

Anwendung von Radar für das Studium des Zuges von Meeresvögeln durch die Strasse von Gibraltar

María Mateos und Bruno Bruderer



MATEOS, M. & B. BRUDERER (2010): Radar technology applied to the study of seabird migration across the Strait of Gibraltar. *Ornithol. Beob.* 107: 179–190.

A combination of radar and visual observations is used to test the informative power of both methods when studying seabird migration occurring at very low levels above the sea surface. Besides the lack of information on species, the detection of birds on the radar screen is limited by disturbing echoes from the waves, which increase with wind force. On the other hand radar can complement visual observations by providing exact distances and information on flight behaviour. Applied in combination, the two methods provided estimates of the Mediterranean populations of endangered species (Cory's and Balearic Shearwater), and allowed to study flight behaviour with respect to the coast and wind conditions. This information was implemented for the development of a model to assess the collision risk of seabirds with off-shore wind parks.

María Mateos, Universidad de Cádiz, Departamento de Biología, Av. Republica Saharaui, E-11510 Puerto Real, Cádiz, E-Mail maria.mateos@uca.es; Bruno Bruderer, Schweizerische Vogelwarte, CH-6204 Sempach, E-Mail bruno.bruderer@vogelwarte.ch

Meeresvögel sind eine Gruppe von langlebigen Vögeln, die spät brutreif werden und nur wenig Nachwuchs produzieren. Die Überlebensrate der Altvögel stellt deshalb einen Schlüsselfaktor für ihre Populationsdynamik und ihren Schutz dar. Da diese Vögel einen grossen Teil ihres Lebens auf offener See verbringen, ist das Studium der Mortalitätsfaktoren fern von den Brutplätzen nicht nur von grosser Bedeutung, sondern auch eine grosse Herausforderung. Neue Gefahren für Meeresvögel entstehen durch die in zunehmender Zahl und Ausdehnung geplanten Windenergieanlagen in küstennahen Meeresgebieten (z.B. ICES 2003, Drewhitt & Langston 2006, EWEA 2007).

Die Meerenge von Gibraltar ist an der engsten Stelle 14,4 km breit. Bei Meeresvögeln, die nicht über Land, aber oft in Küstennähe ziehen, bietet sie eine einzigartige Möglichkeit, grosse Anteile der im Mittelmeer brütenden oder

überwinternden Populationen während ihres Frühlings- und Herbstzuges zu beobachten. Ihr in geringer Höhe über der Meeresoberfläche erfolgreicher Zug erleichtert visuelle Zählungen, erschwert aber Radarbeobachtungen, weil die Vögel bei zunehmendem Wellengang in den durch die Wellen erzeugten Störechos verschwinden.

Die beiden Methoden wurden in der vorliegenden Arbeit kombiniert verwendet, und wir vergleichen sie hier bezüglich ihrer Aussagekraft. Die mit beiden Methoden erzielten Ergebnisse werden genutzt zur Charakterisierung des Zugverhaltens und für die Schätzung der im Bereich von Windenergieanlagen zu erwartenden Mortalität. Folgende vier Ziele stehen im Vordergrund: (1) Prüfen, inwiefern ein kommerzieller Schiffsradar mit 10 cm Wellenlänge für quantitative oder qualitative Studien an ziehenden Meeresvögeln verwendet werden

kann. (2) Zeigen, wie durch eine geeignete Methodenkombination Populationschätzungen möglich werden. (3) Charakterisierung des

Zugverhaltens der zahlenmässig bedeutendsten Arten bzw. Gruppen, insbesondere ihrer Fluggeschwindigkeiten und Flugrichtungen unter



Abb. 1. (a) Dreimal überhöhtes Relief der Meerenge von Gibraltar. Blick vom Atlantik Richtung Mittelmeer (von W nach E). Der Pfeil zeigt auf die Spitze der Halbinsel Tarifa mit der Beobachtungsstation. Aufnahme SRTM Team, NASA JPL (öffentlich verfügbar von <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=3926>). (b) Blick von N nach S vom spanischen Festland über den Strand von Tarifa und die vorgelagerte Halbinsel mit dem Leuchtturm auf die marokkanische Küste. Aufnahme D. Cuenca. (c) Beobachtungsstation auf der Südspitze der Halbinsel Tarifa mit Feldbeobachtern im Vordergrund, dem Radar rechts neben dem Leuchtturm und der Wetterstation (nicht sichtbar) auf dem Hügel links neben den Beobachtern. Aufnahme G. M. Arroyo. – (a) Vertically exaggerated relief (3-times) of the Strait of Gibraltar; view from the Atlantic towards the Mediterranean Sea (from W towards E). The arrow indicates the tip of Tarifa Island with the bird observatory. (b) View from N towards S from the Spanish mainland across the beach of Tarifa and the peninsula with the light-house to the Moroccan coast. (c) The bird observatory on the southern tip of the peninsula with the field observers in the foreground, the radar to the right of lighthouse's base, and the weather station (not visible) on the hill to the left of the observers.

verschiedenen Windbedingungen. (4) Erarbeiten eines Modells zur Schätzung des Kollisionsrisikos von Meeresvögeln mit Windturbinen-Anlagen.

Die vorliegende Arbeit liefert einen kurzen Überblick über die Dissertation der Erstautorin (Mateos Rodríguez 2009). Sie enthält unter anderem Teile, die im Original nur in spanischer Sprache verfügbar sind, sowie Diskussionspunkte, die im Rahmen der öffentlichen Verteidigung der Dissertation (am 13. November 2009 in Cádiz) erörtert wurden.

