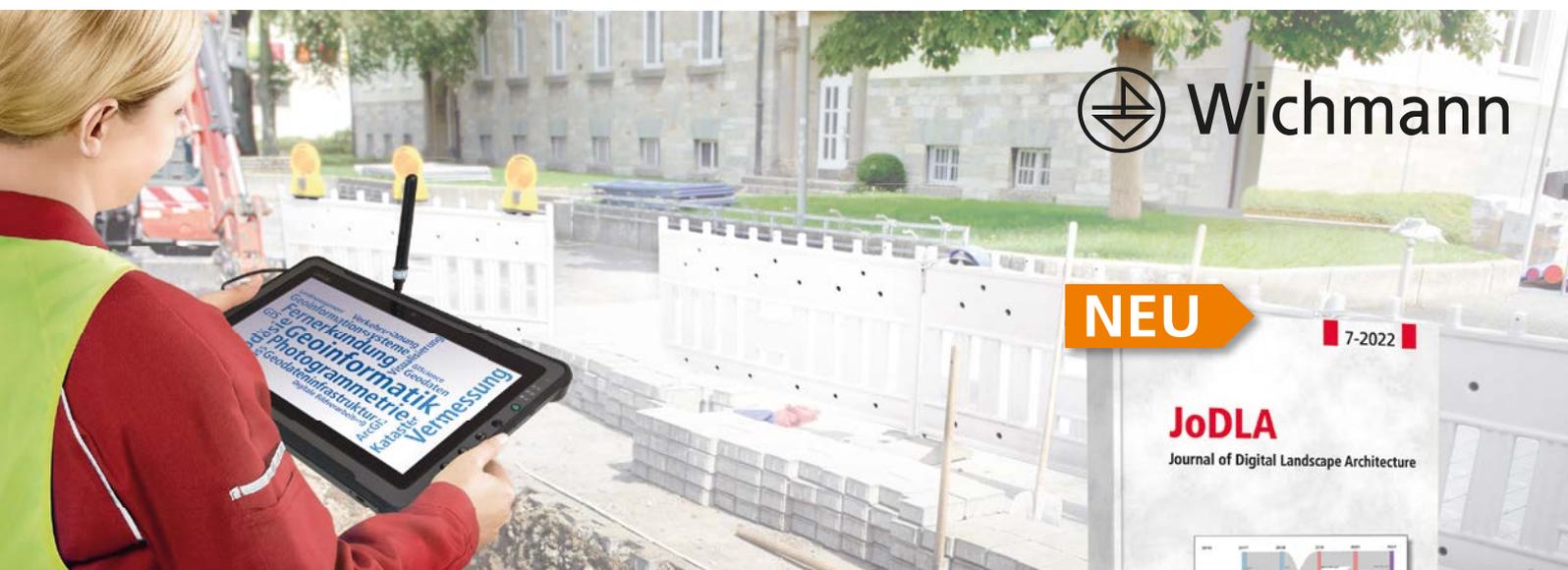
Kim, G.; Jeong, M.-H.; Jeon, S.-B.; Lee, T.-Y.; Oh, H.-Y.; Park, C.-S. (2021): Determination of Optimal Locations for Offshore Wind Farms Using the Analytical Hierarchy Process. In: Journal of Coastal Research, 114 (SI), S. 439-443.

Laurer, W.-U.; Naumann, M.; Zeiler, M. (2013): Geopotenzial Deutsche Nordsee Modul B-Dokumentation Nr. 1: Erstellung der Karte zur Sedimentverteilung auf dem Meeresboden in der deutschen Nordsee nach der Klassifikation von FIGGE (1981): Geopotenzial Deutsche Nordsee, Modul B.

Merk, V.; Colsoul, B.; Pogoda, B. (2020): Return of the native: Survival, growth and condition of European oysters reintroduced to German offshore waters. In: Aquatic Conservation, 30 (11), S. 2180-2190. <https://doi.org/10.1002/aqc.3426>.

Michaelis, R.; Hass, H. C.; Valerius, J.; Thiese, M.; Mulckau, A. (2020): Map of sediment distribution in the German EEZ (1:10.000). https://www.bsh.de/DE/DATEN/GeoSeaPortal/geoseaportal_node.html (Zugriff 4/2020).

North.io GmbH (2020): Areas of ammunition dumping in the North Sea. <https://amucad.org/> (Zugriff 5/2020).



