



Master Thesis

im Rahmen des
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

„Probabilistische Betrachtung von Flughöhen am Beispiel des Rotmilans“

vorgelegt von

B.Sc. Marlin Gössner
u106698, UNIGIS MSc Jahrgang 2020

Betreuer/in:
Dr. Christian Neuwirth

Zur Erlangung des Grades
„Master of Science – MSc“

Aalen, 13.09.2023

Probabilistische Betrachtung von Flughöhen am Beispiel des Rotmilans

Name: Gössner
Vorname: Marlin
Matrikel-Nr.: 11947385
Teilnehmerkennz.: 668 241
E-Mail-Adresse: marlin.goessner@googlemail.com
Studiengang: UNIGIS MSc. Geographical Information Science & Systems
Betreuung: Dr. Christian Neuwirth

Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt haben. Zuallererst gilt mein Dank meiner Frau, die mich während des gesamten Studiums ermutigt, motiviert und begleitet hat. Sie hat mir oft den Rücken freigehalten und mir viel Verständnis und Geduld entgegengebracht. Sie ist meine große Kraftquelle und meine beste Kritikerin. Ich danke auch meiner Mutter und meinem Bruder für ihre Unterstützung.

Ein besonderer Dank geht an meinen Betreuer Dr. Christian Neuwirth, der mir mit seiner fachlichen Kompetenz, seinem konstruktiven Feedback und seiner freundlichen Art zur Seite stand. Er hat mich stets bei der Erstellung der Arbeit gefordert und gefördert und mir wertvolle Tipps und Hinweise gegeben. Ich bin ihm dankbar für seine Unterstützung.

Ich möchte mich auch beim gesamten UNIGIS Team bedanken, das mir eine hervorragende Ausbildung im Bereich Geoinformatik ermöglicht hat. Die Lehrveranstaltungen waren vielseitig, praxisnah und abwechslungsreich gestaltet. Die Betreuung war immer professionell, hilfsbereit und zuvorkommend. Ich bin froh, mich für ein Studium an der Uni Salzburg entschieden zu haben.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, die mir immer ein offenes Ohr und eine Schulter zum Anlehnen geboten haben. Sie haben mich in guten und weniger guten Zeiten unterstützt und mir durch ihre facettenreichen Charaktere viel Spaß, Freude und auch mal wohlthuende Ablenkung bereitet. Sie sind ein wichtiger Teil meines Lebens und ich bin froh sie zu haben.

Schließlich danke ich meinen Arbeitskollegen und Vorgesetzten bei Uhl Windkraft, die mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen und mir viel Flexibilität und Freiraum für mein Studium eingeräumt haben. Sie sind ein großartiges Team und ich schätze ihre Kollegialität sehr.

Ich widme diese Arbeit allen Personen, die mich auf meinem Weg begleitet haben.

I Zusammenfassung

Belange des Artenschutzes haben sich zu einem wichtigen Kriterium im Genehmigungsverfahren für Windkraftanlagen entwickelt. In Deutschland wird dabei ein besonderer Fokus auf den Schutz des Rotmilans gelegt, der als windkraftempfindlich betrachtet wird. Eine quantifizierbare Einschätzung des Kollisionsrisikos wird allerdings durch die vorgeschriebene Praxis der Datenerhebung für avifaunistische Raumnutzungsanalysen erschwert. Diese stützt sich fast ausschließlich auf direkte Beobachtungen und lässt jegliche Betrachtung von Flughöhen außen vor. Diese Vereinfachung ist allerdings kaum geeignet, den ausgesprochen dreidimensionalen Raumkonflikt zwischen Greifvögeln und Windkraftanlagen sinnvoll abzubilden. Mit der Veröffentlichung von spezifischen Telemetriestudien zum Rotmilan bietet sich die Möglichkeit, zweidimensionale Flugpfade durch probabilistische Methoden mit empirisch beobachteten Flughöhen anzureichern. Dazu wurden in dieser Arbeit Wegpunkten von Flugpfaden mittels Python Scripts rein zufällige Höhenwerte entsprechend der empirischen Gesamtverteilung zugeordnet. In einem zweiten Schritt wurden maximale Abweichungen der Flughöhen zwischen benachbarten Wegpunkten eingeschränkt und so die lokale Autokorrelation im Hinblick auf die Flughöhe nachgeahmt. Dabei zeigte sich, dass ein Kompromiss zwischen genauer Nachahmung der empirischen Flughöhenverteilung und dem Freiheitsgrad der Autokorrelation gefunden werden muss. Je größer der Freiheitsgrad gewählt wurde, desto mehr tendierten die resultierenden Flughöhen in Richtung einer Normalverteilung.

II Abstract

Concerns about species conservation have become an important criterion in the approval process for wind turbines. In Germany, a special focus is placed on the protection of the red kite, which is considered to be sensitive to wind power developments. However, a quantifiable assessment of the collision risk is hampered by the mandated practice of data collection for EIAs. It relies almost exclusively on direct observation and leaves out any consideration of flight heights. This simplification, however, is hardly suitable for a meaningful depiction of the distinctly three-dimensional spatial conflict between birds of prey and wind turbines. With the recent publication of specific telemetry studies on the red kite, there is now an opportunity to enrich two-dimensional flight paths with probabilistic

methods using empirically observed flight heights. For this purpose, random height values corresponding to the empirical overall distribution were assigned to waypoints of flight paths using python scripts. In a second step, maximum deviations of flight heights between adjacent waypoints were restricted and thus the local autocorrelation with respect to flight height was emulated. It was shown that a compromise between an accurate imitation of the empirical flight height distribution and the degree of freedom in the local autocorrelation had to be found. The larger the maximum allowed deviation was chosen, the more the resulting flight heights tended towards a normal distribution.

1. Einleitung	- 6 -
2. Theoretische Grundlagen	- 11 -
2.1 Methodisch- technische Entwicklungen in der Ornithologie.....	- 11 -
2.1.1 Vogelberingung	- 11 -
2.1.2 VHF- Telemetrie	- 13 -
2.1.3 Satellitentelemetrie	- 14 -
2.1.4 Global Positioning System.....	- 16 -
2.1.5 Hell-Dunkel Geolokation	- 17 -
2.1.6 Datenübertragung	- 18 -
2.2 Zum Rotmilan, Milvus Milvus	- 20 -
2.2.1 Äußere Merkmale, Morphologie	- 20 -
2.2.2 Bestand und Verbreitung.....	- 21 -
2.2.3 Brutverhalten, Phänologie	- 22 -
2.2.4 Lebensraum und Nahrungshabitat.....	- 23 -
2.2.5 Artspezifisches Flugverhalten	- 25 -
2.2.6 Todesursachen und Sterblichkeit	- 28 -
2.3 Themenkomplex Windkraft und Avifauna.....	- 32 -
2.3.1 Anlagenmerkmale und Kollisionsrisiko	- 32 -
2.3.2 Planungskriterien für Windkraftanlagen.....	- 35 -
2.3.3 Tendenz zur Anlagenkonzentration als Beitrag zur Kollisionsreduktion	- 46 -
2.3.4 Interaktionsmodi von Greifvögeln mit Windkraftanlagen	- 49 -
3. Verwendete Daten.....	- 53 -
3.1 Datenerhebung Telemetriestudie Rotmilan	- 53 -
3.2 Datenerhebung Raumnutzungsanalysen.....	- 57 -
3.2.1 Untersuchungsgebiet und Aufzeichnungsmethoden	- 57 -
3.2.2 Raumnutzung im Untersuchungsgebiet	- 64 -
4. Methoden Zuordnung Flughöhen	- 74 -
4.1 Datenaufbereitung	- 74 -
4.2 Randomisierte Zuordnung.....	- 85 -
4.3 Randomisierte Zuordnung mit Autokorrelation, Abweichung 5 m	- 86 -
4.4 Randomisierte Zuordnung mit Autokorrelation, Abweichung 15 m.....	- 87 -

5. Ergebnisse	- 87 -
5.1 Randomisierte Zuordnung	- 87 -
5.2 Randomisierte Zuordnung mit Autokorrelation, Abweichung 5 m	- 91 -
5.3 Randomisierte Zuordnung mit Autokorrelation, Abweichung 15 m	- 95 -
6. Diskussion	- 101 -
6.1 Ergebnisse und Verbesserungsansätze	- 101 -
6.2 Perspektivischer Windkraftausbau und Kollisionsrisiko	- 104 -
6.3 HPA statt RNA?	- 107 -
7. Fazit	- 110 -
8. Abbildungsverzeichnis	- 113 -
9. Tabellenverzeichnis	- 121 -
10. Abkürzungsverzeichnis	- 122 -
11. Literaturverzeichnis	- 123 -

1. Einleitung

Zu einem maßgeblichen Faktor bei der Genehmigung von Windkraftanlagen sind in den letzten Jahren naturschutzfachliche Aspekte und hier ganz besonders die Untersuchung von Avifauna an den geplanten Standorten der Anlagen geworden. Bevor die erste Kilowattstunde Strom eingespeist werden kann, müssen vielfältige Untersuchungen angestellt und Gutachten eingeholt werden. Die Rechtsgrundlage dafür besteht im sogenannten Genehmigungsverfahren nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG). Indessen Rahmen Verfahrens werden die Auswirkungen eines geplanten Vorhabens auf die Interessen von Trägern öffentlicher Belange (TÖB), auf Anwohner oder auf den Natur- und Artenschutz geprüft und die jeweiligen Interessen gegebenenfalls gegeneinander abgewogen. Für die Bewertung der Auswirkungen eines Vorhabens im Hinblick auf den Artenschutz ist das sogenannte Tötungsverbot nach § 44 Abs.1 des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG) ganz entscheidend. Demnach gilt: „Es ist verboten, wild lebenden Tieren der besonders geschützten Arten nachzustellen, sie zu fangen, zu verletzen oder zu töten oder ihre Entwicklungsformen aus der Natur zu entnehmen, zu beschädigen oder zu zerstören...“. Bei der Planung von Windkraftanlagen ist besonders dieses Tötungsverbot relevant, da vom Betrieb der Anlagen ein Risiko für eine geschützte Art durch mögliche Kollisionen ausgehen kann (Barclay et al., 2007; Bellebaum et al., 2013; Bose et al., 2020; Hovick et al., 2014; Hull & Muir, 2013; Smeraldo et al., 2020). Weiterhin muss beim Bau einer Anlage darauf geachtet werden, keine Horste zu beschädigen oder zu entfernen, da es sich dabei um die besagten Entwicklungsformen der besonders geschützten Arten handelt. Eine Zerstörung von Brutstätten würde den Bestand gravierender, weil nachhaltiger schädigen, da zukünftige Fortpflanzungsmöglichkeiten behindert würden (Katzenberger et al., 2019). Dieser Aspekt ist in der Praxis unstrittig und nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Der zuvor geschilderte Rechtsrahmen im deutschen Bundesrecht wird durch einige länderspezifische Regelungen erweitert. Für den vorliegenden Untersuchungsgegenstand sind vor allem relevant: die „Hinweise für den Untersuchungsumfang zur Erfassung von Vogelarten bei Bauleitplanung und Genehmigung für Windenergieanlagen“ sowie die „Hinweise zur Bewertung und Vermeidung von Beeinträchtigungen von Vogelarten bei Bauleitplanung und Genehmigung für Windenergieanlagen“ (LUBW Landesanstalt für

Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 2015, 2020). Durch Berücksichtigung aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse konnte in der aktuell gültigen Fassung der „Hinweise zur Erfassung und Bewertung von Vogelvorkommen bei der Genehmigung von Windenergieanlagen“ einige Verbesserungen erreicht werden (LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, 2021). In diesen normativen Texten werden der erforderliche Untersuchungsumfang bei der Durchführung einer avifaunistischen Raumnutzungsanalyse (kurz RNA, in der englischen Literatur als *Environmental Impact Assessment*, EIA bezeichnet) und Leitlinien zur anschließenden Auswertung und Darstellung der Ergebnisse dargestellt. Dabei kommt es zu vielen Vereinfachungen des betrachteten Sachverhalts und es fehlt außerdem ein einheitlicher quantitativer Bewertungsmaßstab für ein signifikant erhöhtes Tötungsrisiko einer besonders geschützten Art nach § 44 BNatSchG. So soll die physische Höhe, in der eine beobachtete Flugbewegung stattfindet, bei der Bewertung im Hinblick auf das Tötungsrisiko ausdrücklich nicht berücksichtigt werden (LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 2015).

Dies wird, durchaus berechtigt, mit methodischen Schwierigkeiten in der Erfassung durch direkte Beobachtungen begründet. Sowohl die Lagegenauigkeit als auch die scheinbare Höhe einer Flugbewegung werden unter Umständen durch die Perspektive des Beobachters verzerrt (Ferrer et al., 2012, S. 44). Allerdings ist die Berücksichtigung der Flughöhen von Vögeln in räumlicher Nähe zu Windkraftanlagen von hoher Relevanz, um das Tötungsrisiko, welches von den Anlagen ausgehen kann, möglichst genau zu bewerten (Barclay et al., 2007). Die genaue Methodik der avifaunistischen Raumnutzungsanalysen wird in Kapitel 3.2 noch dargestellt werden. Für die Einführung ist es nur wichtig zu erwähnen, dass am Ende der Erfassungen zweidimensionale Geodaten von Flugbewegungen vorliegen, die ohne eine genaue Angabe zur Flughöhe nur schwer sinnvoll im Hinblick auf ein Tötungsrisiko an einer geplanten Windkraftanlage zu interpretieren sind (Furness et al., 2013, S. 57). Das wird an folgendem Zusammenhang deutlich. Moderne Windkraftanlagen sind inzwischen so hoch, dass der Gefahrenbereich des Rotors erst bei gut 80 m über Grund beginnt. Als Beispiel sei hier die Windkraftanlage des Marktführers Vestas aus Dänemark genannt. Das Modell V172, die Zahl bezieht sich auf den Rotordurchmesser, wird unter anderem mit Turmhöhen von 175 m oder 199 m Höhe angeboten (<https://www.vestas.com>). Diese Höhe wird auch als Nabhöhe (engl. *hub height*) bezeichnet, da sich hier der Mittelpunkt des Rotors

befindet. Zieht man den Rotorradius von dieser Höhe ab, erhält man die Höhe über Grund, auf die die Blattspitzen des Rotors maximal herunterreichen können. Die Unterkante des Rotors befindet sich in diesem Beispiel also bei 89 m oder im zweiten Fall sogar in 113 m Höhe. Hier ist ein realweltlicher Forschungsbedarf vorhanden, da sich gezeigt hat, dass viele Flugbewegungen von Greifvögeln, speziell Rotmilanen, unterhalb von solchen Höhen stattfinden (Pfeiffer & Meyburg, 2022).