1. Methode

Zum Studium der zwischen Mittelmeer und Atlantik hin und her ziehenden Meeresvögel wurde auf der Halbinsel Tarifa, der südlichsten Spitze des europäischen Festlandes (Abb. 1), im Frühling und Herbst 2006 eine Station für kombinierte Feld- und Radarbeobachtung betrieben. Ein mit Fernrohr (Zeiss 20–60 × 85) ausgerüsteter Feldbeobachter identifizierte und zählte die Meeresvögel, die eine je nach Lichtverhältnissen festgelegte, aber nahe der Südrichtung liegende Referenzlinie überquerten. Ein mit Feldstecher (Zeiss Victory 10 × 42) ausgerüsteter Beobachter kontrollierte, ob in geringer Entfernung oder über dem mit Fernrohr kontrollierten Bereich Meeresvögel passierten. Der Beobachter mit dem Feldstecher hatte zusätzlich die Aufgabe, die Beobachtungen in Echtzeit elektronisch zu registrieren (Zeit, Art, Schwarmgröße, geschätzte Entfernung und Flugrichtung). Die Feldbeobachter standen 2 m über dem Meeresspiegel und 5 m unterhalb des Radarstandortes. Die Radarantenne war auf einem 2,5 m hohen Träger befestigt und befand sich damit knapp 10 m über dem Meeresspiegel, wenige Meter vom Leuchtturm entfernt. In der im Leuchtturm untergebrachten Radarzentrale arbeiteten zwei Mitarbeiter. Der eine versuchte auf dem Bildschirm die möglichen Vogeleos zu erkennen und ihre Flugwege zu charakterisieren; relevante Informationen gab er über Funk an die Feldbeobachter weiter. Der zweite Radar-Mitarbeiter hatte die Aufgabe, die Daten in einem Computer zu registrieren. Der verwendete Furuno Schiffsradar

(Modell FR-2137SBB) mit 10 cm Wellenlänge (S-Band) kann auf Distanzbereiche von 4,5 bzw. 9,1 km eingestellt werden; die beiden Bereiche wurden alternierend in aufeinanderfolgenden Beobachtungssequenzen von 30 min verwendet. Der Radar tastete kontinuierlich einen Sektor von 180° südlich der Halbinsel Tarifa ab. Vom Radarbeobachter bezeichnete Echos konnten mit der Funktion «Video-plotter» des Radars verfolgt werden. Im 5-s-Takt wurden Punkte des Flugweges mit einem Grafikprogramm extrahiert und über mindestens 30 s aufgezeichnet (Abb. 2). Die relativ geringe zeitliche Dichte der Punkte bewirkt eine Glättung der Flugwege, wobei kleinräumige Richtungsänderungen, wie sie etwa beim dynamischen Gleiten von Sturmtauchern entstehen, eliminiert werden. Um eine Überbewertung häufiger Arten und insbesondere Pseudoreplikationen aufgrund von Tagen mit geringen Windgeschwindigkeiten und deshalb grossen Zahlen an erfassten Zielen zu vermeiden, wurden von jeder Art oder Artgruppe nicht mehr als 3 Ziele pro Tag für die Flugwegauswertung verwendet. Mit Hilfe des GIS-Programms ArcView wurden für diese Objekte folgende Daten gewonnen: Geografische Position und Distanz zwischen den registrierten Flugwegpunkten sowie Flugeschwindigkeit und Flugrichtung.

Die Informationen über die Position (Richtung und Entfernung) von Radarechos oder visuell identifizierten Vögeln wurden über Funk zwischen den beiden Beobachtungsequenzen ausgetauscht. Anfänglich wurde der Informationsaustausch in beide Richtungen getestet. Sowohl bei der «Übergabe» von Radarechos an die Feldbeobachter wie auch in umgekehrter Richtung ergab sich eine «Übernahmewahrscheinlichkeit» von 35–40 %. Allerdings war die Sicherheit der Zielzuordnung beim Transfer von den Feldbeobachtern zum Radar besser; deshalb wurde im Hauptteil der Studie nur noch diese Richtung des Informationsflusses angewendet. Die Feldbeobachter meldeten also die Position von identifizierten und lokalisierten Einzelvögeln oder Schwärmen (Richtung und geschätzte Entfernung) an die Radarbeobachter. Konnte das entsprechende Echo auf dem Radarbildschirm entdeckt werden, wurde der Flugweg elektronisch registriert. Um die

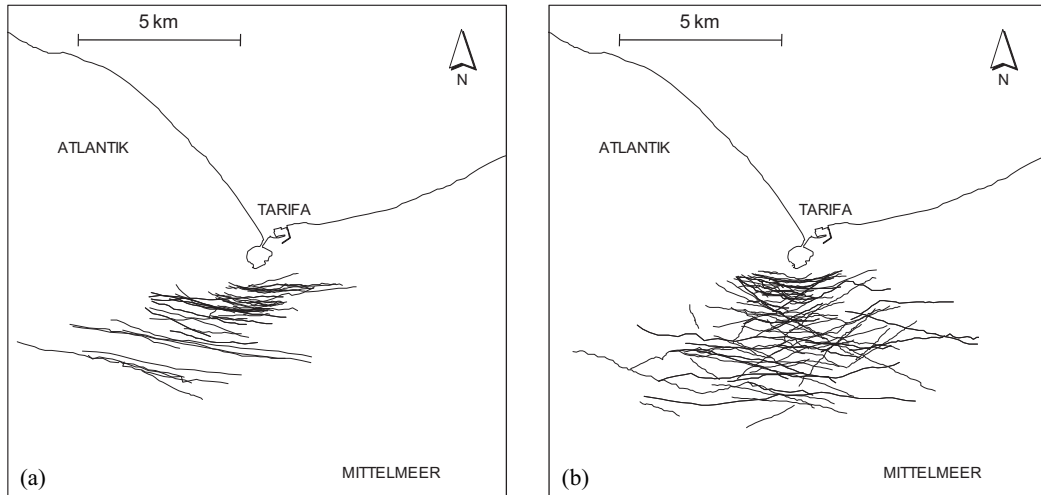


Abb. 2. (a) Flugwege von Alken (Papageitaucher und Tordalk), die im Frühling Richtung Atlantik flogen. (b) Flugwege von Sturmtauchern (Balearen- und Schwarzschnabelsturmtaucher) auf ihrem Flug vom Atlantik ins Mittelmeer. – (a) *Tracks of auks (Atlantic Puffin and Razorbill), flying towards the Atlantic in spring.* (b) *Tracks of shearwaters (Cory's and Balearic Shearwater) on their flight from the Atlantic towards the Mediterranean Sea.*

aktuelle Entdeckungswahrscheinlichkeit des Radars zu maximieren, wurden dessen Einstellungen (Empfindlichkeit und Filter gegen Störungen durch Wellengang) täglich den aktuellen Bedingungen angepasst. Leider ging damit die quantitative Vergleichbarkeit von Tag zu Tag verloren, während die Erfassung von visuell entdeckten Zielen verbessert wurde. Kombinierte Radar- und Feldbeobachtungen wurden 2006 an 17 Tagen im Frühling (März/April) und an 15 Tagen im Herbst (Oktober/November) durchgeführt. Die Durchzugsrate wurde an insgesamt 87 Tagen in den Jahren 2005–2007 visuell ermittelt (Mitte Oktober bis Mitte November).