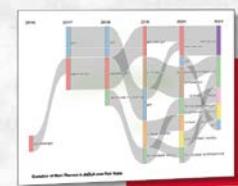
Wichmann

NEU

7-2022

JoDLA

Journal of Digital Landscape Architecture



Wichmann

2022, XXX, 714 Seiten

89,- € (Buch/E-Book)

124,60 € (Kombi)

Technikwissen punktgenau:

Digitale Technologien und Anwendungen in der Landschaftsarchitektur

Alle Beiträge der Konferenz „Digital Landscape Architecture – DLA 2022“ an der Harvard University in Cambridge, USA, u. a. zu den Themen Post-pandemic Hybridization in Life, Landscapes and Practice; Data Science and Landscape Information Modelling; Drone/UAV Imagery and Uses; Mixed Reality (AR/VR) and Immersive Environments.

Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten. Sowohl das E-Book als auch das Kombiangebot (Buch + E-Book) sind ausschließlich auf www.vde-verlag.de erhältlich.

Bestellen Sie jetzt: (030) 34 80 01-222 oder www.vde-verlag.de/buecher/537724



- OSPAR (2017): Summary Status of the OSPAR Network of Marine Protected Areas (2016). Intermediate Assessment 2017.
- Papenmeier, S.; Hass, H. C.; Propp, C.; Thiese, M.; Zeiler, N. (2019): Map of sediment distribution in the German EEZ (1:10.000). https://www.bsh.de/DE/DATEN/GeoSeaPortal/geoseaportal_node.html (Zugriff 4/2020).
- Papenmeier, S.; Hass, H. C.; Valerius, J.; Thiesen, M.; Mulckau, A. (2019): Map of sediment distribution in the German EEZ (1:10.000). https://www.bsh.de/DE/DATEN/GeoSeaPortal/geoseaportal_node.html (Zugriff 4/2020).
- Papenmeier, S.; Propp, C.; Valerius, J.; Mulckau, A. (2019): Map of sediment distribution in the German EEZ. https://www.bsh.de/DE/DATEN/GeoSeaPortal/geoseaportal_node.html (Zugriff 4/2020).
- Pogoda, B. (2019): Current Status of European Oyster Decline and Restoration in Germany. In: *Humanities*, 8 (1), 12. <https://doi.org/10.3390/h8010009>.
- Pogoda, B.; Boudry, P.; Bromley, C.; Cameron, T. C.; Colsohl, B.; Donnan, D.; Hancock, B.; Hugh-Jones, T.; Preston, J.; Sanderson, W. G.; Sas, H.; Brown, J.; Bonacic, K.; von Nordheim, H.; zu Ermgassen, P. S. E. (2020a): NORA moving forward: Developing an oyster restoration network in Europe to support the Berlin Oyster Recommendation. In: *Aquatic Conservation*, 30 (11), S. 2031-2037. <https://doi.org/10.1002/aqc.3447>.
- Pogoda, B.; Brown, J.; Hancock, B.; Preston, J.; Pouvreau, S.; Kamermans, P.; Sanderson, W. G.; von Nordheim, H. (2019): The Native Oyster Restoration Alliance (NORA) and the Berlin Oyster Recommendation: bringing back a key ecosystem engineer by developing and supporting best practice in Europe. In: *Aquatic Living Resources*, 32 (13), 9. <https://doi.org/10.1051/alr/2019012>.
- Pogoda, B.; Merk, V.; Colsohl, B.; Hausen, T.; Peter, C.; Pesch, R.; Kramer, M.; Jaklin, S.; Holler, P.; Bartholomä, A. (2020b): Site selection for biogenic reef restoration in offshore environments: The Natura 2000 area Borkum reef ground as a case study for native oyster restoration. In: *Aquatic Conservation*, 30 (11), S. 2163-2179. <https://doi.org/10.1002/aqc.3405>.
- Pogoda, B.; Peter, C.; von Nordheim, H. (2021): Wiederansiedlung und ökologische Bedeutung der Europäischen Auster in der deutschen Nordsee. In: *Natur und Landschaft*, 96 (2), S. 83-88. <https://10.17433/2.2021.50153881.83-88>.
- Pourghasemi, H. R.; Pradhan, B.; Gokceoglu, C. (2012): Application of fuzzy logic and Analytical Hierarchy Process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. In: *Natural Hazards*, 63 (2), S. 965-996. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0217-2>.
- Propp, C.; Bartholomä, A.; Hass, C.; Holler, P.; Lambers-Huesmann, M.; Papenmeier, S.; Richter, P.; Schwarzer, K.; Tauber, F.; Zeiler, M. (2016): Guideline for Seafloor Mapping in German Marine Waters Using High-Resolution Sonars, Version 1.0. BSH Ed (720), 147.