Vor allem in Deutschland wird im Rahmen des Genehmigungsverfahrens für Windkraftanlagen besonderes Augenmerk auf den Schutz des Rotmilans (*Milvus milvus*) gelegt. Ein wichtiger Grund dafür ist die zeitweise negative Bestandsentwicklung der Art in Deutschland während der letzten 40 Jahre. Dieser Trend ist durch ein lang andauerndes Programm zur Beringung von Jungtieren belegt (Katzenberger et al., 2019). Der besondere Fokus auf den Rotmilan wird weiterhin damit begründet, dass ein hoher Anteil der europäischen Population des Rotmilans auf Deutschland entfällt (BirdLife International. *Milvus Milvus*. The IUCN Red List of Threatened Species., 2020). Eine in diesem Kontext positive Nachricht ist die Anpassung der Einstufung des Rotmilans durch die IUCN auf den Status *Least Concern*, also nicht gefährdet. Die beschriebenen Rückgänge in Deutschland wurden durch Zugewinne in anderen europäischen Ländern ausgeglichen oder sogar übertroffen. Zuvor war der Rotmilan auf der sogenannten roten Liste des IUCN als *Near Threatened* geführt worden (BirdLife International. *Milvus Milvus*. The IUCN Red List of Threatened Species., 2020).

Die Gründe für den zum Teil abnehmenden Bestand gehen allein zeitlich gesehen dem Ausbau der Windkraft in Süddeutschland ab den frühen 2000er Jahren voraus (siehe Abbildung 1). Der Verlust von Nahrungshabitaten durch Intensivierung von landwirtschaftlicher Nutzung wurde als einer der Hauptgründe für den beobachteten Populationsrückgang identifiziert (Katzenberger et al., 2019, S. 338). Auch Vergiftungen sind vielfach als häufige Ursache für Individuenverluste mit Auswirkungen auf die Gesamtpopulation der Art belegt (Molenaar et al., 2017; Raab et al., 2017; Tavecchia et al., 2012). Das heißt aber nicht, dass Schlagopfer an Windkraftanlagen die Entwicklung der Art nicht zusätzlich negativ beeinflussen können (Bellebaum et al., 2013).

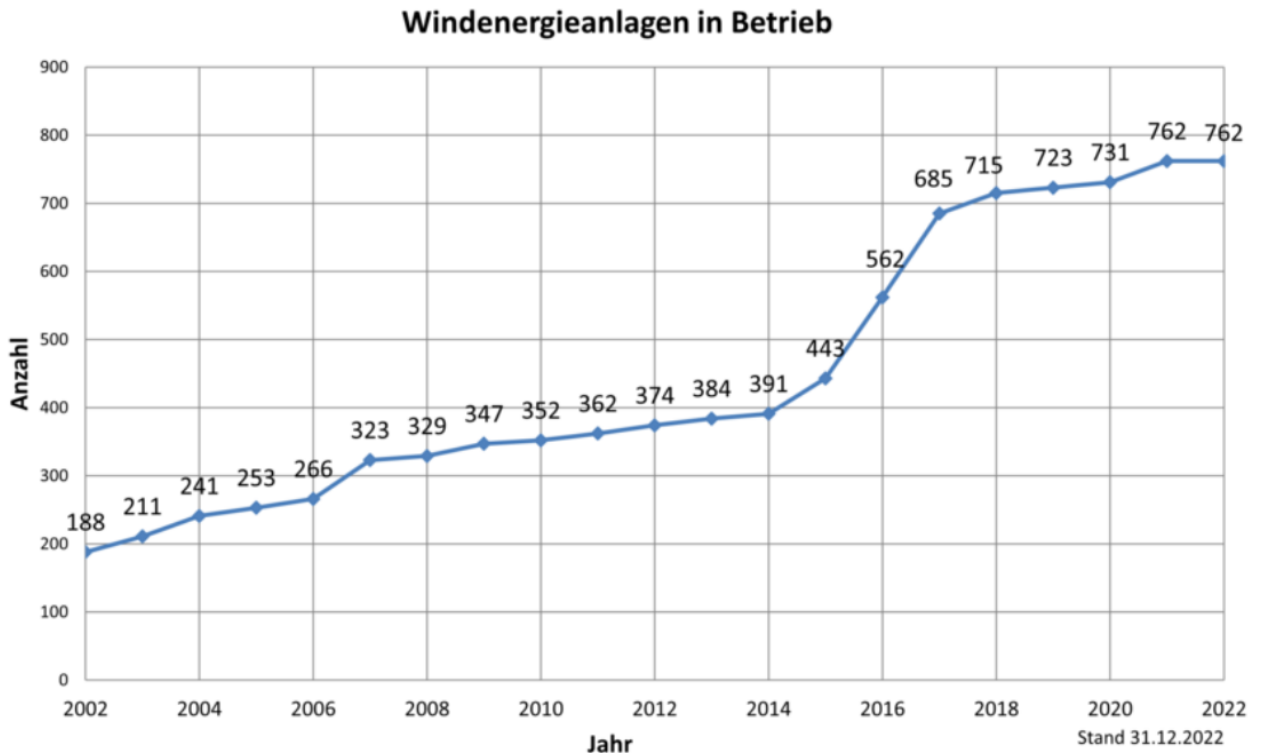


Abbildung 1: Anzahl von Windkraftanlagen im Betrieb pro Jahr für das Land Baden-Württemberg. (Quelle: <http://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/erneuerbare-energien/windenergie/entwicklung-des-windenergieausbaus>, abgerufen am 01.07.2023).

Mit der Veröffentlichung von Telemetriestudien mit genauer Erfassung der Flughöhen von Rotmilanen in ihren Brutgebieten bietet sich seit kurzem die Möglichkeit, deren Erkenntnisse mit vorliegenden Daten aus den herkömmlichen Raumnutzungsanalysen zu verbinden, um in der Konsequenz eine bessere Bewertung des Tötungsrisikos durch Windkraftanlagen zu ermöglichen. Pfeiffer und Meyburg haben in ihrer Arbeit aus dem Jahr 2022 eine detaillierte Betrachtung der Flughöhen von Rotmilanen in ihren Brutrevieren um Weimar in Thüringen angestellt. Auf diese Ergebnisse stützt sich die Zuordnung von Flughöhen zu beobachteten Flugpfaden von Rotmilanen in der vorliegenden Arbeit. Diese Daten wurden in verschiedenen Raumnutzungsanalysen und Monitorings im Rahmen von Windkraftprojekten gewonnen. Sie sind meist in Teilen als auszulegende Unterlagen im Genehmigungsverfahren zugänglich.

Ich habe mich dafür entschieden, Daten aus einem Gebiet zu verwenden, in dem über mehrere Jahre Flugbewegungen erfasst wurden. Besonders interessant ist dabei, dass sowohl vor als auch nach Errichtung der Anlagen Daten erhoben wurden. Diese Datenlage

würde möglicherweise auch viele andere interessante Fragestellungen ermöglichen. Denkbar wäre etwa ein Vergleich des prognostizierten Mortalitätsrisiko mit dem nach Errichtung der Anlagen tatsächlich gegebenen Risiko, bzw. erwarteten und beobachteten Individuenverlusten. Bisherige Arbeiten dazu haben eine schwache Beziehung zwischen Prognosen (EIAs) und Schlagopferzahl festgestellt (Ferrer et al., 2012). In dieser Arbeit sollen dagegen die zweidimensionalen Pfade von visuell erfassten Flugbewegungen durch probabilistische Methoden mit empirisch in einer Telemetriestudie gemessenen Flughöhen versehen werden, um so eine verbesserte Abbildung der dreidimensionalen Raumnutzung durch den Rotmilan zu gewinnen.

Nach dieser Einführung in den Kontext der vorliegenden Arbeit und ihrer Zielsetzung soll in Kapitel 2 die technische Entwicklung im Bereich der Telemetrie zur Erforschung von Wanderungs- und Flugbewegungen als wichtige Methode der ornithologischen Forschung umrissen werden. Daran anschließend wird im Kapitel 2.2 der Rotmilan mit seinen spezifischen Eigenschaften und Verhaltensweisen vorgestellt. Das ist relevant, da Art spezifische Verhaltensweisen das Kollisionsrisiko an Windkraftanlagen beeinflussen können (Smallwood, Rugge & Morrison, 2009). Der danach folgende Abschnitt 2.3 der Arbeit widmet sich dem Forschungsstand zum Themenkomplex Windenergie und Avifauna allgemein und aufbauend auf den vorangegangenen Teil dem Rotmilan im Speziellen. Außerdem sollen Faktoren und Interdependenzen, die das Kollisionsrisiko einer Art oder eines Individuums beeinflussen können, herausgearbeitet werden. Dieser Punkt soll den Abschluss der theoretischen Grundlagen bilden.

Im darauffolgenden Kapitel 3 werden dann die verwendeten Daten beschrieben. Dabei handelt es sich um Flughöhenverteilungen und zweidimensionale Flugbewegungen. Danach wird mit probabilistischen Methoden (Kapitel 4) die automatische Zuordnung von Flughöhen zu den Flugpfaden bewerkstelligt. Dabei sollen drei aufeinander aufbauende Ansätze Verwendung finden. Zuerst wird eine rein zufällige Zuordnung von Flughöhen aus einer dazu erstellten Werteliste vorgenommen werden. Danach folgt eine zufällige Zuordnung aus der Liste mit Einschränkung in der maximalen Höhenabweichung zum jeweils vorangegangenen Punkt von fünf Metern und abschließend ein Durchgang mit einer maximalen Abweichung von 15 Metern. Die Gegenüberstellung der unterschiedlichen

Ergebnisse (Kapitel 5) der drei verwendeten probabilistischen Methoden bilden den danach folgenden Teil der Ausarbeitung, die schließlich mit einer Diskussion (Kapitel 6) und einem Fazit (Kapitel 7) endet.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Methodisch- technische Entwicklungen in der Ornithologie

2.1.1 Vogelberingung

Menschen haben schon seit langer Zeit Beobachtungen zum Zugverhalten von Vögeln gemacht und ihre Gedanken dazu aufgezeichnet. So heißt es im Buch Jeremia 8,7 nach Luther: „Der Storch unter dem Himmel weiß seine Zeit, Turteltaube, Schwalbe und Drossel halten die Zeit ein, in der sie wiederkommen sollen ...“. Damals wurde das als verlässlich wahrgenommene Verhalten der Tiere bewundert und als Ausdruck einer gottgegebenen Weltordnung verstanden. Erst später begannen Menschen damit, ihre Umwelt naturwissenschaftlich zu hinterfragen. Was das Phänomen des Vogelzugs aber keineswegs an Faszination einbüßen lässt.

Die ersten gesicherten Erkenntnisse zum saisonalen Vogelzug europäischer Arten wurden 1899 mittels systematischer Beringung erreicht. Bis dahin gab es verschiedene Vorstellungen zum Verbleib von Zugvögeln im Winter. Unter anderem gab es die Theorie, dass sie am Grund von Gewässern überwintern würden (Bairlein et al., 2012, S. 27). Doch dann versah der dänische Lehrer Hans Christian Cornelius Mortensen (1856–1921) Vögel mit individuell nummerierten Metallfußringen und führte damit die Methode der Vogelberingung ein (Bairlein et al., 2012, S. 27). So wurde erkannt, dass einige Vögel über den Winter wärmere Breitengrade in Südeuropa, Nordafrika oder dem Nahen Osten aufsuchen, um zu überleben. Das bedeutete einen großen Erkenntnisgewinn in der ornithologischen Forschung.

Ein großer Nachteil dieser Vorgehensweise liegt in der langen Kommunikationskette, die unter Umständen zustande kommen muss, damit ein Forscher Kenntnis vom Auffindeort eines beringten Individuums erhält und daraus seine Schlüsse zum Zugverhalten ziehen kann. Daher müssen sehr viele Tiere mit Ringen ausgestattet werden, um überhaupt einen

gewissen Rücklauf zu gewährleisten (Bairlein et al., 2012, S. 28). Dementsprechend eignen sich seltene Arten nicht für diese Untersuchungsmethode, da nur schwer eine ausreichende Stichprobe erreicht werden kann. Schlussendlich ist die Auflösung der generierten Datenpunkte auch zu gering, um daraus das Verhalten eines Individuums umfassend abbilden zu können. Schließlich wird nur beim Beringen selbst und bei jedem darauffolgenden mehr oder weniger zufälligen Antreffen des Tiers eine Position fixiert. Das Verfahren beruht außerdem zum Teil auf der Mitwirkung engagierter Bürger. Daher lässt sie sich auch in großem Maßstab relativ günstig umsetzen, da die Kosten für Technik und Personal geringgehalten werden können. Man kann sagen, hier wurde *citizen science* betrieben, bevor der Begriff geprägt wurde. Die Beringung wird in langfristig laufenden Studien teilweise immer noch verwendet, ist aber aufgrund der genannten Nachteile und neuen technischen Möglichkeiten eher ein Auslaufmodell (Katzenberger et al., 2019). Eine Erfassung von Flughöhen oder der konkreten Raumnutzung ist so nicht zu leisten.

An dieser ersten methodischen Entwicklungsstufe wird bereits deutlich, dass es in der Telemetrie Allgemein und als Methode der ornithologischen Forschung im Speziellen, immer zwei Fragen zu beantworten gilt: Erstens, wie erfolgt die Positionsbestimmung und zweitens, wie werden die Daten übermittelt? Als Definition der Telemetrie (dt. auch Fernmessung) versteht man dabei die Übertragung von Messwerten eines am Messort befindlichen Sensors zu einer räumlich getrennten Empfangsstelle (Meyburg, 2013, S. 27–28).