Regelmässige Windmessungen an der Südspitze der Halbinsel (10 m über dem Meeresspiegel) bildeten die Basis für die Berechnung von Eigengeschwindigkeit (Geschwindigkeit relativ zur Luft, «air speed») und Eigenrichtung (Richtung der Körperachse, «heading»); beides berechnet sich aus dem Flugvektor minus den Windvektor. Dabei muss damit gerechnet werden, dass die Windgeschwindigkeiten mit der Entfernung vom Ufer leicht zunehmen und die Windrichtungen geringfügig verfälscht

sind, sodass eine zusätzliche Streuung in den berechneten Werten entsteht. Da beinahe alle registrierten Meeresvögel im Höhenbereich unter 30 m flogen, spielten Änderungen der Windverhältnisse mit der Flughöhe keine nennenswerte Rolle.

2. Ergebnisse

2.1. Aussagekraft der Radarbeobachtungen

Bei den Radarbeobachtungen fehlt die Artbestimmung; ausserdem waren aufgrund der durch Wellen erzeugten Störechos keine quantitativen Radarbeobachtungen möglich. Bei Windstärken über 5 Beaufort (> 38 km/h) nahm die Intensität der Störechos derart zu, dass es kaum mehr möglich war, Meeresvögel zwischen den Echos der Wellen zu entdecken. Deshalb wurde die Arbeit auf den Vergleich zwischen Radar- und Sichtbeobachtungen ausgerichtet. Trotz der erwähnten täglichen Anpassung der Radareinstellungen an die aktuellen Bedingungen konnten jedoch visuell entdeckte Meeresvögel nur zu 35,5 % auf dem Bildschirm des Radars lokalisiert und verfolgt

werden. Der Erfassungsgrad war bei Einstellung des Radars auf 4,5 km Reichweite etwas besser (38 %) als bei 9,1 km Reichweite (32 %). Der Anteil der mit Radar erfassten Ziele änderte sich mit der Entfernung vom Beobachtungsort nicht, was darauf hindeutet, dass die radartechnisch bedingte Entdeckungswahrscheinlichkeit bis zu einer Distanz von mindestens 3 km für Meeresvögel nicht eingeschränkt war. Visuell und mit Radar wurden 90 % der Ziele innerhalb von 3 km entdeckt, die restlichen 10 % waren (exponentiell abnehmend) bis etwa 7 km verteilt. Die Wahrscheinlichkeit der Radarentdeckung war deutlich abhängig von der Schwarmgrösse.

Die mit Radar von Feldbeobachtern übernommenen Ziele erhalten eine erhöhte Bedeutung, weil sie einer Vogelart zugeordnet und die Schwarmgrößen bestimmt werden können. Die identifizierten Radarechos erlauben die Aufzeichnung von Flugwegen und damit die Beurteilung des Flugverhaltens der sechs häufigsten zwischen Atlantik und Mittelmeer zirkulierenden Arten (Tab. 1).

2.2. Räumliche Verteilung der Meeresvögel und Populationsschätzungen

Populationsschätzungen durchziehender Meeresvögel erfordern neben der Artbestimmung verlässliche Schätzungen der Grösse von in verschiedenen Entfernungen zur Küste vorbeifliegenden Schwärmen. Innerhalb der Hauptbeobachtungsdistanz von 3 km waren die Fehler der Feldbeobachter in der Entfernungsschätzung erstaunlich gering ($\pm 13\text{--}20\%$); allerdings zeigten sich nennenswerte Unterschiede zwischen den drei Beobachtern. Die Schätzgenauigkeit konnte mit Hilfe der Radareichung im Laufe der Zeit verbessert werden.

Da die einbezogenen Arten in der Strasse von Gibraltar nicht über Land fliegen und damit auf die Meerenge beschränkt sind, erlauben die visuellen Zählungen brauchbare Populationsschätzungen, insbesondere wenn (a) die Vögel in Küstennähe fliegen, wenn (b) die Feldbeobachter ihre Distanzschätzungen mit Hilfe von Radarmessungen kalibrieren und verbessern können und wenn (c) die optischen Distanzschätzungen anschliessend mit einem Generalized Additive Model (GAM) aufgrund

Tab. 1. Eckdaten der sechs häufigsten über dem Meer fliegenden Arten: mittlere Schwarmgrösse (und Standardabweichung) der für den Radar-Vergleich visuell entdeckten Gruppen; Gesamtzahl der visuell entdeckten Schwärme und Prozentsatz der mit Radar übernommenen Ziele; Total der im Herbst 2006 gezählten Durchzügler (Individuenzahl inkl. Umkehrzug); Verhältnis zwischen den Durchzugszahlen der drei häufigsten Arten und den im Radar-Vergleich einbezogenen Individuenzahlen (mittlere Schwarmgrösse \times Zahl der Schwärme); der Netto-Zug (Durchschnitt 2006/07) enthält zusätzlich zu den gezählten Vögeln eine Schätzung der ausserhalb der Beobachtungsintervalle durchgezogenen Vögel; zudem wurde der Umkehrzug vom eigentlichen Zug subtrahiert. – *Key figures for the six most frequent species: mean flock size and its standard deviation for the visually detected flocks in the radar-comparison; number of the visually detected flocks and percentage of targets taken over by radar; total of individuals counted on passage during autumn 2006 (including birds on reverse migration); proportion of passage numbers of the three most frequent species and the number of individuals detected by radar (mean flock size \times number of flocks); the net migration or net flow (average 2006/07) comprises not only the number of counted birds, but additionally the estimated volume of passage outside the counting times, and a reduction by the number of birds on reverse migration.*

Art	Schwarmgrösse (Mittel \pm sd)	n Schwärme visuell (% Radar)	Zählung Herbst 2006 (Ind.)	Verhältnis Zählung/ Radar	Netto-Zug Herbst 2006/07
Basstölpel <i>Morus bassanus</i>	1,8 \pm 1,7	1174 (34,0)	8316	1 / 0,9	21140
Gelbschnabelsturmt. <i>Calonectris diomedea</i>	12,8 \pm 62,7	945 (40,4)	60039	1 / 0,87	154253
Balearensturmtaucher <i>Puffinus mauretanicus</i>	2,9 \pm 3,7	675 (39,9)	8477	1 / 1,0	18603
Papageitauer <i>Fratereula arctica</i>	6,7 \pm 7,5	278 (20,5)			
Tordalk <i>Alca torda</i>	6,7 \pm 7,5	223 (23,8)			
Skua <i>Stercorarius skua</i>	1,1 \pm 0,3	64 (21,9)			

von exakten Distanzmessungen korrigiert werden.