- Richter, P.; Schwarzer, K.; Feldens, A.; Propp, C.; Thiesen, M.; Zeiler, M. (2019): Map of sediment distribution in the German EEZ (1:10.000). https://www.bsh.de/DE/DATEN/GeoSeaPortal/geoseaportal_node.html (Zugriff 4/2020).
- Richter, P.; Schwarzer, K.; Feldens, A.; Propp, C.; Thiesen, M.; Zeiler, M. (2020): Map of sediment distribution in the German EEZ (1:10.000). https://www.bsh.de/DE/DATEN/GeoSeaPortal/geoseaportal_node.html (Zugriff 4/2020).
- Romeijn, H.; Faggian, R.; Diogo, V.; Sposito, V. (2016): Evaluation of deterministic and complex Analytical Hierarchy Process methods for agricultural land suitability analysis in a changing climate. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5 (6), 99. <https://doi.org/10.3390/ijgi5060099>.
- Rothe, M.; Hauser, S.; Bakker, F.; Pesch, R. (2022): markorothe/oyster_restoration_mca: Multicriterial suitability analysis for finding areas to re-establish the European Oyster in the German EEZ (github.com).
- Saaty, T. L. (1977): A scaling method for priorities in hierarchical structures. In: *Journal of Mathematical Psychology*, 15 (3), S. 234-281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).
- Saaty T. L. (1990): How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. In: *European Journal of Operational Research*, 48 (1), S. 9-26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)900571](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)900571).
- Saaty, T. L.; Tran, L. T. (2007): On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the Analytic Hierarchy Process. In: *Mathematical and Computer Modelling*, 46 (7-8), S. 962-975. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2007.03.022>.
- Saaty, T. L.; Vargas, L. G. (1987): Uncertainty and rank order in the Analytic Hierarchy Process. In: *European Journal of Operational Research*, 32 (1), S. 107-117. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(87\)90275-X](https://doi.org/10.1016/0377-2217(87)90275-X).
- Saha, S.; Gayen, A.; Pourghasemi, H. R.; Tiefenbacher, J. P. (2019): Identification of soil erosion-susceptible areas using fuzzy logic and Analytical Hierarchy Process modeling in an agricultural watershed of Burdwan district, India. In: *Environmental Earth Sciences*, 78 (23), S. 1-18. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8658-5>.
- Sánchez-Lozano, J.; García-Cascales, M.; Lamata, M. (2016): GIS-based onshore wind farm site selection using Fuzzy Multi-Criteria Decision Making methods. Evaluating the case of Southeastern Spain. In: *Applied Energy*, 171, S. 86-102. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.030>.
- Saranya, T.; Saravanan, S. (2020): Groundwater potential zone mapping using analytical hierarchy process (AHP) and GIS for Kancheepuram District, Tamilnadu, India. In: *Modeling Earth Systems and Environment*, S. 1-18. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00744-7>.
- Schnabel, M.; Gravenhorst, T.; Belkot, T.; Friebe, F.; Erdmann, S.; Koch, S. (2022): Visual Data Discovery im Kontext der geodatenbasierten Wärmeleitplanung. In: *gis.Science*, 2/2022, S. 63-74.
- Schönrock, S. (2016): Vergleichende Erprobung prädiktiv-statistischer Verfahren zur flächenhaften Kartierung benthischer Weichbodengemeinschaften in der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der deutschen Nordsee. Berlin, 123 S.
- UNEP/FAO (2020): The UN Decade on Ecosystem Restoration 2021-2030. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30919/UNDecade.pdf?sequence=11> (Zugriff 6/2020).
- Zandi, P.; Rahmani, M.; Khanian, M.; Mosavi, A. (2020): Agricultural Risk Management Using Fuzzy TOPSIS Analytical Hierarchy Process (AHP) and Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). In: *Agriculture*, 10 (11), 504. <https://doi.org/10.3390/agriculture10110504>.