Abbildung 2: Beringung eines kleinen Singvogels. Auf dem Ring befindet sich eine Identifikationsnummer sowie eine Kurzadresse. Zu dieser können zukünftige Finderinnen den Ring senden (Quelle: NABU/Guido Rottmann).

2.1.2 VHF- Telemetrie

Die Forschung zu Flugbewegungen von Vögeln hat sich in der Vergangenheit vor allem mit saisonalen Wanderungsbewegungen beschäftigt. Der Betrachtungshorizont war dabei meist mesoskalig, umfasste also Strecken von einigen hundert bis wenigen tausend Kilometern (Meyburg, 2013; Seidel et al., 2018). Das hatte vor allem mit dem Stand der technischen Entwicklung zu tun, die eine genaue Aufzeichnung kleinräumiger Bewegungen auf der geographischen Mikroskala von wenigen hundert Metern bis hinunter zur (Sub-)Metergenauigkeit, wie sie heute mit modernen Methoden erreichbar ist, nicht leisten konnte (Meyburg & Meyburg C., 2009).

Fortschritte im Bereich der Kommunikationstechnik haben in den letzten Jahrzehnten zu immer leistungsfähigeren und gleichzeitig kompakteren Sender-/Empfängermodulen geführt (Seidel et al., 2018). In Kombination mit ebenfalls immer weiter entwickelten Solarzellen und aufladbaren Batterien bieten sich interessante Möglichkeiten in der

Erforschung von Bewegungsmustern der Individuen immer kleinerer Tierarten (Meyburg & Meyburg C., 2009). Mit der stets voranschreitenden Miniaturisierung elektronischer Komponenten sowie völlig neuen Erfassungsmethoden wurde es mit der Zeit möglich, räumlich und zeitlich immer genauer aufgelöste Positionsdaten und zusätzliche Umweltinformationen von verschiedensten Tierarten mittels Telemetrie zu erheben. Im Kontext der Greifvogelforschung sollte dabei das Gewicht des jeweiligen Gesamtpakets aus Sensoriken (bspw. IMU, Photodetektor, physiologischen Messgeräten, Thermometer, Höhenmesser), Empfänger (meist GPS), Prozessor, Speicher und Sender sowie Stromversorgung nicht mehr als drei Prozent des Körpergewichts des besenderten Individuums aufweisen (Meyburg & Meyburg C., 2009, S. 258). Andere Quellen sprechen dagegen von bis zu fünf Prozent des Körpergewichts als Richtwert für eine zumutbare Belastung. Je nach untersuchter Art muss immer auf eine korrekte und minimalinvasive Befestigung der Komponenten geachtet werden (Bairlein et al., 2012, S. 30).

Als erste in nennenswertem Umfang gebräuchliche Methode der Telemetrie zur Ortung von Tieren gilt die VHF-Telemetrie (Meyburg, 2013, S. 30). Sie wird zu diesem Zweck seit den 60er Jahren verwendet und beruht auf der Triangulation eines Radiosignals mit zwei oder mehr bodengebunden Empfängern (Meyburg, 2013, S. 28). Mittels einer solchen Funkpeilung lassen sich grobe Aussagen zu Reviergrößen, wahrscheinlichen Horstpositionen oder häufig frequentierten Nahrungshabitaten treffen. Diese einfache Technik kann in sehr kompakte Pakete eingebaut werden und eignet sich auch für kleinste Tierarten. Oft wird diese Methode eingesetzt, um direkte Beobachtungen einzelner Tiere zu unterstützen (Meyburg, 2013, S. 30). Die Positionsbestimmung über weite Distanzen ist aufgrund des Winkelfehlers von ca. 5° jedoch unpraktikabel (Meyburg, 2013, S. 30). Die Funkpeilung eignet sich also kaum, um weiträumige Zugsbewegungen etwa über Kontinente hinweg zu beobachten. Auch die kleinräumige Raumnutzung eines Vogels innerhalb seines Reviers oder gar Flughöhen lassen sich so nicht aufzuzeichnen.

2.1.3 Satellitentelemetrie

Eine dafür besser geeignete Technologie wurde etwa 20 Jahre später für wissenschaftliche Anwendungen verfügbar. Mit der Einführung von *Plattform Transmitter Terminals* (PTT) in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts besteht die Möglichkeit Biotelemetrie durch

Dopplerortungen mit einfachen batteriebetriebenen Sendern durchzuführen (Meyburg, 2013, S. 32). Dabei werden terrestrische Satelliten des Argos Systems verwendet, um die Signale von besenderten Tieren aufzunehmen und über eine von zwei existierenden Zentralen an den Empfänger weiterzuleiten (Sokolov, 2011, S. 888). Der Dopplereffekt beschreibt die scheinbare Frequenzänderung elektromagnetischer Wellen deren Emitter sich räumlich von einer Empfangsstelle entfernt oder sich ihr annähert. Diese Wechselwirkung lässt sich auch im umgekehrten Fall beobachten. Ein relativ stationärer Sender auf der Erdoberfläche erfährt gegenüber einem Satelliten im Erdorbit eine scheinbare Frequenzänderung durch die Bewegung des Satelliten selbst (Meyburg, 2013, S. 32). Eine erhöhte Frequenz an der Empfangsstelle zeigt eine abnehmende Entfernung zwischen Sender und Empfänger an. Eine verminderte Frequenz ist dagegen ein Indikator für eine zunehmende Entfernung zwischen Sender und Empfänger. Der Zeitpunkt, zu dem die Frequenzänderung von einer Erhöhung zu einer Verminderung (oder umgekehrt) umschlägt, markiert also den kürzesten Weg zwischen Sender und Empfänger und kann für eine Positionsbestimmung der Sendestelle auf der Erdoberfläche verwendet werden (Sokolov, 2011). Da die bekannte Ausgangsfrequenz des Senders Grundlage einer Positionsbestimmung ist, sollte der Sender möglichst frequenzstabil sein. Aufgrund der Bahnparameter der Satellitenkonstellation können Lücken von bis zur vier Stunden zwischen zwei Positionsbestimmungen auftreten. Die Laufzeit der Sender war anfangs aus technischen Gründen auf etwa ein Jahr beschränkt und ermöglichte Genauigkeiten in günstigen Fällen bis auf einige hundert Meter, im Schnitt aber nur bis auf etliche Kilometer (Meyburg & Meyburg C., 2009, S. 257). Dennoch wurden damit weitaus detailliertere Aufzeichnungen von Wanderungsbewegungen und großräumigeren Aktivitäten im Brutgebiet möglich, als dies bei der bis dahin hauptsächlich gebräuchlichen Beringung oder der VHF-Telemetrie üblich war (Meyburg & Meyburg C., 2009, S. 257). Später wurden die Fähigkeiten der Systeme noch durch die Einführung von kleinen Solarzellen und Akkumulatoren erweitert, die die Lebensdauer und damit die Autonomie des Gesamtpakets erhöhten (Raab et al., 2017, S. 259). Die Nachteile dieser Methodik liegen in den hohen Kosten der Datenübermittlung mittels Satellitenverbindung und der notwendigen Aufbereitung der Daten im europäischen Prozessierungszentrum in Toulouse, Frankreich (argos-system.org). Die Auswertung der Daten ist aufwendig und oft kann nur ein kleiner Teil der Ortungen in die Betrachtung einbezogen werden (Meyburg & Meyburg C., 2009,

S. 257). Nach wie vor sind Sender dieser Art in einer nicht für alle Vogelarten zumutbaren Gewichtsklasse (Bairlein et al., 2012, S. 29).

2.1.4 Global Positioning System

In den frühen 2000er Jahren wurde die Telemetrie durch die Einführung von kompakten GPS-Empfängern auf ein qualitativ völlig neues Niveau gehoben (Seidel et al., 2018). Diese Empfänger ermöglichen eine Positionsbestimmung bis auf wenige Meter genau. Dank der großzügigen Nutzungspolitik der US-amerikanischen Regierung erfolgt dies auch noch weitgehend betriebskostenfrei (<https://www.gps.gov/>). Bei der GPS-Ortung werden von Satelliten in der Erdumlaufbahn abgegebene Signale von einem Empfänger aufgenommen. Das Signal enthält einen hochgenauen Zeitstempel des Sendezeitpunkts. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals bekannt ist, kann aus der verstrichenen Zeit zwischen Abgabe und Aufnahme des Signals die Entfernung zwischen Sender und Empfänger errechnet werden. Je mehr Signale gleichzeitig verarbeitet werden können, desto präziser ist die errechnete Position des Empfängers (Wendel, 2011). Die Genauigkeit kann durch die Korrektur der Daten im Hinblick auf aktuelle atmosphärische Bedingungen noch weiter gesteigert werden (Wendel, 2011). Die Dichte von Positionsbestimmungen ist außerdem nicht mehr in dem Maß von den Bahnparametern der verwendeten Satelliten abhängig, sondern hauptsächlich vom Energieverbrauch an der Empfangsstelle. Die Energie zum Senden der Signale wird beim GPS jedoch bereits durch die Satelliten bereitgestellt, während bei der Dopplerortung der Sender am Tier ein Signal bis in die jeweilige Umlaufbahn strahlen muss. Die im Vergleich zur reinen Dopplerortung wesentlich unkompliziertere Signalverarbeitung verkürzt außerdem den Weg zu wissenschaftlich auswertbaren Positionsdaten. Durch die höhere Dichte der möglichen Positionsbestimmungen produzieren solche Logger jedoch auch eine weitaus größere Datenmenge. Mit der Positionsbestimmung über GPS ist es erstmals möglich, genaue Werte über Flughöhen einzelner Vögel durchgängig und zuverlässig zu erfassen (Pfeiffer & Meyburg, 2022). In jüngster Zeit wurde der zur Verfügung stehende Werkzeugkasten im Bereich der Telemetrie noch durch weitere Methoden wie zum Beispiel Beschleunigungssensoren, Thermometer oder physiologische Messgeräte (den meisten auch als Fitness-Tracker oder Smartwatch bekannt) ergänzt, um immer detaillierte Aufzeichnungen zum Verhalten einzelner Individuen zu erhalten (Bairlein et al., 2012, S. 29).

2.1.5 Hell-Dunkel Geolokation

Eine weitere Möglichkeit zur Gewinnung von Positionsdaten einzelner Individuen ist die Helldunkel-Geolokation mittels kleiner Datenlogger, die auch als Geolocator bezeichnet werden. Diese Methodik wurde im Jahr 2009 erstmals für eine Studie zum Zugverhalten von Singvögeln eingesetzt (Stutchbury et al., 2009). Solche Untersuchungen an sehr kleinen Vögeln waren bisher auf die unzuverlässigere Beringung angewiesen. Bei der Helldunkel-Geolokation erfolgt die Positionsbestimmung anhand des Sonnenauf- und Sonnenuntergangszeitpunktes, der über eine Fozelle in Verbindung mit einem Zeitmesser festgestellt wird (Sokolov, 2011). Um die Zeitpunkte von Sonnenaufgang, Sonnenuntergang, Mittag und Mitternacht zu bestimmen, misst der Datenlogger alle zwei Minuten die Helligkeit in der Umgebung des Vogels. So lässt sich die geographische Breite und Länge der Position des Datenloggers nach Jahreszeit über astronomische Tabellen bestimmen (Meyburg & Meyburg C., 2009, S. 258). Die dafür erforderliche Technik ist noch leichter und kompakter als bei der Satellitentelemetrie. Daher ist diese Methode besonders für sehr kleine Vogelarten, wie etwa Singvögel, geeignet. Ein großer Nachteil ist allerdings unter Umständen das Fehlen einer Sendeeinrichtung, was den Fund des Datenloggers nötig macht, um an die auszuwertenden Daten zu gelangen (Bairlein et al., 2012, S. 29). Man kann sich diese Methode gut als eine Art Premium-Beringung vorstellen. Die Messwerte der Fozelle können jedoch durch Verhaltensweisen des besenderten Individuums verfälscht werden. So kann beispielsweise das frühe Aufsuchen eines geschützten Schlafplatzes den angenommenen Zeitpunkt des Sonnenuntergangs im Zeitablauf nach vorne verschieben und damit die Positionsbestimmung beeinflussen. Daher muss die Methodik auf solche Verhaltensweisen der jeweils untersuchten Art kalibriert werden. Die Genauigkeit liegt dabei eher im Bereich von einigen Dutzend Kilometern (Fudickar et al., 2012, S. 47). Eine Bestimmung der Flughöhe ist mit solchen Geodatenloggern nicht möglich. Damit eignet sich diese Methode eher für die Untersuchung von Wanderrouen leichter Singvögel als für das kleinräumige Verhalten großer Greifvögel im Brutgebiet (Fudickar et al., 2012).

Abschließend lässt sich sagen, dass die GPS-Telemetrie für die Greifvogelforschung und die Verhaltensbiologie allgemein zu einer wichtigen und äußerst mächtigen Methode geworden ist. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, detaillierte Daten zum Verhalten und der

Raumnutzung einzelner Tiere zu gewinnen. Gerade Greifvögel sind groß genug, um das Gewicht der GPS-Logger ohne große Einschränkungen zu tragen. Für diese Arbeit besonders von Bedeutung ist die Möglichkeit bis auf einige Meter genaue Aufzeichnungen von Positionen und Flughöhen bei minütlichem oder sogar sekundlichem Erfassungsintervall zu gewinnen.