Die Zahl der visuell entdeckten wie auch die Zahl der mit Radar übernommenen Vögel nahm im Distanzintervall zwischen 500 und 3000 m von der Küste beinahe linear ab. Ob dies der tatsächlichen Verteilung der Vögel oder einer Abnahme der Entdeckungswahrscheinlichkeit entspricht, bleibt zu klären (s. Kap. 3). Innerhalb des überwachten Bereichs variierte die Distanz zur Küste je nach Art und Windverhältnissen. Basstölpel flogen dabei am nächsten vorbei (bei Windstille im Mittel knapp 1200 m entfernt), Gelbschnabelsturmtaucher mit durchschnittlich knapp 1700 m am weitesten vom Beobachtungsposten. Die Entfernung zum Beobachtungsposten nahm mit zunehmendem Gegenwind deutlich ab (bei Windgeschwindigkeiten um 60 km/h sank die Distanz

im Vergleich zur Windstille bei allen Arten auf etwa die Hälfte). Dagegen zeigten die Entfernungen keinen systematischen Zusammenhang mit der Stärke der Rückenwinde (Abb. 3). Es scheint, dass die Vögel dem Gegenwind ausweichen, indem sie nahe der Küste fliegen.

Populationsschätzungen sind vor allem für die beiden Sturmtaucher interessant, weil die im westlichen Mittelmeer brütende Nominatform des Gelbschnabelsturmtauchers *C. d. diomedea* mit einem geschätzten Brutbestand von etwa 30000–43000 Paaren und 100000–140000 Individuen (inkl. Nichtbrüter) als stark gefährdet gilt und der Balearensturmtaucher mit 2000–2400 Paaren und einem Gesamtbestand (inkl. Nichtbrüter) im Bereich von 8000 Individuen gemäss IUCN-Klassifikation vom Aussterben bedroht ist (Details zu den Bestandsschätzungen in Mateos Rodríguez 2009).

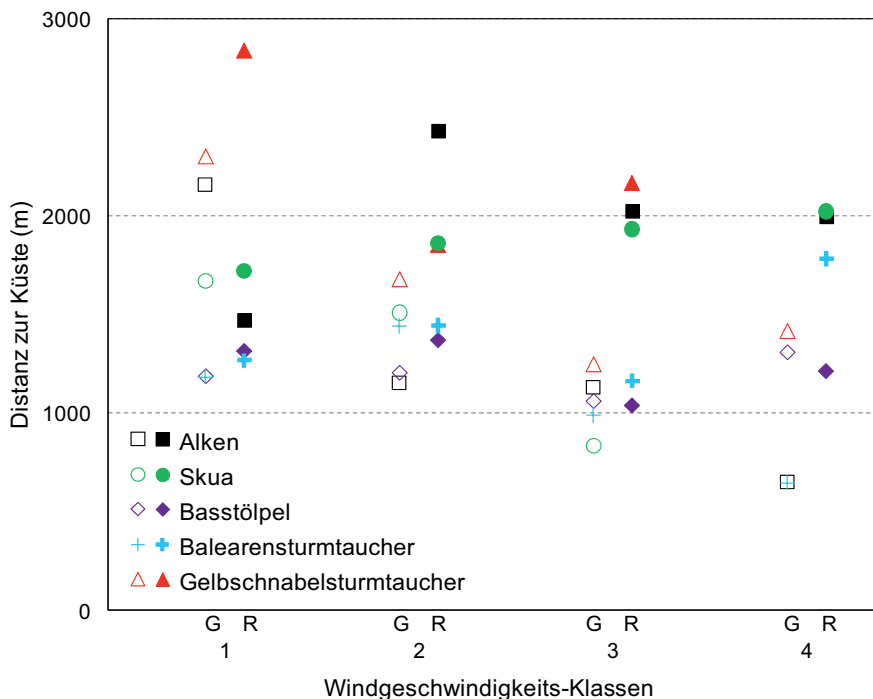


Abb. 3. Veränderung der Entfernung von vier Arten sowie der Gruppe der Alken von der Küste in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Gegenwindes (G, helle Signaturen) und des Rückenwindes (R, dunkle Signaturen). Die vier Windklassen beinhalten Windgeschwindigkeiten von 2–14 (1), 15–28 (2), 29–50 (3) und 51–61 km/h (4). – Variation in the off-shore distance of four species and the auks in relation to the speed of headwinds (G, light symbols) and of tailwinds (R, dark symbols). The four wind classes comprise wind speeds of 2–14 (1), 15–28 (2), 29–50 (3) and 51–61 km/h (4), respectively.