2.1.6 Datenübertragung

Neben der Erhebung von Daten und Werten erinnern wir uns an die andere große Fragestellung der Telemetrie, nämlich der Datenübermittlung vom Messort zur räumlich separierten Verarbeitung und Auswertung. In diesem Abschnitt sollen einige Möglichkeiten dafür vorgestellt werden. Eine Option, die Datenübermittlung einfacher als bei der Satellitentelemetrie zu realisieren, ergab sich mit der Verbreitung des *Global System for Mobile Communications* (GSM) in den 1990er Jahren. Durch die Einführung dieser Technik des 2G Standards wurde es möglich, neben herkömmlicher Sprachübermittlung wie im bereits existierenden Festnetz, auch Datenpakete zwischen mobilen Endgeräten auszutauschen. Nachteile dieser Technik sind Kosten zur Nutzung des Dienstes und der relativ hohe Energieverbrauch während der Datenübermittlung (Raab et al., 2017, S. 251). Bei der Verfolgung von weiträumigen Wanderungsbewegungen ergibt sich zusätzlich das Problem von Lücken im Empfangsnetz. Vor allem in siedlungsfernen Bereichen kann es beim Volllaufen des internen Speichers daher zu Datenverlusten in Bereichen ohne Netzabdeckung kommen. Gerade in Deutschland stellt das eine nicht ganz triviale Komplikation dar (Meyburg, 2013, S. 33). Um dieses Problem zu umgehen, haben Forscherinnen die Möglichkeit, die Daten ihrer Untersuchungsobjekte im Gelände über UHF-Funk auszulesen. Dabei wird ein tragbarer Handfunkempfänger verwendet. Die Reichweite ist durch die geringe Sendeleistung jedoch recht kurz. Je nach eingesetzter Technik bietet ein Datenlogger auch beide Möglichkeiten zum Datentransfer unabhängig voneinander (Raab et al., 2017, S. 249).

Probleme Punkte aller Möglichkeiten zur Datenerhebung bleiben die endgültige Übermittlung der Daten an den Forscher und eine ausreichende Energieversorgung aller Komponenten. Dabei sei an die beiden Grundfragen der Telemetrie erinnert. Wie erfolgt die Positionsbestimmung und wie gelangen die Daten zur Auswerterin? Hier muss vor allem bei

langfristig angelegten Feldstudien nach wie vor Geld und/oder Zeit investiert werden, um einen Datenverlust zu vermeiden (Pfeiffer & Meyburg, 2015). Gerade die GPS-Ortung kann bei entsprechenden Aufzeichnungsintervallen schnell beachtliche Datenmengen produzieren, die den Umfang eines auf Gewichtersparnis optimierten Systems rasch sprengen können. Es dauert bei einem GPS-Messintervall von fünf Minuten nur etwa zwei Monate, um den Speicher eines kleinen Datenloggers zu füllen (Raab et al., 2017, S. 251). Das bedeutet, um beispielsweise die Bewegungen eines Rotmilans auf der Wanderung nach Südeuropa und zurück oder während der gesamten Brutperiode in Deutschland zu erheben, müssen die Daten mehrmals ausgelesen werden. In Ihrer Studie nutzten Raab et al. (2017) daher die Möglichkeit des UHF-Funks, um die Daten einzelner Tiere vor Ort abzurufen. Die Auslesung nimmt etwa zwei Stunden in Anspruch, in denen sich der Vogel nicht von der Empfangsstation wegbewegen darf. Dazu bietet sich die nächtliche Ruhephase an. Sie empfehlen weiterhin die Annäherung möglichst verdeckt bis auf mindestens 150 m durchzuführen. Je nach Vegetationsdichte und Position des Schlafplatzes kann auch eine kürzere Entfernung nötig sein, um eine ausreichend stabile Funkverbindung herzustellen. Um dazu den genauen Standort des Vogels im Vorfeld der Annäherung festzustellen, bietet es sich nach Ansicht des Autors an, die letzten Ortungen des Loggers mittels GSM oder über Satelliten aus der Ferne abzurufen und den Rest des Datenspeichers dann energiesparend aus der Nähe über UHF-Funk auszulesen. Dazu findet sich aber kein konkreter Hinweis in der Studie (Raab et al., 2017, S. 252). Die Wahl der Übertragungsmethode bleibt ein Kompromiss aus Energieverbrauch, Kosten sowie Zeit- und Reiseaufwand. Wird eine energieintensive Übertragungsmethode wie GSM gewählt, kann die zukünftige Datenerfassung darunter leiden, da bei geringem Ladestand die zeitliche Dichte der erfassten Datenpunkte herabgesetzt wird, um den Ausfall der Geräte möglichst weit hinauszuzögern (Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 868). Es bleibt festzuhalten, dass die Positionierung über GPS zu einer der wichtigsten Methoden der ornithologischen Forschung geworden ist und erstmals eine genaue Erfassung von Flughöhen ermöglicht, die bis dahin kaum in dem Umfang und Detailgrad zu leisten war (Silva et al., 2014, S. 259). Die Datenübermittlung vom besenderten Tier zur Auswertestelle bleibt eine Schwierigkeit und muss je nach Budget, räumlicher und zeitlicher Ausdehnung der Untersuchung, sowie Zielart angepasst werden.

2.2 Zum Rotmilan, *Milvus Milvus*

2.2.1 Äußere Merkmale, Morphologie

Der Rotmilan (engl. *Red Kite*) ist ein Greifvogel aus der Familie der Habichtartigen. Ausgewachsene Tiere erreichen eine Körperlänge von 60 cm bis 66 cm und eine Flügelspannweite von 175 cm bis 195 cm. Rotmilane weisen einen reversen Geschlechtsdimorphismus auf. Das bedeutet, dass die weiblichen Exemplare im Durchschnitt etwas größer und schwerer sind als die männlichen Exemplare (Aebischer, 2009). Der Name des Rotmilans rührt von seinem auffällig gefärbten Gefieder her. Manchmal wird er auch als Königsweihe bezeichnet. Im Flug bilden die weiß-grau gefärbten Unterseiten der Tragschwingen einen markanten Kontrast zu den schwarzen Spitzen der Handschwingen. Außerdem sind die ausgebreiteten V-förmig ausgebildeten Schwanzfedern zu erkennen, mit denen der Rotmilan seine Fluglage präzise steuern kann (siehe Abbildung 3). Der Körper und die Oberseite der Schwingen erscheinen rötlich-braun, wodurch der Vogel auch im Ansitz gut zu identifizieren ist. Der Kopf des Rotmilans ist weiß mit einem hellgelben Schnabel mit dunkelgrauer bis schwarzer Spitze (siehe Abbildung 4). Der Ruf des Rotmilans ist ein langgezogener hoher Schrei, auf den gelegentlich einige kürzere Schreie folgen. Eine charakteristische Aufnahme ist unter folgendem Link oder in der Druckversion auch über den QR-Code unten zu finden (<https://youtu.be/WtYXk22Y9Uo>).



Abbildung 3: Ein ausgewachsener Rotmilan im Flug. Die charakteristische Musterung der Flügelunterseiten ist gut zu erkennen. Dabei sind die Federspitzen der Handschwingen schwarz und die Fläche der Tragschwingen weiß-grünlich gefärbt. Der Kopf erscheint weiß. Auch die markanten V-förmigen Schwanzfedern fallen auf (Bild von Wolfgang Eckert auf Pixabay, abgerufen am 20.05.2023).



Abbildung 4: Ein Rotmilan in sitzender Position. Die mehrfarbigen Federn bilden ein prachtvolles Muster. Der weißliche Kopf mit gelbem Schnabel und schwarzer Spitze ist in der Nahaufnahme gut zu erkennen (Bild von Bundschatten auf Pixabay, abgerufen am 20.05.2023).

2.2.2 Bestand und Verbreitung

Laut dem letzten Zustandsbericht der *International Union for Conservation of Nature and Natural Resources* (IUCN) beträgt der weltweite Bestand des Rotmilans zwischen 32.200 und 37.700 Paaren oder 64.400 bis 75.400 Einzeltieren. Da sich der Bestand der Art im letzten Jahrzehnt deutlich stabilisiert hat, wurde die Gefährdungseinstufung des Rotmilans von *Near Threatened* auf die unkritische Stufe *Least Concern* herabgesetzt. Verlusten in Deutschland stehen dabei positive Bestandsentwicklungen in anderen europäischen Staaten gegenüber, die zu einem Nettozugewinn der Art führen (BirdLife International. *Milvus Milvus*. The IUCN Red List of Threatened Species., 2020). Etwa 90% der existierenden Paare brüten in Kontinentaleuropa sowie den Britischen Inseln und gelten damit als endemische Art in diesem Raum. In der Vergangenheit wurden zumindest einzelne Brutpaare in Nordafrika bestätigt (BirdLife International. *Milvus Milvus*. The IUCN Red List of Threatened Species., 2020). Das Hauptverbreitungsgebiet der Art erstreckt sich in einer

überwiegend zusammenhängenden Fläche über Portugal, Spanien, Frankreich, Deutschland, Dänemark, Südschweden, Italien, Polen und bis in das Baltikum. Wesentlich kleinere Populationen finden sich auf den Britischen Inseln (Aebischer, 2009). Die Art war dort bis zu ihrer kurz bevorstehenden Ausrottung Anfang des 20. Jahrhunderts massiv bejagt worden, aber der Bestand steht dank einem Ansiedlungsprogramm in den 80er Jahren wieder auf einer soliden Basis und wächst stetig (Molenaar et al., 2017). Allein in Deutschland brüten heute zwischen 14.000 und 16.000 Paare, was etwa 40% des Gesamtbestands entspricht (BirdLife International. *Milvus Milvus*. The IUCN Red List of Threatened Species., 2020). Sowohl die Forschung an Rotmilanen als auch die Bemühungen um ihren Schutz haben daher eine lange Tradition in Deutschland. Es ist auch darauf zurückzuführen, dass dem Rotmilan im Vorfeld der Genehmigung von Windkraftanlagen in Deutschland besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird.

Da der Schutz von Individuen einer besonders geschützten Art in BNatSchG § 44 Abs.1 ausdrücklich als Voraussetzung für die Zulässigkeit eines Vorhabens genannt wird, müssen die Gutachten für das Genehmigungsverfahren im Vorfeld entsprechend detailliert angesetzt werden. Das heißt auch, dass die mögliche Gefährdung eines Individuums nicht mit dem Verweis auf die Gesamtheit des übrigen Bestands ausgeglichen werden kann. Durch Vermeidungsmaßnahmen kann ein Tötungsrisiko abgewendet werden. Diese Maßnahmen können beispielsweise in der Herstellung von besonders attraktiven Ablenkflächen in weiterer Entfernung der geplanten Anlagen bestehen. Dadurch sollen die betreffenden Individuen einer Art von ihrem Horst weg in Richtung dieser Flächen gelenkt werden, anstatt sich im Umfeld der Windkraftanlagen aufzuhalten (LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 2021).

2.2.3 Brutverhalten, Phänologie

Rotmilane können in freier Wildbahn bis zu 30 Jahre alt werden und haben eine eher geringe Reproduktionsrate (Aebischer, 2009). Der Verlust einzelner Individuen kann daher potentiell schneller negative Auswirkungen auf die Entwicklung der Gesamtpopulation haben, als bei Arten mit höheren Reproduktionsraten (Bird et al., 2020; Watson et al., 2018, S. 14). Sobald die Tiere ihr drittes Lebensjahr vollendet haben, beziehen sie einen Horst und beginnen die ersten Brutversuche. Dabei unternehmen sie Flüge im Nahbereich des Horstes, um ihr

Revier gegen Nachbarn abzugrenzen und sich als potentiellen Partner sichtbar zu machen (Aebischer, 2009). Bei ausreichendem bis durchschnittlichem Nahrungsangebot ist einem brütenden Paar die Aufzucht von ein oder zwei Küken pro Jahr möglich. Ein überdurchschnittliches oder reiches Nahrungsangebot versetzt die Tiere in die Lage, drei oder in Ausnahmefällen maximal vier Küken in einer Brut aufzuziehen (Pfeiffer & Meyburg, 2015, S. 973).

Rotmilane sind ausgesprochen standorttreu. Sie kehren jedes Jahr an denselben Horst oder an eine kleine Auswahl von teilweise alternierend genutzten Wechselhorsten in unmittelbarer Nähe zueinander zurück, um dort ihre Brut durchzuführen (Schaub, 2012, S. 113). Die Ortsbindung nimmt nach dem Ende der Brutzeit ab und die Vögel sammeln sich an gemeinschaftlichen Schlafplätzen, bevor der Zug in die Überwinterungsgebiete in Frankreich und auf der Iberischen Halbinsel beginnt. Dieses Verhalten wird auch im Winterhabitat selbst beobachtet, wobei einzelne Vögel ihren aufgesuchten Schlafplatz wechseln (Nachtigall et al., 2003, S. 292, f). Durch die Klimaerwärmung gibt es inzwischen aber auch Rotmilanexemplare, die über den Winter in den Brutgebieten Mitteleuropas verbleiben. Da der Zug nach Südeuropa mit vielen Risiken und Entbehrungen für die Vögel behaftet ist, scheint das immer mehr eine valide alternative Überlebensstrategie zu sein (Aebischer, 2009), zumal nicht-ziehende Exemplare früher mit der Brut beginnen können als ihre fernreisenden Artgenossen, was sich positiv auf den Bruterfolg auswirkt (Pfeiffer & Meyburg, 2015, S. 969).

2.2.4 Lebensraum und Nahrungshabitat

Bevorzugte Lagen für Fortpflanzungsstätten des Rotmilans sind Waldränder, aufgelockerte Altholzbestände, Feldgehölze, Baumreihen und Einzelbäume in möglichst strukturreicher offener Landschaft (Grüneberg & Karthäuser, 2019, S. 101). Eine strukturreiche Landschaft zeichnet sich durch eine heterogene Konstellation von unterschiedlichen Bewirtschaftungsformen und Landschaftselementen aus. Eine Auswahl an Äckern und Grünländern mit eingestreuten Hecken und Einzelbäumen, Sonderkulturen, Brachen, Obstwiesen sowie kleinen Steh- und Fließgewässern bietet ein ideales Nahrungshabitat für den Rotmilan (Grüneberg & Karthäuser, 2019, S. 101). Daher hatte die Intensivierung der Landwirtschaft in den Ländern der ehemaligen DDR stark negative Auswirkungen auf die

Lebensgrundlagen der Population. Auch in anderen Teilen Deutschlands stellt die zunehmende Homogenisierung der Landnutzungen eine Bedrohung für die Lebensgrundlage des Rotmilans dar (Katzenberger et al., 2019, S. 338). Große Schläge mit einheitlicher Bewirtschaftung verengen das Nahrungsangebot zeitlich gesehen auf den Beginn der Vegetationsperiode und die Ernte oder Mahd. Eine vielfältige Mischung verschiedener Nutzungsformen bildet dagegen ein Mosaik aus Vegetationsformen und Zuständen mit wechselnden Lebensmöglichkeiten für die Beute des Rotmilans. Durch Flurbereinigungen ausgeräumte Landschaften weisen dagegen nicht ausreichend kleinteilige Landschaftselemente mit vielfältigen Nischen für potenzielle Beutetiere auf (Graham et al., 2005). Von besonderer Bedeutung für den Rotmilan sind kleinsäugerreiche Nahrungshabitate mit niedriger Bodenvegetation (Grüneberg & Karthäuser, 2019, S. 101). Wälder sind für den Rotmilan als Nahrungshabitat nicht interessant, da potenzielle Beutetiere durch die hohe Vegetation im Flug nicht auszumachen sind. Auch hochstehende Feldfrüchte, wie etwa auf Maisäckern, erschweren daserspähnen von Beute und verhindern damit den Jagderfolg (Heuck et al., 2013).