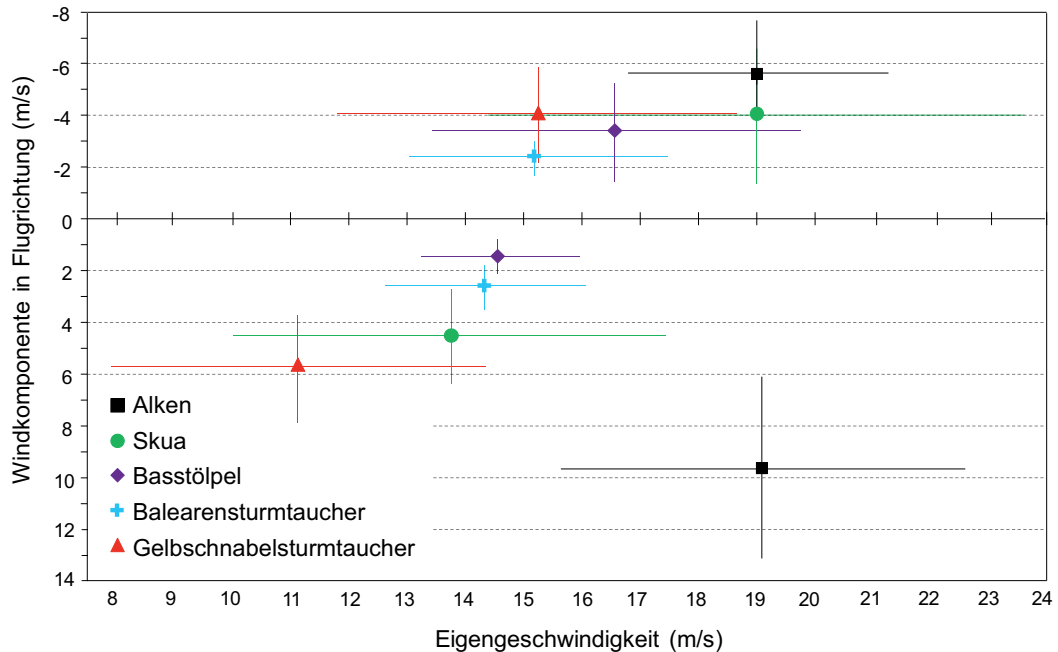


Abb. 4. Mittlere Eigengeschwindigkeit von vier Arten sowie der Gruppe der Alken in Abhängigkeit von der mittleren Windkomponente in Zugrichtung (eine negative Windkomponente bedeutet Gegenwind). Die horizontalen und vertikalen Linien durch die Artsignaturen geben die Standardabweichung der jeweiligen Geschwindigkeiten. – Mean air speeds of four species and the auks in relation to the mean wind component in track direction. The horizontal and vertical lines through the species symbols provide the standard deviation of the corresponding speeds.

Eine auf einem GAM basierende Methode erlaubte es, auch den Durchzug zwischen den tatsächlichen Beobachtungsintervallen in die Populationsberechnungen einzubeziehen. Aus den visuellen Zählungen der Jahre 2005–2007 resultierten für den der Nordküste der Strasse von Gibraltar folgenden Zug des Gelbschnabelsturmtauchers Netto-Durchzugsvolumina (Hauptdurchzug minus Umkehrzug) pro Herbst von etwa 150000 ± 50000 Individuen (für die einzelnen Jahre: 154000, 204000 und 105000). Beim Balearensturmtaucher lag der berechnete Netto-Durchzug für die Herbstperiode 2006 bei rund 18000 ± 1600 sowie 2007 bei rund 19000 ± 1100 Individuen, wobei die Berechnung der Netto-Zahlen aufgrund von Nahrungsflügen relativ unsicher ist. Während die bisher verfügbaren Bestandsangaben beim Gelbschnabelsturmtaucher innerhalb des weiten Bereichs der Durchzugszählungen liegen, sind die Zugdaten

beim Balearensturmtaucher höher als die bisherigen Bestandsschätzungen.

2.3. Flugverhalten

Die mit Radar gemessenen mittleren Eigengeschwindigkeiten betragen bei Alkenartigen (Tordalk und Papageitaucher kombiniert) $18,9 \text{ m/s}$ ($sd = 2,6 \text{ m/s}$) und veränderten sich bei Rücken- und Gegenwind kaum (Abb. 4), wohl weil die Variationsmöglichkeiten bei diesen rasch fliegenden Schlagfliegern mit grosser Flächenbelastung beschränkt sind. Die beiden Sturmtaucher wiesen die geringsten Eigengeschwindigkeiten auf, was u.a. darauf beruhen könnte, dass diese dynamischen Gleiter sich nicht geradlinig fortbewegen, sondern im Zickzackflug den nötigen Auftrieb gewinnen. Bei den «Nicht-Alken» veränderte sich die Eigengeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Wind-

Tab. 2. Eigengeschwindigkeiten (V_a) der häufigsten Meeresvögel in der Strasse von Gibraltar bei möglichst geringem Windeinfluss, geordnet nach abnehmender Verwendung von Schlagflug, d.h. Übergang zu dynamischem Segeln (mit dem Symbol †). Die Reihenfolge entspricht ungefähr der abnehmenden Flächenbelastung. Nur die Skua lässt sich mit ihren langen und zugleich relativ tiefen Flügeln nicht in diese Sequenz einfügen. – *Air speeds (V_a) of the most frequent seabirds in the Strait of Gibraltar under limited wind influence (wind speed < 3 m/s and wind component 0 in fig. 4), arranged according to decreasing use of flapping flight, i.e. transition to dynamic gliding (with the symbol †). The sequence reflects roughly the sequence of wing loadings (mass/wing area). Only the Great Skua does not fit into the sequence due to its long and deep wings.*

Art	V_a (m/s) bei Wind < 3 m/s (Mittel \pm sd; n)	V_a (m/s) bei Windkomp. 0 aus Abb. 4	Flächen- belastung (kg/m ²)	Flugtyp
Alken (<i>Alca torda</i> und <i>Fratercula arctica</i>)	18,1 \pm 3,4; 9	19,0	13,4 bzw. 10,8	Schlagflieger
Skua <i>Stercorarius skua</i>	16,4 \pm 3,5; 5	16,5	6,3	†
Basstölpel <i>Morus bassanus</i>	15,2 \pm 2,3; 78	15,2	11,5	†
Balearensturmtaucher <i>Puffinus mauretanicus</i>	14,9 \pm 1,9; 54	14,8	9,2	†
Gelbschnabelsturmt. <i>Calonectris diomedea</i>	12,8 \pm 2,1; 32	13,5	7,7	dynam. Segler

einfluss entsprechend der aerodynamischen Theorie, d.h. Zunahme bei Gegenwind und Abnahme bei Rückenwind (Abb. 4). Abgesehen von der Skua (mit ihren langen und zugleich relativ tiefen Flügeln) sanken die Eigengeschwindigkeiten mit abnehmender Flächenbelastung und abnehmendem Schlagfluganteil (Tab. 2).

Die registrierten Flugwege zeigen einheitliche Mittelrichtungen und erstaunlich geringe Richtungsstreuung. Unabhängig von der Jahreszeit flogen die verschiedenen Arten mit ESE-Richtungen ins Mittelmeer ein und mit beinahe westlichen Richtungen aus dem Mittelmeer Richtung Atlantik. Die Mittelrichtungen lagen für die Flugwege Richtung Atlantik im Bereich von 271–278° (ca. Richtung W) mit Winkelabweichungen zwischen $\pm 8,5^\circ$ (bei den geradlinig fliegenden Alken, Abb. 2a) und $\pm 22^\circ$ (bei den variabel gleitenden Gelbschnabelsturmtauchern). Beim Flug Richtung Mittelmeer ergaben sich Richtungen zwischen 112° und 120° (ca. ESE) mit Winkelabweichungen zwischen $\pm 9,9^\circ$ und $16,4^\circ$ (Abb. 2b). Diese Flugrichtungen relativ zur Erdoberfläche variierten wenig, weil die Vögel den insgesamt geringen Einfluss seitlicher Winde durch entsprechende Einstellung der Körperachse (d.h. der Eigenrichtung) kompensierten. Lediglich im Frühjahrszug des Gelbschnabelsturmtauchers (Richtung Mittelmeer) variierten die Flugrich-

tungen etwas stärker als die Eigenrichtungen und zeigten damit partielle Drift.

2.4. Schätzung des Kollisionsrisikos

Ausgehend von den ermittelten Zahlen und dem Verhalten der Meeresvögel im Bereich des Beobachtungspostens an der Südspitze von Spanien wurde ein stochastisches Modell entwickelt, um die Kollisionswahrscheinlichkeiten in einem geplanten Windenergie-Park zu schätzen. Das entwickelte Arbeitsinstrument sieht vor, dass Faktoren wie die Ausdehnung und Struktur des Turbinenparks, die Dimensionen der Turbinen, die horizontale und vertikale Verteilung der Vögel, die Zugstärke wie auch unterschiedliche Ausweichmanöver der Vögel in verschiedenen Schritten in das Modell einbezogen werden können, um die gewichtete Bedeutung der einzelnen Faktoren im Rahmen einer Vorhersage einzustufen. Da die Zahl der potenziellen Kollisionen vor allem von der Flughöhe und vom Ausweichverhalten der Vögel abhängig ist, verzichten wir hier auf die Angabe von Zahlen. Bei den hier beobachteten Arten fliegt nämlich die Mehrheit (je nach Art und Windverhältnissen 80–100 %) unterhalb des Rotorbereichs (d.h. unter 30 m über der Meeresoberfläche) und ihr Ausweichverhalten gegenüber einzelnen Windturbinen oder ganzen Windparks ist unbekannt.

3. Diskussion

Aussagekraft der Beobachtungen: Die Untersuchungen zeigten, dass mit dem verwendeten Schiffsradar keine quantitativen Zählungen von tief fliegenden Meeresvögeln möglich sind. Eine an sich wünschbare Überwachung möglicher Nachtzugbewegungen (ohne Artbestimmung) wird damit fragwürdig. Eine quantitative Erfassung des Tagzuges der Meeresvögel ist innerhalb von 3 km mit kombinierten Radar- und Feldbeobachtungen möglich. Die Feststellung, dass sich der Anteil der mit Radar erfassten Ziele mit der Entfernung vom Beobachtungsort nicht ändert sowie die darauf basierende Annahme, dass die radartechnisch bedingte Entdeckungswahrscheinlichkeit bis zu einer Distanz von mindestens 3 km für Meeresvögel nicht eingeschränkt sei, wird gestützt durch Messungen von Schmaljohann et al. (2008), die im feststehenden Strahl eines Zielfolgeradars eine maximale Reichweite von etwa 7,5 km für einzeln fliegende Kleinvögel fanden, was etwa der Reichweite des hier verwendeten Schiffsradars für Schwärme von Meeresvögeln entspricht. Schmaljohann et al. (2008) zeigten, dass bis etwa 3 km alle Kleinvögel erfasst wurden, während die Entdeckungswahrscheinlichkeit ausserhalb dieser Distanz exponentiell abnahm.

Räumliche Verteilung und Populationsgrösse: Ob die beinahe lineare Abnahme der Vogelzahlen im Distanzintervall zwischen 500 und 3000 m der tatsächlichen Verteilung der Vögel entspricht oder ob sie abnehmender visueller Entdeckungswahrscheinlichkeit zuzuschreiben ist, bleibt zu klären. Dies könnte mit Hilfe von Transekt-Zählungen von der Fähre Tarifa-Tanger aus geschehen. Bisherige Zählungen liefern keine brauchbaren Angaben über die Distanz zur Küste, weil sie von Fähren aus gemacht wurden, die diagonal von Gibraltar oder Algeciras nach Tanger fahren (vgl. z.B. Garcia 1971, Arroyo & Cuenca 2004). Sollte sich die Verteilung der Meeresvögel innerhalb des Distanzintervalls von 3 km als einigermaßen homogen erweisen, könnte die abnehmende Entdeckungswahrscheinlichkeit mathematisch korrigiert werden. Vorläufige Beobachtungen von Schiffen aus deuten aber eher darauf hin,

dass die beobachtete Verteilung real sein könnte, dass nämlich der Zug im Bereich der südlichsten Spitze Spaniens relativ konzentriert in Küstennähe abläuft.

Während die bisher verfügbaren Bestandsangaben beim Gelbschnabelsturmtaucher (Heath et al. 2000) im selben weiten Bereich liegen wie die Durchzugszählungen, sind die Zugdaten beim Balearensturmtaucher höher als die bisherigen Bestandsschätzungen (Oro et al. 2004, BirdLife International 2009). Dies könnte andeuten, dass die Zählungen in Tarifa für diese Art einen hohen Erfassungsgrad haben und damit eine bessere Schätzung ergeben als die Brutbestandsaufnahmen. Die Diskrepanz verlangt aber nach einer Überprüfung beider Schätzmethode, wobei der vorher erwähnten Überprüfung der räumlichen Verteilung der Meeresvögel und ihrem Zugverhalten vor der Küste Tarifas eine grosse Bedeutung zukommt.