Rotmilane sind Nahrungsgeneralisten und ernähren sich opportunistisch von kleinen Säugetieren, Vögeln, Fischen, Insekten und Aas und scheuen dazu auch nicht die Annäherung an Siedlungsränder und Einzelhöfe. Rotmilane sind wie bereits dargestellt wenig wählerisch, was ihre Nahrungsquellen angeht und werden auch im Umfeld von Mülldeponien, Schlachthöfen, Tierkörperbeseitigungsanlagen oder Schnellstraßen bei der Nahrungssuche angetroffen (Aebischer, 2009). Eine charakteristische Verhaltensweise der Tiere ist die gezielte Suche nach frisch gemähten Grünländern oder abgeernteten Getreidefeldern. Durch die Bearbeitung mit landwirtschaftlichem Großgerät werden oft Kleinsäuger wie Hamster und Mäuse aufgescheucht, die darüber hinaus plötzlich ihre Deckung eingebüßt haben. Das trifft sowohl auf abgeerntete oder gemähte Flächen, als auch auf frisch umgebrochenes Ackerland zu. Dabei tritt eine Art Publikumseffekt auf. Sobald mehrere Greifvögel über einer Stelle zu kreisen beginnen, wird diese Ansammlung von Vögeln in benachbarten Revieren bemerkt und es stoßen immer mehr Exemplare dazu. Vor allem bei der Ernte im Spätsommer lassen sich daher oft beachtliche Versammlungen von Greifvögeln unterschiedlicher Arten beobachten, die von einem landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsereignis angezogen auf leichte Beute hoffen (Pfeiffer & Meyburg, 2015,

S. 971). Der Autor selbst konnte schon 21 Greifvögel, 15 davon Rotmilane, über einer einzigen Wiese, auf welcher noch ein mähender Traktor seine Bahnen zog, bei der Nahrungssuche beobachten.

2.2.5 Artspezifisches Flugverhalten

Das Flugverhalten des Rotmilans ist durch direkte Beobachtungen und Telemetriestudien in jüngerer Zeit breit untersucht worden (Heuck et al., 2019; Pfeiffer & Meyburg, 2022). Für die Raumnutzung spielen sowohl Motivationen der Tiere selbst als auch wechselnde Umweltbedingungen eine Rolle. Es hat sich gezeigt, dass die wichtigste Motivation für Flugaktivität der eintretende oder ausbleibende Erfolg bei der Nahrungssuche ist (Nachtigall et al., 2003; Pfeiffer & Meyburg, 2015). Es ist wahrscheinlich, dass ein von erfolgreicher Jagd am vorherigen Tag noch gesättigter Vogel den Beginn der morgendlichen Aktivität zeitlich nach hinten verschiebt. Ebenso wahrscheinlich stellen Tiere, die ihren eigenen sowie den Nahrungsbedarf ihrer Brut für den Tag erfüllt haben, ihre Flugaktivitäten früher ein, um ihre Ruhephase zu verlängern (Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 874). Der zu stillende Nahrungsbedarf ist während der Aufzucht der Jungen im Nest am höchsten, da hier auch das brütende und zumindest anfangs die Nestlinge bewachende Weibchen hauptsächlich durch das Männchen mitversorgt wird. Dementsprechend erreicht die Flugaktivität der männlichen Individuen in dieser Periode ihren Höhepunkt (Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 874). Ab der dritten Woche nach dem Schlüpfen der Jungen unternehmen die Weibchen selbst wieder mehr Flüge zur Nahrungssuche, bleiben aber tendenziell eher in der Nähe des Horstes. Daher zeigen Weibchen im Durchschnitt über die Dauer der Brutperiode weniger weite und hohe Flüge (Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 878). Der Zusammenhang zwischen zurückgelegter Distanz und gewählter Flughöhe ist in der Nutzung von Thermik zur Gewinnung von zusätzlichem Auftrieb begründet. Zur Überwindung weiter Distanzen steigen Rotmilane höher auf als sie es bei Jagdflügen oder sozialem Verhalten wie Balz- und Revierflügen tun würden. So wechseln sich Phasen von kreisendem Steigflug und langgezogenen Gleitflügen immer wieder ab. Daher ist der häufige Wechsel zwischen unterschiedlichen Höhenbändern ein wichtiges Merkmal des artspezifischen Flugverhaltens des Rotmilans (Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 876). Die meisten kleinräumigen Bewegungen finden in Höhen zwischen 5 m und 60 m Höhe und damit wie bereits in der Einleitung umrissen unterhalb des Gefahrenbereichs einer

modernen Windkraftanlage statt (Heuck et al., 2019; Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 876). Der Median aller gemessenen Flughöhen aus der Telemetriestudie betrug 41 m ü.G. und nur für Flugbewegungen mit sekundlichem Messintervall in der GPS-Positionierung 45 m ü.G. Die höchste gesicherte Flughöhe eines Rotmilans betrug beachtliche 1.613 m ü.G. (Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 872).

Sind längere Strecken, etwa zum Aufsuchen einer weiter entfernten Nahrungsquelle, zu überwinden, steigen die Vögel ggf. unter Ausnutzung thermischer Aufwinde auf ihre Optimalhöhe und gleiten dann über weite Strecken zu ihrem (Zwischen-) Ziel. Dieser Vorgang kann je nach Flugstrecke mehrmals wiederholt werden (Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 876). Hier ergibt sich eine interessante Verbindung zu Erkenntnissen über Auswirkung spezifischer Habitatsignale auf die Raumnutzung von Rotmilanen. Spatz & Katzenberger et al. (2022) zeigten, dass der Aktivitätsbereich von Rotmilanen bei einem höherem Nahrungsangebot in der Umgebung des Bruthorstes abnimmt (Spatz et al., 2022). Als Indikator für das Nahrungsangebot wurde dabei der Vegetationsindex NDVI verwendet. Ebenso korrelierte das höhere Nahrungsangebot mit einem höherem Bruterfolg der untersuchten Paare (Spatz et al., 2022). Dieser Zusammenhang wurde auch in einer Arbeit von Pfeiffer und Meyburg (2015) eindrucksvoll belegt. Sie konnten zeigen, dass ausgedehntere Raumnutzungen von Rotmilanen im Weimarer Umland negativ mit dem Bruterfolg der Paare korrelierten (Pfeiffer & Meyburg, 2015). In der Untersuchung zeigte sich eine Differenz zwischen den Geschlechtern, was die zurückgelegten Flugstrecken angeht. Männliche Exemplare nutzten im Median eine Fläche von 63,6 km² zur Nahrungssuche, wobei der Durchschnitt deutlich höher, bei 114,5 km² lag. Die Werte für die Weibchen lagen nur knapp darunter mit 60,7 km² als Median und 109,7 km² im Durchschnitt (Pfeiffer & Meyburg, 2015, S. 968). Die Abweichung lässt sich durch die größere Bindung der Weibchen an den Horst während Brut und Aufzucht der Jungen erklären. Gegen Ende der Brutperiode gleichen sich die zurückgelegten Flugwege der beiden Geschlechter wieder an (Pfeiffer & Meyburg, 2015, S. 968). Da neben der Raumnutzung selbst auch der Bruterfolg aufgezeichnet wurde, konnte die Studie zeigen, dass früherer Brutbeginn ebenfalls positiv mit höherem Bruterfolg korrelierte (Pfeiffer & Meyburg, 2015, S. 969). Eine Erklärung dafür könnte das Territorialverhalten der Tiere sein. Vögel die früher ihre Horste besetzen, verteidigen eine Zone von ca. 1,5 km² um den Brutplatz gegen Konkurrenten benachbarter

Horste und sichern sich so Jagdgründe für die Versorgung des brütenden Weibchens und der Küken selbst. Auch das Weibchen beteiligt sich mit Revierflügen an der Verteidigung des Revierzentrums (Pfeiffer & Meyburg, 2015, S. 970). Vögel, die ihre Brut erst später beginnen, müssen sich also teilweise gegen die bereits angekommenen Paare durchsetzen, wenn es um die Nahrungssuche in unmittelbarer Nähe des Horstes geht. Diese ist jedoch entscheidend für einen hohen Bruterfolg, da nur Männchen mit unterdurchschnittlichen mittleren Flugweiten von $< 50 \text{ km}^2$ in der Lage waren, Gelege mit drei oder vier Küken bis zur Eigenständigkeit aufzuziehen (Pfeiffer & Meyburg, 2015, S. 973).

Das bedeutet, dass eine Rotmilanpopulation doppelt von guten Habitatbedingungen profitiert. Einmal durch eine geringere Motivation im Hinblick auf Kollisionen mit Windkraftanlagen riskantere Distanzflüge in Höhen über 60 m zur Nahrungssuche zu unternehmen und zweitens durch bessere Chancen auf Reproduktionserfolg und Bestandserhalt oder bestenfalls Vergrößerung der Population. Um einen Schutz der Lebensräume des Rotmilans bestmöglich zu erreichen, erscheint es daher sinnvoll, wertvolle Habitate mit den zuvor beschriebenen offenen strukturreichen Landschaften von der Windkraftnutzung frei zu halten und den Nahbereich unmittelbar um den Horst ebenso zu schützen (Pfeiffer & Meyburg, 2015, S. 974; Drewitt & Langston, 2006, S. 37; Kolar & Bechard, 2016, S. 1250).

Die Witterung hat im Vergleich zu den beschriebenen elementaren biologischen Faktoren einen geringeren Einfluss auf das Flugverhalten des Rotmilans. Regen scheint keine negativen Auswirkungen auf die Flugaktivität zu haben (Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 875). Das ist überraschend, da beobachtet wurde, dass enge Verwandte des Rotmilans, nämlich Schwarzmilane ihre Flugaktivität bei Regen stark reduzieren und der Jagderfolg bei dennoch unternommenen Flügen weitgehend ausbleibt (Sergio, 2003, S. 1113). Allerdings sind aufgrund methodischer Einschränkungen in der Auflösung der verwendeten Wetterdaten hier noch Zweifel an der Aussagekraft dieser Schlussfolgerung angebracht (Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 873). Bei kurzen Flügen ist der Anteil, der im aktiven Flug unter Einsatz von Flügelschlägen verbracht wird, höher als bei Gleitflügen über lange Strecken. Der Energieverbrauch ist für den aktiven Flug höher als beim größtenteils passiven Gleitflug oder dem Segelflug unter Ausnutzung der Thermik. Der Energiebedarf auf gesegelten

Langstreckenflügen wird auf nur etwa elf Prozent des Verbrauchs für einen aktiven Flug über dieselbe Strecke geschätzt (Pennycuick, 1989). Daher sind die Vögel immer darauf bedacht, je nach vorherrschender Witterung, den jeweils energiesparendsten Flugmodus bei ihren Aktivitäten zu wählen. Hohe Windgeschwindigkeiten in Bodennähe stellen auch bei niedrigen Flughöhen zusätzlichen Auftrieb durch orographische Aufwinde bereit und führen dazu, dass die Tiere ihre Flughöhe bei einer Zunahme der Windgeschwindigkeit von einem Meter pro Sekunde im Durchschnitt um zehn Prozent reduzieren. Langer Sonnenschein führt zu einer labilen atmosphärischen Schichtung und erleichtert durch die ausgeprägte Thermik den Aufstieg in größere Höhen. Daher wurden für jede Stunde zusätzlichen Sonnenscheins am Tag im Durchschnitt zwölf Prozent höhere Flughöhen gemessen als bei bedecktem Wetter (Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 876).

Bei der Beurteilung des Einflusses von Wetterparametern ist es allerdings wichtig zu berücksichtigen, dass die für den Abgleich in der Telemetriestudie verwendeten Wetterdaten Mittelwerte für eine Fläche von etwa 4.400 km² und einen Zeitraum von drei Stunden darstellten. Während Sonnenscheindauer und Wind relativ großräumige Ereignisse darstellen, ist der Niederschlag, vor allem in den Sommermonaten während der Jungenaufzucht, manchmal lokal und zeitlich sehr begrenzt. Die Aussagen über das Verhalten der Vögel während der Niederschlagsereignisse sind daher auf großräumige Wetterereignisse beschränkt (Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 873).

2.2.6 Todesursachen und Sterblichkeit

Die Gesamtsterblichkeit von Greifvögeln zu ermitteln und nach konkreten Todesursachen aufzuschlüsseln, erweist sich als ausgesprochen schwierig. Das gilt für die Ermittlung von natürlichen und anthropogenen Todesursachen gleichermaßen. Besonders Studien zu Schlagopferzahlen an Windkraftanlagen haben immer mit methodischen Schwierigkeiten zu kämpfen. Bisher konnten entweder Zufallsfunde oder gezielte Suchen in Windparks in eine solche Betrachtung einbezogen werden (Bellebaum et al., 2013). Dabei kommt es unweigerlich zu Verzerrungen in der Datengrundlage, da andere potenziell gefährliche Orte an denen ebenfalls Kollisionen eintreten können, wie Hochspannungsleitungen oder Verkehrswege, nicht zeitgleich mit derselben Intensität beobachtet werden können (Bose et al., 2020; Silva et al., 2014). Auch die Ausmaße der Verluste durch Prädation von Gelegen

und Jungtieren im Horst können so teilweise nur schwer berücksichtigt werden, obwohl Kleinsäuger wie der Marder und vor allem der Waschbär als invasive Art eine bekannte Gefahr für die Brut des Rotmilans sind (Wasmund, 2013). In Deutschland sammeln beispielsweise die staatlichen Vogelschutzwarten der Bundesländer oder die Vogelwarten wissenschaftlicher Institute Meldungen von freiwilligen Helfern zu tot gefundenen Vögeln.

Die Datenlage zu den Todesursachen einzelner Rotmilane und dem Anteil an der Gesamtsterblichkeit verbessert sich jedoch durch die Fortschritte in der Telemetrie immer weiter. Sender deren Position sich über Tage nicht verändert haben, können gezielt aufgesucht und dann die Todesursache aus dem Zustand des Kadavers und den Umständen am Auffindeort ermittelt werden. Diese Art der Nachsuche ist zunächst unabhängig von der Todesursache. In der Konsequenz kann die Gewichtung unterschiedlicher Todesursachen im Hinblick auf die Gesamtpopulation sinnvoller bewertet werden als bisher (Raab et al., 2017, S. 259). Das Projekt Eurokite verfolgt seit 2013 diesen Ansatz und hat eine beachtliche Stichprobe von bisher 2.245 Rotmilanen in Europa mit GPS-Loggern versehen. Bei einem weltweiten Bestand von maximal 75.400 Einzeltieren ergibt das einen Anteil von knapp drei Prozent, wobei 897 Tiere bereits verstorben sind. Der Anteil an aktiven Sendern ist also entsprechend geringer. Die Laufzeit des Projekts ist derzeit bis Ende 2027 angesetzt und bis dahin soll ein Abschlussbericht zu den häufigsten Todesursachen der besenderten Tiere vorliegen. Dabei sind erstmals sowohl anthropogene als auch natürliche Todesursachen vollständig abgebildet. Vorläufig sind auf der Webseite des Eurokite-Projektes folgende Zahlen als Zwischenergebnis zu finden: „Zum jetzigen Zeitpunkt (Stand 01.2023) sind 897 besenderte Rotmilane verstorben (nicht berücksichtigt sind jene Rotmilane, bei denen es zu einen Senderausfall gekommen ist). 128 besenderte Rotmilane sind nachweislich durch Vergiftung und 38 durch illegalen Abschuss gestorben. 731 besenderte Rotmilane sind durch andere anthropogene und natürliche Ursachen, wie zum Beispiel durch Prädation, Kollision, Stromschlag oder Krankheit, ums Leben gekommen.“ (<https://www.life-eurokite.eu/de/unsere-voegel/zahlen-fakten.html>, abgerufen am 02.07.2023). Als häufige Todesursache wird weiterhin die Prädation von Nestlingen und Gelegen genannt. Diese kann im Rahmen des Projekts gut abgebildet werden, da bereits Jungtiere im Horst besendert werden.

Besonders Vergiftungen wurden auch in anderen systematischen Studien in jüngerer Zeit als häufige Todesursache für Rotmilane belegt (Molenaar et al., 2017; Pfeiffer & Meyburg, 2015; Tavecchia et al., 2012). Bei den für diese Arbeit besonders betrachteten Telemetriestudien sind besenderte Tiere nachweislich vor allem durch Vergiftungen nach dem Verzehr von Nagetierködern bzw. nach dem Verzehr der Kadaver vergifteter Nagetiere, weiterhin an Kollisionen im Straßenverkehr oder mit Hochspannungsleitungen gestorben (Raab et al., 2017, S. 259).

Der Rotmilan scheint aufgrund seines opportunistischen Verhaltens in der Nahrungsbeschaffung besonders anfällig für primäre wie sekundäre Formen von Vergiftungen zu sein. Bei einer primären Vergiftung sind verzehrte Giftköder die unmittelbare Todesursache. Häufig zielen diese Maßnahmen auf unerwünschte Nagetiere, wie Ratten oder Mäuse und werden beispielweise in landwirtschaftlichen Betrieben eingesetzt. Auch die Dezimierung von anderen Raubtieren wie Füchsen oder Mardern kann eine Absicht beim Einsatz von Giftködern sein (Graham et al., 2005). In diesem Fall werden die Gifte besonders häufig mit Fleisch als Lockmittel versehen und sind damit auch für Rotmilane attraktiv. Wenn diese Köder unsachgemäß für die Vögel zugänglich ausgelegt werden, können Vergiftungen die Folge sein. Die sekundäre Vergiftung tritt ein, wenn Kadaver vergifteter Kleinsäuger oder anderer Arten vom Rotmilan gefunden und direkt verzehrt oder in der Folge an die Brut verfüttert werden. Eine Untersuchung an wieder eingeführten Rotmilanen in Großbritannien zeigte, dass 20 % der untersuchten Totfunde auf Vergiftungen unterschiedlicher Art zurückzuführen waren (Molenaar et al., 2017).

Eine weitere Studie zu Todesursachen von Greifvögeln, die auf Mallorca durchgeführt wurde, zeigte ebenfalls Vergiftung als die häufigste Todesursache von jungen Rotmilanen bis zum dritten Lebensjahr (Tavecchia et al., 2012). Die Anteile an der Gesamtmenge tot aufgefundener Vögel schwankte dabei über die ersten drei Lebensjahre. Gestorbene Rotmilane im ersten Lebensjahr fielen zu 40 % einer Vergiftung zum Opfer. Dieser Anteil verdoppelte sich im folgenden Jahr auf 80 %, um im dritten Lebensjahr wieder auf etwa 65 % zu fallen. Die besonders hohen Verluste unter Jungvögeln wurden durch ein unstetes Nahrungsangebot als Folge noch schwach ausgeprägter Territorialität erklärt. Dabei würden die Jungvögel besonders häufig Aas verzehren, welcher durch ausgelegte Giftköder

kontaminiert sei. Als zweithäufigste Todesursache wurde in dieser Arbeit der Stromschlag an Freileitungen identifiziert. Dessen Anteil lag für alle Altersgruppen konstant bei etwa 12 % der Verluste (Tavecchia et al., 2012, S. 14).

Ein Beispiel aus der Praxis mag dazu dienen den ökologischen Wirkungszusammenhang bei Vergiftungen zu verdeutlichen. Im Rahmen von laufenden avifaunistischen Untersuchungen in einem Projektgebiet für Windkraftanlagen wurden durch das beauftragte Gutachterbüro in der Nähe einer Biogasanlage ungewöhnlich dichte Flugbewegungen von Rotmilanen und anderen Greifvögeln festgestellt. Zeitweise wurden im Umfeld der Anlage 96 Vögel gezählt. Durch Gespräche mit Anwohnern und einer Ortsbegehung konnte ermittelt werden, dass an der Biogasanlage eine größere Menge nicht zum Verzehr geeigneten Käses zum Zweck der späteren energetischen Verwertung unter freiem Himmel lagerte. Dieser Käse lockte eine Vielzahl von potenziellen Beutetieren wie Ratten und Mäusen an und die Lokalität entfaltete daher in der Konsequenz eine enorme Attraktionswirkung für Greifvögel, die sich immer weiter verstärkte, je mehr Exemplare sich im Umfeld der Anlage aufhielten. Es gehört weiterhin nicht viel Fantasie dazu, ein Szenario zu entwerfen, in dem der Befall durch Nagetiere mit dem Einsatz von Giftködern eingedämmt wird und die in der Folge anfallenden kontaminierten Kleinsäugerkadaver von den immer noch um die Anlage schwärmenden Greifvögeln aufgenommen und möglicherweise auch an ihre Brut verfüttert werden. So könnte auf einen Schlag ein signifikanter Schaden an der lokalen Population angerichtet werden, dessen Ursache im Nachgang nur schwer nachzuverfolgen wäre (M. Schilling, Persönliche Mitteilung, 3. Juli 2023).

Aus der gesichteten Literatur und dem laufenden Eurokite-Projekt zum Zustand der Rotmilanpopulation ergibt sich folgendes Bild. Der besondere Fokus auf den Erhalt der Art ist in Anbetracht der global gesehen geringen geographischen Verbreitung gerechtfertigt. Lokal negative Bestandsentwicklungen sind vor allem durch mangelndes Nahrungsangebot in Folge von Habitatverlusten in einer zunehmend homogenen, anthropogen überprägten Kulturlandschaft zu erklären (Heuck et al., 2013; Katzenberger et al., 2019; Wasmund, 2013). Verlusten in Hauptbrutgebieten Mitteleuropas stehen positive Salden in andere Regionen Europas gegenüber. Vergiftungen haben sich vielfach als bestandswirksame Verlustursache herauskristallisiert (Molenaar et al., 2017; Pfeiffer & Meyburg, 2015; Tavecchia et al., 2012).

Ähnliche Forschungsergebnisse liegen auch zu anderen Greifvögel wie dem Steinadler vor (Watson et al., 2018, S. 12). Die Bedeutung von Kollisionen mit Windkraftanlagen im Hinblick auf die Bestandsentwicklung von Gesamtpopulationen ist bisher nicht abschließend geklärt (Bellebaum et al., 2013; de Lucas, 2008; Kolar & Bechard, 2016) (Watson et al., 2018, S. 13). Da der Windkraftnutzung an Land aber ein bedeutender Anteil an der Erzeugung Erneuerbarer Energien in Deutschland und Europa zukommt, der sich perspektivisch durch die zunehmende Elektrifizierung von bisher in Deutschland noch weitgehend fossilen Energiesektoren, wie Wohnen und Verkehr noch steigern wird, sollte dieser Zusammenhang in der weiteren Forschung nicht aus dem Blickfeld geraten.

2.3 Themenkomplex Windkraft und Avifauna

2.3.1 Anlagenmerkmale und Kollisionsrisiko

In diesem Abschnitt sollen die anlagenspezifischen Faktoren, die das Kollisionsrisiko von Greifvögeln mit Windkraftanlagen beeinflussen können, dargestellt werden. Dazu ist es wichtig, den äußeren Aufbau und die Funktionsweise einer Windkraftanlage zu betrachten.

Vor allem der Rotordurchmesser und die Nabenhöhe einer Windkraftanlage haben wesentlichen Einfluss auf das Kollisionsrisiko für Avifauna. Niedrige Anlagen mit geringerer Leistung und hoher Rotordrehzahl, die dazu meist in geringeren Abständen zueinander errichtet werden, tendieren zur Häufung von Schlagopfern (Smallwood, Neher & Bell, 2009). Dem kann teilweise durch eine farbliche Markierung der Rotorblätter, die den Kontrast zur Umgebung erhöht, begegnet werden (Marques et al., 2014, S. 48; Drewitt & Langston, 2006, S. 37). Je nach nationaler Gesetzgebung ist eine farbliche Markierung von Rotorblättern, zum Beispiel mit roten Streifen (siehe Abbildung 5), aus Gründen der Verkehrssicherheit für die Luftfahrt ohnehin vorgeschrieben (AVV-Kennzeichnung, 2020).

Aber auch andere Sicherheitsmerkmale wie die Nachtkennzeichnung mit rot oder weiß blinkenden Leuchten, die ebenfalls zur Sicherheit im Luftverkehr dienen sollen und in Anlehnung an die Seefahrt auch als Befeuerung bezeichnet werden, können von Bedeutung für die Avifauna sein (siehe Abbildung 6). Zugvögel können bei Nacht oder bei schlechten Sichtbedingungen von dieser auffälligen künstlichen Beleuchtung abgelenkt oder gar angezogen werden und so in Gefahr für Kollisionen geraten (Hüppop et al., 2006). Dieses

Problem ist auch von Bohrplattformen auf See oder Offshore Windparks bekannt (Poot et al., 2013). Ein solcher Effekt konnte allerdings nicht bei ortsansässigen Landvögeln beobachtet werden. Das kann vermutlich dadurch erklärt werden, dass sie an künstliches Licht aus anderen Quellen gewöhnt sind und ihnen die Orientierung in ihrem bekannten Lebensraum leichter fällt (Köppel, 2017).

Diesen Problemen wird in naher Zukunft durch eine technische Lösung begegnet. Bis zum Stichtag 01.01.2025 müssen alle Anlagen in Deutschland mit einer Bedarfsgesteuerten Nachtkennzeichnung (BNK) ausgestattet werden. Diese Vorrichtung soll sicherstellen, dass die Leuchten der Hindernisbefeuernung im sichtbaren Spektrum nur aktiv sind, solange sich ein Luftfahrzeug im Umkreis von maximal sechs Kilometern um eine Windkraftanlage befindet. Dabei wird zur Detektion auf die Transpondersignale der Luftfahrzeuge selbst zurückgegriffen (AVV-Kennzeichnung, 2020). Die herkömmlichen roten Leuchten werden im Zuge der Umrüstung außerdem um eine Infrarotkomponente ergänzt, die für Piloten von Polizei, Rettungsdienst und Militär mit Nachtsichtgeräten wahrnehmbar ist, da diese unter Umständen zur Erfüllung ihres Auftrags ohne Transponder fliegen müssen. Diese gesetzliche Neuerung wird allerdings nicht mit der Verbesserung des Artenschutzes begründet, sondern soll sich vorteilhaft auf die Akzeptanz von Anwohnern auswirken. Ein positiver Nebeneffekt für die Sicherheit von Zugvögeln dürfte dennoch eintreten.

Vom Turm einer Windkraftanlage selbst geht nach allgemeinem wissenschaftlichem Verständnis kein signifikantes Risiko für Kollisionen aus. Aufgrund ihrer statischen Natur haben Vögel und auch Fledermäuse, keine Schwierigkeiten sie als Hindernisse zu erkennen (Smallwood, Neher & Bell, 2009). Teilweise konnte beobachtet werden, dass Anlagen mit sehr niedrigen Nabenhöhen (< 100 m) von Vögeln als Ansitz oder zur Rast verwendet wurden, was immer wieder zu Schlagopfern führte (Smallwood, Neher & Bell, 2009). In den ersten Anlagenmodellen teilweise gebräuchliche Gittertürme hatten denselben nachteiligen Effekt. Diese Bauweise ist bei modernen Anlagen aber vollständig durch eine Kombination von Stahlröhren und/oder Betonelementen ersetzt worden (Anderson, 2020).