Flugverhalten: Die Geschwindigkeitsberechnungen berücksichtigen kleinräumige Richtungsänderungen in den Flugwegen nicht. Deshalb ist es möglich, dass die berechneten Eigengeschwindigkeiten bei den Gleitfliegern etwas zu tief sind. Messungen mit Zielfolgeradar wären hilfreich. Eine weitere Unsicherheit besteht darin, dass sich die Winde auf dem Meer von den an Land gemessenen Winddaten unterscheiden könnten. Eine interessante Fragestellung für zukünftige Untersuchungen ergibt sich aus den Richtungsunterschieden zwischen den gegen den Atlantik bzw. gegen das Mittelmeer erfolgenden Flüge. Was könnte für diesen unabhängig von der Jahreszeit vorhandenen Unterschied verantwortlich sein? Welchen Einfluss haben die topografischen Bedingungen auf das Richtungsverhalten? Die Tatsache, dass die Vögel Seitenwinde weitgehend kompensieren, könnte mit der besonderen Lage des Beobachtungsortes zusammenhängen. Die Vögel sehen zu beiden Seiten die Küste und vermeiden es offensichtlich, der Halbinsel Tarifa zu nahe zu kommen (s. etwa die gebogenen Flugwege der nahe an Tarifa vorbeifliegenden Sturmtaucher in Abb. 2b). Es scheint, dass diese Meeresvögel die Meerenge so rasch wie möglich und unter beliebigen Windbedingungen durchqueren.

Kollisionsrisiko: Die Kollisionsgefahr für die tief über dem Wasser fliegenden Mee-

resvögel ist generell geringer als bei anderen Vögeln, weil sie nur selten in den Bereich der Rotoren gelangen. Da die meisten Meeresvögel (je nach Art und Windverhältnissen 80–100 %) in den untersten 30 m (d.h. unterhalb der Turbinen) fliegen, dürften sie vor allem mit den unteren Teilen der Turbinentürme kollidieren. Dieses Kollisionsrisiko wurde bei den bisherigen Berechnungen jedoch nicht berücksichtigt. Auch im Höhenbereich der Turbinen wurden Kollisionen mit den Turbinenmasten ausgeklammert. Bei zukünftigen Berechnungen wären diese festen Strukturen einzubeziehen. Von grundlegender Bedeutung wäre es zu zeigen, welchen Einfluss unterschiedliches Ausweichverhalten gegenüber ganzen Windparks (mit unterschiedlicher Turbinenverteilung) und gegenüber einzelnen Turbinen auf die ermittelten Kollisionsraten haben.

Voraussetzung für die Berechnung von Kollisionsrisiken sind einerseits die Zahl und Verteilung der Turbinen, andererseits die Zahl und die Verteilung der einfliegenden Vögel. Ausschlaggebender Faktor für das Kollisionsrisiko ist anschliessend das angenommene Ausweichverhalten der Vögel gegenüber ganzen Windparks und einzelnen Turbinen. Ein zusätzlicher Einfluss kann sich aus der Rotationsgeschwindigkeit und der Durchfluggeschwindigkeit und -richtung ergeben (Band et al. 2007).

In der Praxis wird es darum gehen, Windparks nicht dort zu errichten, wo mit Zugkonzentrationen zu rechnen ist. Ausserdem sollten die Türme gut sichtbar sein. Das Ausweichverhalten gegenüber einzelnen oder Gruppen von Windturbinen müsste für verschiedene Arten studiert werden. Insbesondere wäre zu untersuchen, ob eher grossräumige Ausweichflüge gegenüber einem relativ geschlossenen Block von Turbinen zu erwarten sind, oder ob etwas weiträumiger verteilte Turbinen erfolversprechender wären, weil sie kleinräumige Ausweichmanöver innerhalb des Turbinenparks begünstigen.

Zusammenfassung, Extended summary

Eine Kombination von Radarmessungen und visuellen Beobachtungen wurde verwendet, um den Informationswert beider Methoden beim Studium des Zu-

ges von in geringer Höhe über der Wasseroberfläche fliegenden Meeresvögeln zu untersuchen. Abgesehen vom Fehlen von Angaben über die beteiligten Vogelarten ist die Radar-Entdeckung von Vogelechos eingeschränkt durch Störechos von Meereswellen; bei Windstärken über 5 Beaufort nimmt der Wellengang derart zu, dass Vogelschwärme kaum mehr entdeckt werden können. Andererseits können Radarmessungen den Wert von visuellen Beobachtungen erhöhen, indem sie exakte Distanzmessungen und Angaben über das Flugverhalten liefern. Kombiniert angewendet erlaubten die beiden Methoden das Studium des Flugverhaltens relativ zur Küste sowie in Abhängigkeit von den Windbedingungen. Ausserdem ergaben sich neue Schätzungen der Brutpopulationen von zwei gefährdeten Arten, dem Gelbschnabelsturmtaucher und dem Balearensturmtaucher. Die Informationen wurden einbezogen bei der Entwicklung eines Modells zur Schätzung des Kollisionsrisikos mit Windturbinen-Parks.

Radar technology applied to the study of seabird migration across the Strait of Gibraltar

The doctoral thesis of the first author (Mateos Rodríguez 2009) deals with combined visual and radar studies of spring and autumn migration of seabirds breeding or wintering in the Mediterranean Sea. Funnelled in the Strait of Gibraltar (fig. 1) and flying low over the sea, these marine birds provide good preconditions for visual counts from the tip of Tarifa Island, while radar observations from the same point are limited by disturbing echoes of the waves increasing with wind force.

The combined application and comparison of both methods in spring and autumn 2006 aimed at: (1) testing the validity of an S-band ship navigation radar for quantitative or qualitative studies of migrating seabirds; (2) demonstrating how by suitable combination of methods population estimates could become feasible; (3) characterizing the migratory behaviour of the most numerous seabirds, in particular their flight speeds and directions under various wind conditions. (4) designing a model for the assessment of collision risks with off-shore wind parks.

(1) As the available ship navigation radar does not allow quantitative surveys of seabird migration due to strong sea clutter at wind forces above 5 Beaufort, the study was focused on the comparison of visual and radar observations. To maximize the detection capacity of the radar, its settings were daily adjusted to the actual conditions. Bearing and range of visually detected and identified seabirds were transferred by radio to the radar operators (with a success rate of 35–40 %). The proportion of radar acquisition did not change with distance, indicating that the technical detection capacity of the radar for seabirds was not limited up to 3 km. The six most important species (with the number of visually detected flocks and the percentage of those taken over by the radar) were: Northern Gannet *Morus bassanus* (n = 1174,

34.0 %), Cory's Shearwater *Calonectris diomedea* (n = 945, 40.4 %), Balearic Shearwater *Puffinus mauretanicus* (n = 675, 39.9 %), Atlantic Puffin *Fratercula arctica* (n = 278, 20.5 %), Razorbill *Alca torda* (n = 223, 23.8 %), and Great Skua *Stercorarius skua* (n = 64, 21.9 %; table 1).

(2) Population estimates of seabirds migrating between the Atlantic and the Mediterranean require reliable estimates of the size and off-shore distance of the passing flocks. Most birds (90 %) were detected within 3 km off the coast (fig. 2). Within this range, the errors in the distance estimates of field observers were small (± 13 –20 %). Visual counts can provide reasonable population estimates at sites where the birds are funnelled like in the Strait of Gibraltar, when the field observers can calibrate and improve their distance estimates with the help of radar, and the visual distance estimates are subsequently adjusted according to the radar measurements with a General Additive Model (GAM). It remains to be clarified by transect counts from the ferry Tarifa–Tanger (N–S along the counting line of the bird observatory at Tarifa Island) whether the nearly linear decrease of bird numbers from 500–3000 m off-shore would correspond to the real distribution of birds or might be due to decreasing visual detection probability. Gannets flew closest to the observation point (in calm air at an average distance of nearly 1200 m), while Cory's Shearwaters were most far away (nearly 1700 m). The distance to the observation site decreased in headwinds (wind speeds of about 60 km/h led to a reduction by about 50 %), suggesting that the birds reduced the influence of headwinds by flying close to the coast (fig. 3). A method using GAM modelling was used to integrate also the passage outside the temporal observation windows into the calculation of populations. For Cory's and Balearic Shearwater the net migratory passage equalled or even surpassed the previously available estimates of the Mediterranean populations.

(3) The average airspeeds were 18.9 m/s (sd = 2.6 m/s) for the combined group of auks (Razorbill and Atlantic Puffin), with no change under head- and tailwinds (probably due to low variability of speeds in these fast flying, small-winged species; fig. 4). The two shearwaters had the lowest airspeeds, possibly additionally reduced due to zigzag tracks of these dynamic gliders. In the four non- auk species airspeed varied with wind speed according to aerodynamic theory, meaning that airspeed increased with opposing and decreased with following winds. Eliminating the wind influence mathematically and taking into account the few measurements under calm conditions resulted in the following «wind-compensated» airspeeds: Northern Gannet 15.2 m/s, Cory's Shearwater 13.5 m/s, Balearic Shearwater 14.9 m/s, and Great Skua 16.5 m/s (table 2). Independent of season the mean directions for flights towards the Atlantic varied between 271° and 278° (~ W), the angular deviation between $\pm 8.5^\circ$ (for the straight flights of auks) and $\pm 22^\circ$ (for the variably gliding shearwaters). For flights towards the Medi-

terranean directions varied between 112° and 120° (~ ESE), angular deviations between $\pm 9.9^\circ$ and 16.4°. These track directions varied only slightly, because the birds compensated the generally weak influence of side-winds by adjusting their headings. Only Cory's Shearwater varied track directions slightly more than headings, thus showing partial drift on spring migration towards the Mediterranean.

(4) A stochastic model was developed to assess the collision probabilities with off-shore wind farms in a pre-construction phase. Factors like the dimensions and structure of the wind farm and of the single turbines, the horizontal and vertical distribution of the birds, the volume of migration as well as various avoidance manoeuvres of the birds can be taken into account in different steps of the procedure to estimate the weighted importance of the input variables for the prediction of collision rates. The collision risk is generally low for the considered seabirds flying generally below 30 m (i.e. below the rotor blades). The possibility that seabirds may collide with the pylons was not included in the model. The factors with the highest influence on collision rates were the number and distribution of the birds and their assumed avoidance behaviour. In practice, it will be of prime importance to avoid constructing wind parks in areas with concentration of migration. The avoidance behaviour with respect to single turbines or wind parks should be studied for various species. In particular, it would be helpful to know whether different species prefer rather large avoidance flights around tight blocks of turbines or whether spacing-out the single turbines would offer better avoidance chances due to small-scale manoeuvres within a wind park.

Literatur

- ARROYO, G. M. & D. CUENCA (2004): Estudio de la importancia cualitativa y cuantitativa del fenómeno migratorio de las aves marinas en el Estrecho de Gibraltar. Progama Migres Marinas. Technical report, unpublished (Details der Methode als Anhang in Mateos Rodríguez 2009 publiziert).
- BAND, W., M. MADDERS & D. P. WHITFIELD (2007): Developing field and analytical methods to assess avian collision risk at wind farms. S. 259–275 in: M. LUCAS, G. F. E. JANSSE & M. FERRER (eds): Birds and wind farms risk assessment and mitigation. Servicios informativos ambientales, Quercus, Madrid.
- BirdLife International (2009): Species factsheet: *Puffinus mauretanicus*. Downloaded from www.birdlife.org, 5.6.2009.
- DESHOLM, M. & J. KAHLERT (2005): Avian collision risk at an offshore wind farm. Biol. Lett. 1: 296–298.
- DREWITT, A. L. & R. H. W. LANGSTON (2006): Assessing the impacts of wind farms on birds. Ibis 148: 29–42.
- EWEA (2007): Delivering offshore wind power in Europe. Policy recommendations for large scale

- deployment of offshore wind power in Europe by 2020. European Wind Energy Association.
- GARCIA, E. F. J. (1971): Seabird activity in the Strait of Gibraltar: A progress report. Seabird Report 1971: 30–36.
- HEATH, M., C. BORGGREVE, N. PEET & W. HAGEMEIJER (2000): European bird populations. Estimates and trends. BirdLife Conservation Series No. 10. European Bird Census Council und BirdLife International, Cambridge.
- ICES (2003): Report of the Working Group on Seabird Ecology (WGSE), ICES Headquarters, 7–10 March 2003. Document No. CM 2003/C:03. International Council for the Exploration of the Sea (ICES), Copenhagen.
- MATEOS RODRÍGUEZ, M. (2009): Aplicación de la tecnología de radar al estudio de la migración de las aves marinas a través del Estrecho de Gibraltar. Tesis doctoral, Universidad de Cádiz.
- ORO, D., J. S. AGUILAR, J. M. IGUAL, & M. LOUZA (2004): Modelling demography and extinction risk in the endangered Balearic Shearwater. Biol. Conserv. 116: 93–102.
- SCHMALJOHANN, H., F. LIECHTI, E. BÄCHLER, T. STEURI & B. BRUDERER (2008): Quantification of bird migration by radar – a detection probability problem. Ibis 150: 342–355.
- Manuskript eingegangen 28. Januar 2010*
Bereinigte Fassung angenommen 19. Juli 2010