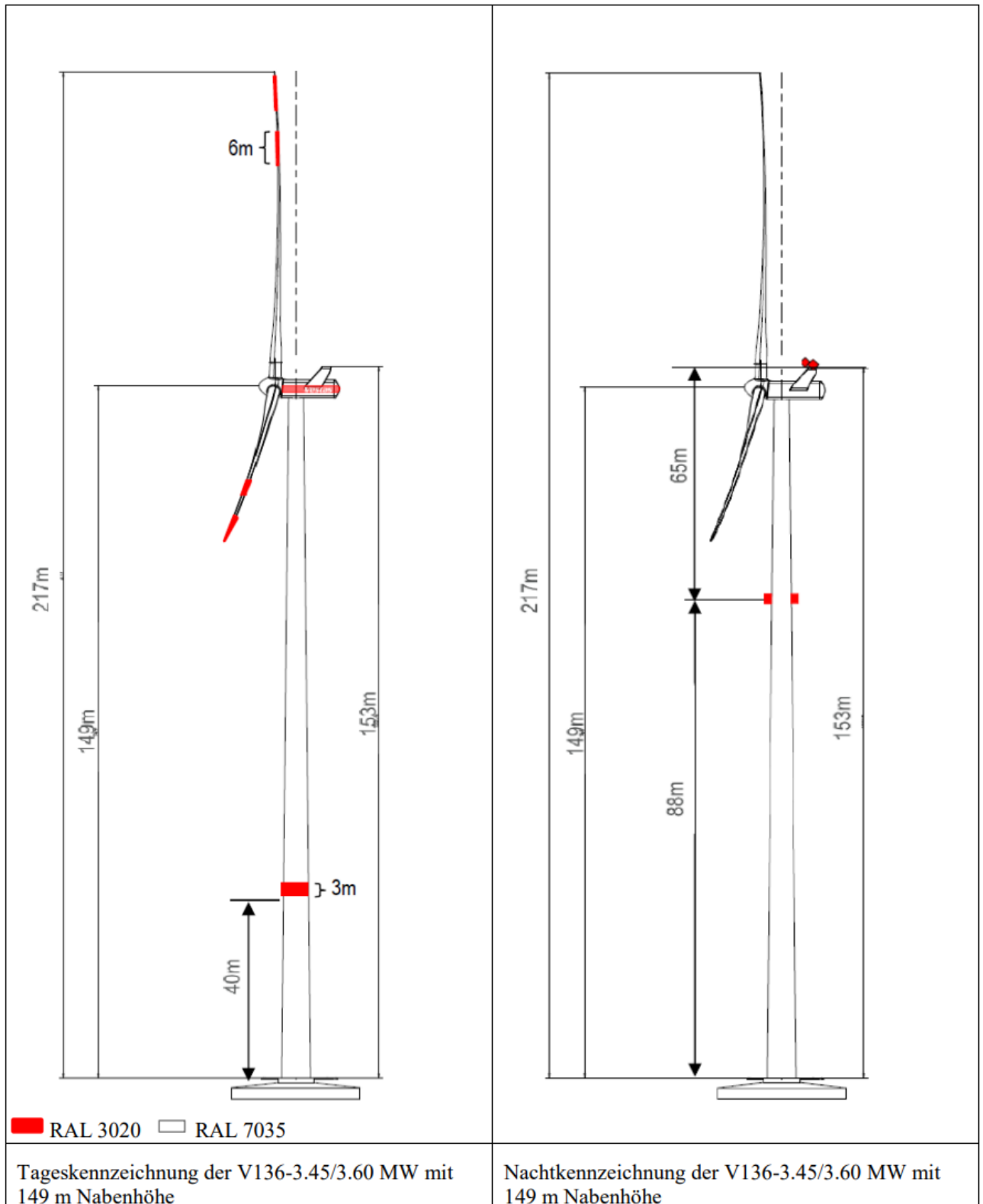


Abbildung 5: Nach AVV-Kennzeichnung sind für Windkraftanlagen über 100 m Gesamthöhe sowohl eine Tageskennzeichnung mit roten Streifen (links) als auch eine Nachtkennzeichnung mit roten Blinkleuchten (rechts) vorgeschrieben. Die Tageskennzeichnung der Rotorblätter kann die visuelle Erkennung der Anlagen für Vögel erleichtern, während die künstliche Befeuerung nachteilige Effekte auf Zugvögel haben kann (entnommen aus: <https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/V136-4-2-MW>).

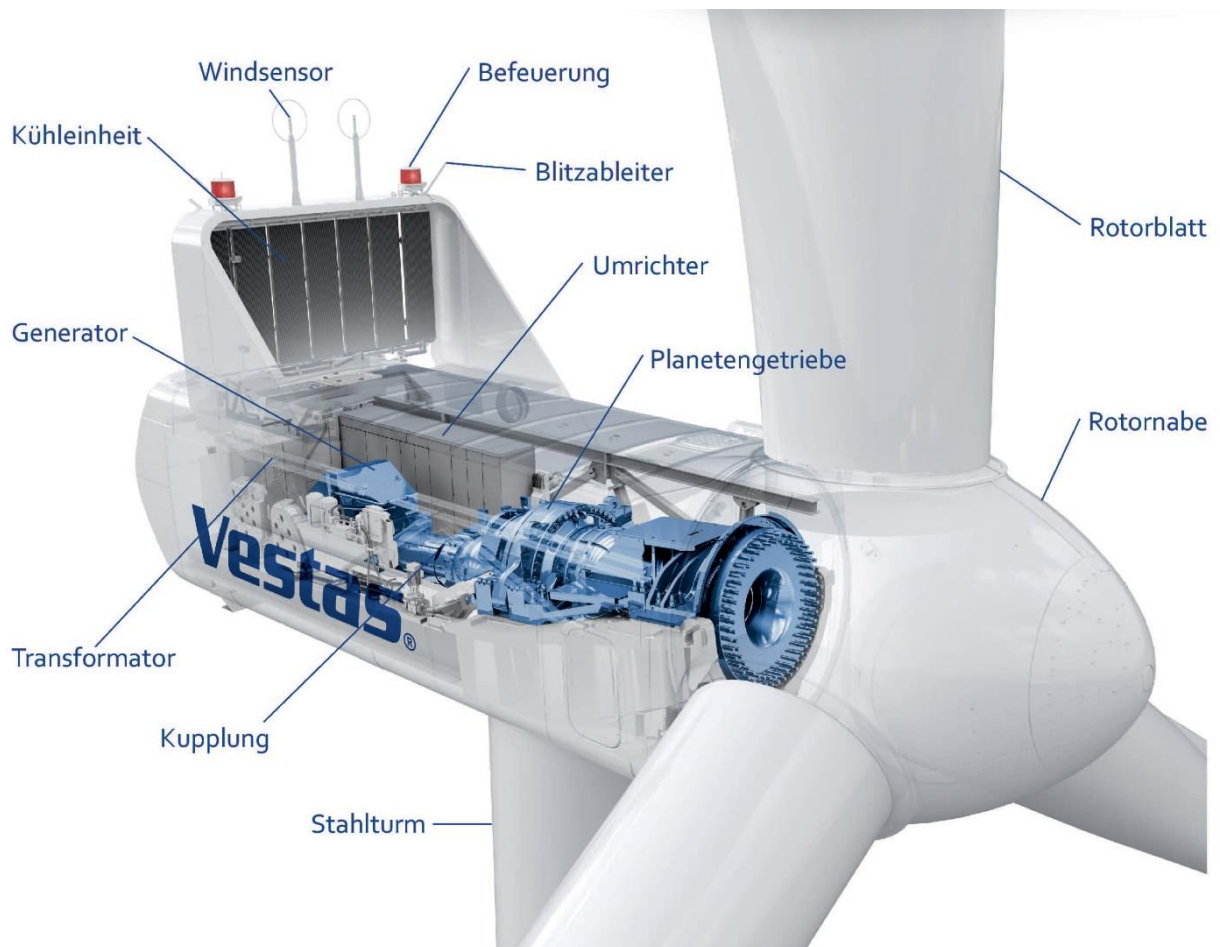


Abbildung 6: Zeichnerische Darstellung des Maschinenhauses einer Windkraftanlage des Typs Vestas V136. Zu sehen sind die Leuchten der Nachtkennzeichnung und weitere Baugruppen einer WEA. Für Kollisionen von Greifvögeln sind besonders die Rotorblätter ein maßgeblicher Faktor (Entnommen und verändert aus <https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/V136-4-2-MW>).

2.3.2 Planungskriterien für Windkraftanlagen

Ein Problem, das die Windkraft mit vielen anderen Infrastrukturvorhaben gemein hat, ist die intensive Nutzung, wenn nicht Übernutzung, des Raums in einer modernen Kulturlandschaft. Nahezu überall existieren teilweise konkurrierende Interessenbereiche von Behörden, Unternehmen und Privatpersonen (siehe Abbildung 7). Um sich erfolgreich in dieses vielschichtige Bedingungsgefüge zu integrieren, sind viele Abstimmungs- und Aushandlungsprozesse zwischen den Beteiligten nötig, bis ein Projekt in die Umsetzung gehen kann (Kist et al., 2023; Rafiee et al., 2018).

Planerische Vorgehensweise

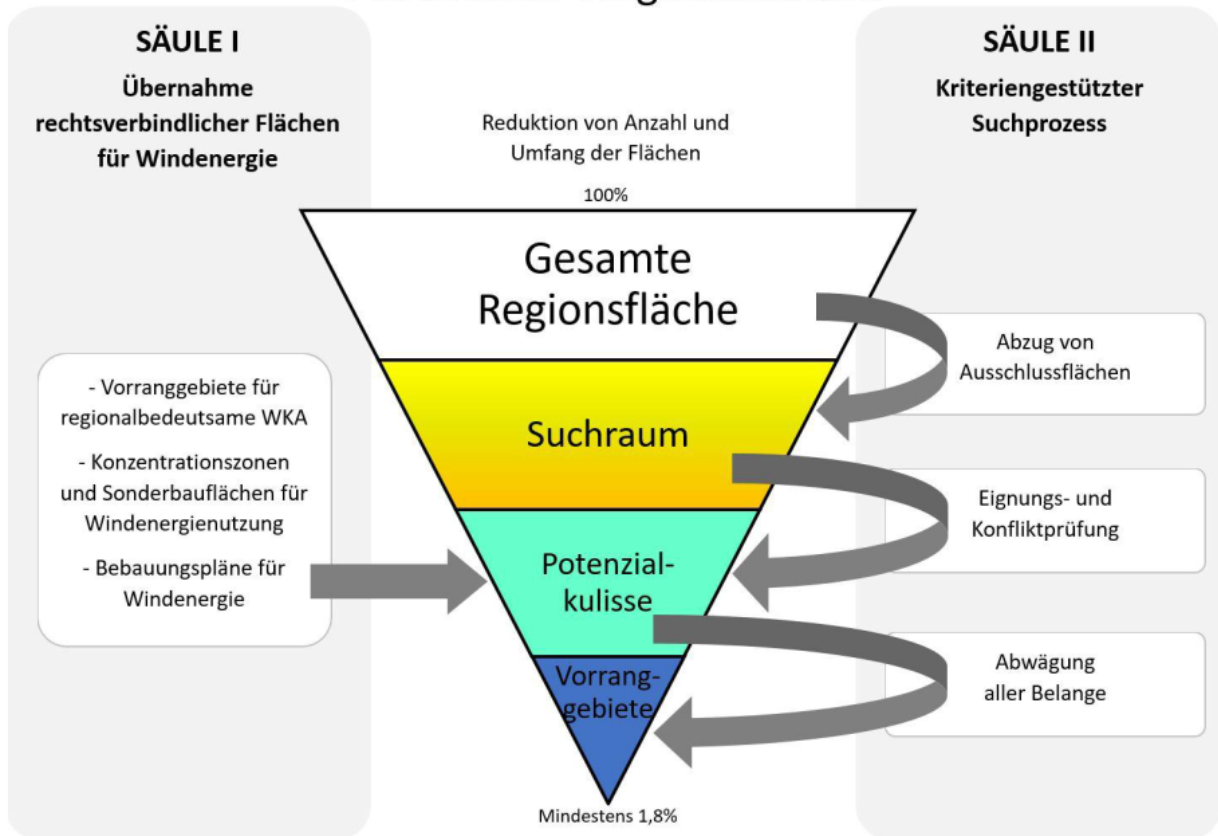


Abbildung 7: Ablauf des Planungsprozesses zur Ausweisung von Vorranggebieten für die Windkraftnutzung auf Ebene eines deutschen Regionalverbands. Die Umsetzung wird zum größten Teil über GIS gestützte Analysen bewerkstelligt, in die Daten aus vielfältigen Quellen eingearbeitet werden (Kist et al., 2023).

Dabei spielen gewachsene ökonomische Strukturen und deren Wechselwirkung mit technischen Entwicklungen eine wichtige Rolle. Die zentralisierten fossilen und teilweise auch nuklearen Einzelkraftwerke, die die Energiewirtschaft und Energieinfrastruktur in praktisch allen Industriestaaten seit vielen Jahrzehnten geprägt haben, sind auf die Erzeugung einer weitgehend konstanten elektrischen Leistung ausgelegt und aufgrund ihres exothermen Produktionsprozesses auf große Mengen Kühlwasser angewiesen (Kist et al., 2023). Damit sind Tallagen mit permanent Wasser führenden Flüssen eine natürliche Standortwahl für diese Formen der Energiebereitstellung. Da zugleich die großen industriellen Zentren mit hohem Energiebedarf in der Nähe historisch gewachsener, dicht besiedelter Agglomerationsräume und damit oft häufig ebenso in Flussnähe zu finden sind, kam es unweigerlich zu einer räumlichen Konzentration von Erzeugungsanlagen und Verbrauchern (Rafiee et al., 2018). Daher war bisher kaum ein Ausbau von leistungsfähiger Netzinfrastruktur in der Fläche nötig. Die Anbindung dünn besiedelter, vor allem

landwirtschaftlich geprägter Regionen ist nach wie vor lediglich auf eine vergleichsweise geringe elektrische Lastabnahme ausgelegt. Eine Einspeisung in das Stromnetz aus der Fläche heraus war in nennenswertem Umfang nicht vorgesehen. Diese zumindest historisch gesehen sinnvolle Konstellation wird durch den Umbau der Energiewirtschaft hin zu einer überwiegend dezentralen Erneuerbaren Stromerzeugung zum Zweck der Dekarbonisierung auf den Kopf gestellt (Kist et al., 2023).

Für die Windkraftnutzung an Land bieten sich in Süddeutschland vor allem dünn besiedelte, höher gelegene und unter Umständen bewaldete Standorte an. Die an solchen Orten zur Verfügung stehende lokale Netzinfrastruktur ist in aller Regel nicht für die Aufnahme von Erzeugungsleistungen von drei oder vier modernen Windkraftanlagen mit jeweils mindestens fünf Megawatt Nennleistung ausgelegt. Bemühungen der Netzbetreiber diesen Mangel zu beheben finden zwar statt, sind aber aufgrund ihres eigenen zeitlichen Planungshorizonts nicht geeignet kurzfristig auf den Strukturwandel der Angebotsseite zu reagieren (Kist et al., 2023). Daher erscheint es notwendig, bisher von der Windkraftnutzung frei gehaltene Bereiche mit hoher Siedlungsdichte in stärkerem Maß in die Ausweisung von Vorranggebieten für die Windkraftnutzung vorzusehen als das bisher der Fall war. So können die bestehenden Netzinfrastrukturen um die existierenden und nicht ohne Weiteres zu verlagernden Verbrauchsschwerpunkten besser ausgelastet und gleichzeitig die Kosten für den Netzausbau minimiert werden (Kist et al., 2023). Das erfüllt auch Forderungen aus der Forschung zum Konfliktfeld zwischen Windkraft und Artenschutz, ökologisch weniger vorbelastete Bereiche im ländlichen Raum, die häufig wichtige Lebensräume diverser Arten beinhalten, nicht durch den Zubau Erneuerbarer Energien über die Maßen zu fragmentieren (Köppel, 2017; Watson et al., 2018, S. 14).

Die für jede Planung individuelle Kombination aus WEA-Typ, Zahl und ihrer Dislozierung im Projektgebiet wird von Planern als Windparklayout bezeichnet. Das Windparklayout ist ein wichtiger Faktor bei der Betrachtung von Kollisionsrisiken. Es hat sich zum Beispiel gezeigt, dass von einzelnen, möglicherweise am Rand des Aufstellungsmusters exponierten Anlagen innerhalb eines Windparks ein überproportional hohes Kollisionsrisiko ausgehen kann (Smallwood, Neher & Bell, 2009). Es soll nachfolgend genauer betrachtet werden, welche Faktoren zur Bildung eines Layouts in der Praxis beitragen.

Die landschaftlichen Standortbedingungen sind ein wichtiger von vielen weiteren Faktoren bei der Planung von Windkraftanlagen. Das Windpotential und damit der zu erwartende Ertrag leiten sich zum großen Teil aus der lokalen Topografie ab. Anlagen auf höher gelegenen Standorten profitieren von größeren Windgeschwindigkeiten und freierer Anströmung, während bodennahe Winde turbulenter sind, da sie von Vegetation, Bebauung und Orographie gebremst und abgeschwächt werden (Anderson, 2020). Dieser Zusammenhang wird als oft auch als Hellmann-Exponent oder mittlerer Windgradient bezeichnet. Der mittlere Windgradient α ist ein Maß für die Windzunahme mit zunehmender Höhe. Er ist eine Größe, mit dem sich die Windgeschwindigkeit einer beliebigen Zielhöhe aufgrund einer bekannten Windgeschwindigkeit in einer Ausgangshöhe wie folgt annäherungsweise berechnen lässt:

$$v_2 = v_1 \cdot (h_2/h_1)^\alpha$$

mit

α Windgradient (Hellmann-Exponent)

v_1 Windgeschwindigkeit in Höhe 1

v_2 Windgeschwindigkeit in Höhe 2

h_1 Höhe 1

h_2 Höhe 2

Sowohl die lokale Geländebeschaffenheit als auch der aktuelle Zustand der Atmosphäre beeinflussen die Windzunahme mit der Höhe. Über Wasserflächen oder sehr offenem Gelände treten typischerweise sehr niedrige Windgradienten auf, da die bodennahen Luftschichten bereits weniger Störungen ausgesetzt sind. Demgegenüber sind in stark strukturiertem Gelände und insbesondere über Waldflächen hohe Windzunahmen mit steigender Höhe zu erwarten, da die Differenzen in der Windgeschwindigkeit zwischen bodennaher Strömung und freier Atmosphäre größer sind (Albrecht et al., 2019).

Als Kriterium für die Bewertung der Eignung von Flächen im Hinblick auf ihre Windhöffigkeit wurde in der Vergangenheit die mittlere Jahreswindgeschwindigkeit in m/s verwendet. Dieser Parameter gibt jedoch das Produktionsverhalten einer Windenergieanlage nur

bedingt wieder, da die meisten Windkraftanlagen aufgrund mechanischer Belastungen ab einer Windgeschwindigkeit von ca. 15 m/s abgeregelt werden müssen (Anderson, 2020). Neben dem mittleren Windangebot an einem gegebenen Standort spielen daneben insbesondere die folgenden Faktoren eine Rolle: die Luftdichte, die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit im Jahresverlauf und die bereits beschriebene Abregelung der WEA bei Nennwindgeschwindigkeit (Albrecht et al., 2019). Der Zusammenhang zwischen diesen Faktoren und der in einem Windstrom enthaltenen Leistung stellt sich wie folgt dar:

$$E = 1/2 \rho u^3$$

mit

ρ Luftdichte

u Windgeschwindigkeit

Die im Wind enthaltene Energie steigt also überproportional mit der Windgeschwindigkeit. Eine doppelt so hohe Windgeschwindigkeit bedeutet achtmal mehr Windleistung und damit auch Energieausbeute in Form von erzeugten Kilowattstunden (Albrecht et al., 2019). Daher versuchen Planer Anlagenstandorte an Hochpunkten im Gelände zu platzieren und Senken oder windabgewandte Hänge zu meiden (Anderson, 2020; St. Martin et al., 2016; Aydin et al., 2010, S. 373). Das Planungskriterium Windhöflichkeit drückt sich in Planungsgrundlagen wie zum Beispiel dem Windatlas des Landes Baden-Württemberg als Windleistungsdichte in Watt pro Quadratmeter (W/m²) in einer bestimmten Höhe ü.G. aus. In die Bildung der Windleistungsdichte fließt auch ein lokaler Korrekturfaktor ein, der die Häufigkeitsverteilung von Windgeschwindigkeiten im Jahresverlauf und die Luftdichte abbildet (Albrecht et al., 2019). Denn kältere Luft ist molekular dichter und hat daher eine höhere kinetische Energie als wärmere und damit weniger dichte Luftmassen. Genauso nimmt die Luftdichte mit zunehmender Höhe ab und verliert damit an kinetischer Energie. Dieser Effekt spielt aber in den Höhen in denen Windkraftanlagen üblicherweise errichtet werden keine große Rolle (Anderson, 2020).

Ein wesentlicher Faktor bei der Planung von Windparks ist außerdem die Turbulenzintensität, die entweder Oberflächenformen in der Umgebung oder die Anlagen untereinander erzeugen. Höhere Turbulenzen verringern den Energieertrag der Anlagen und

führen zu zusätzlichen mechanischen Belastungen, die über die Dauer der Betriebszeit Schäden am Getriebe und anderen Bauteilen zur Folge haben können (Frandsen & Sten, 2007; Tian et al., 2022, S. 762) Der Abstand zwischen Windkraftanlagen wird vereinfacht anhand von sogenannten Turbulenzellipsen ermittelt (siehe Abbildung 8, Abbildung 9). Diese berechnen sich über die Hauptwindrichtung und den Rotordurchmesser der WEA. So gibt beispielsweise die in Mitteleuropa vorherrschende westliche bis südwestliche Hauptwindrichtung eine entsprechende Längsausrichtung der Ellipsen vor (Hansen et al., 2012). Die kurze und lange Achse der Ellipsen bilden sich aus dem dreifachen, beziehungsweise fünffachen Rotordurchmesser (Santhanagopalan V., 2017, S. 29). Das bedeutet, dass Anlagen mit kleinerem Rotordurchmesser enger zueinander platziert werden können, als Anlagen mit größerem Rotordurchmesser (siehe Abbildung 10). Da aber größere Anlagen einen höheren Wirkungsgrad in der Energieausbeute haben, wird ein Planer bestrebt sein, möglichst viele große Anlagen in einer verfügbaren Fläche einzuplanen (Santhanagopalan V., 2017). Da weiterhin die Größe eines Projektgebiets in aller Regel durch externe Faktoren begrenzt ist, wird das Ergebnis des Planungsprozesses zu weniger großen Anlagen anstelle von vielen kleineren Anlagen in dergleichen Fläche tendieren. Das ist von hoher Relevanz für die Reduktion des Kollisionsrisikos von Greifvögeln an Windkraftanlagen. Es gilt als gesichert, dass sowohl höhere Nabenhöhen als auch größere Anlagen mit größeren Abständen zwischen den einzelnen Standorten zu weniger Schlagopfern führen (A. Johnston et al., 2014, S. 38; Smallwood, Neher & Bell, 2009). Da die Energieausbeute solcher Anlagen darüber hinaus weitaus besser ist, lassen sich Artenschutz und CO²-emissionsarme Energieerzeugung immer besser miteinander vereinen (Anderson, 2020).

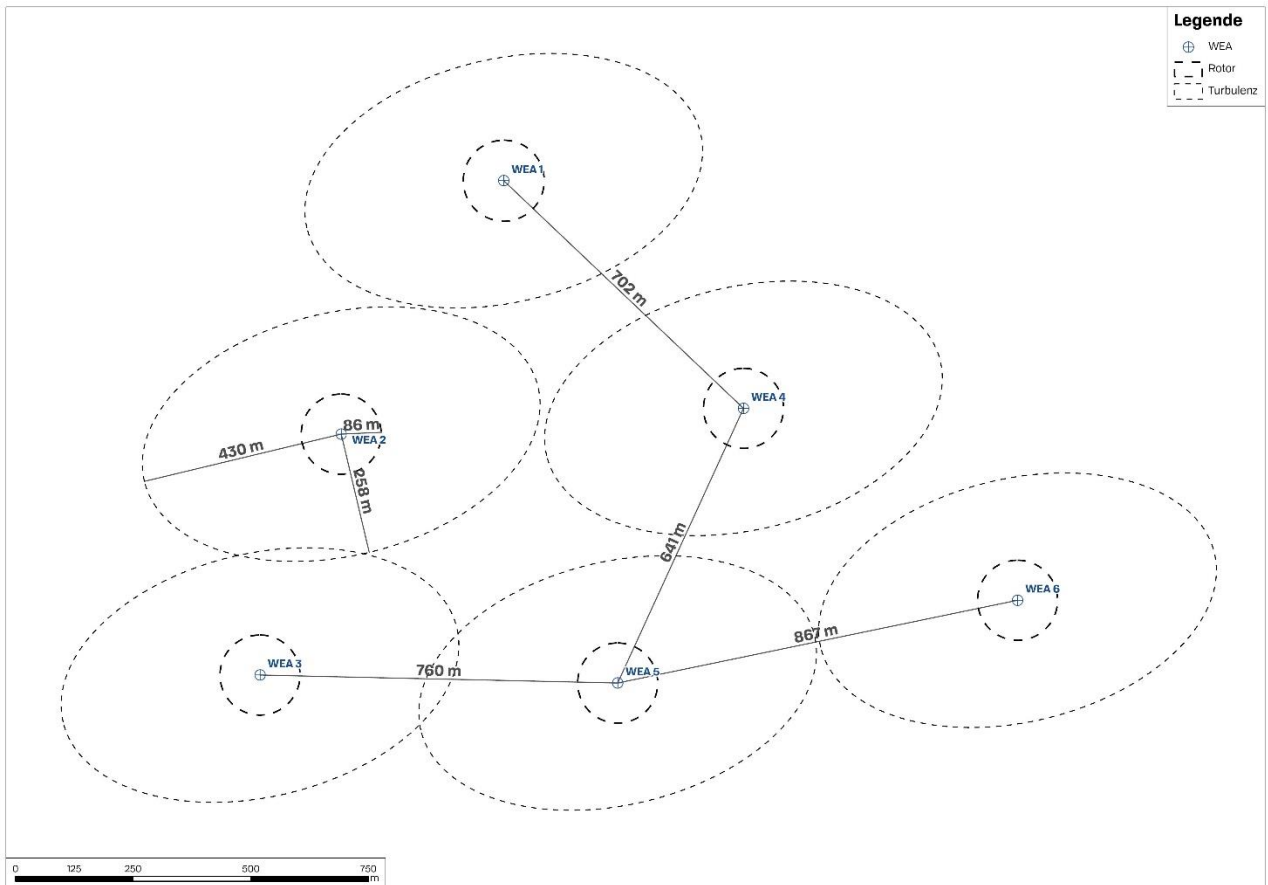


Abbildung 8: Schematisches Windparklayout für sechs Anlagen mit 172 m Rotordurchmesser. Zu erkennen sind Ausrichtung und Größe der Turbulenzellipsen, die den Abstand der WEA untereinander bestimmen. Überschneidungen der Ellipsen sind dabei möglich aber nicht erwünscht, da sie sich ertragsmindernd auswirken. Durch eine zu enge Platzierung sinkt die Effizienz der Anlagen im Windschatten, die sich im sogenannten Parkwirkungsgrad ausdrückt. Bei einer angenommenen Hauptwindrichtung aus west-süd-west erleiden also die Anlagen 4, 5 und 6 Ertragsminderungen gegenüber den frei angeströmten Anlagen 1, 2 und 3 (eigene Darstellung).

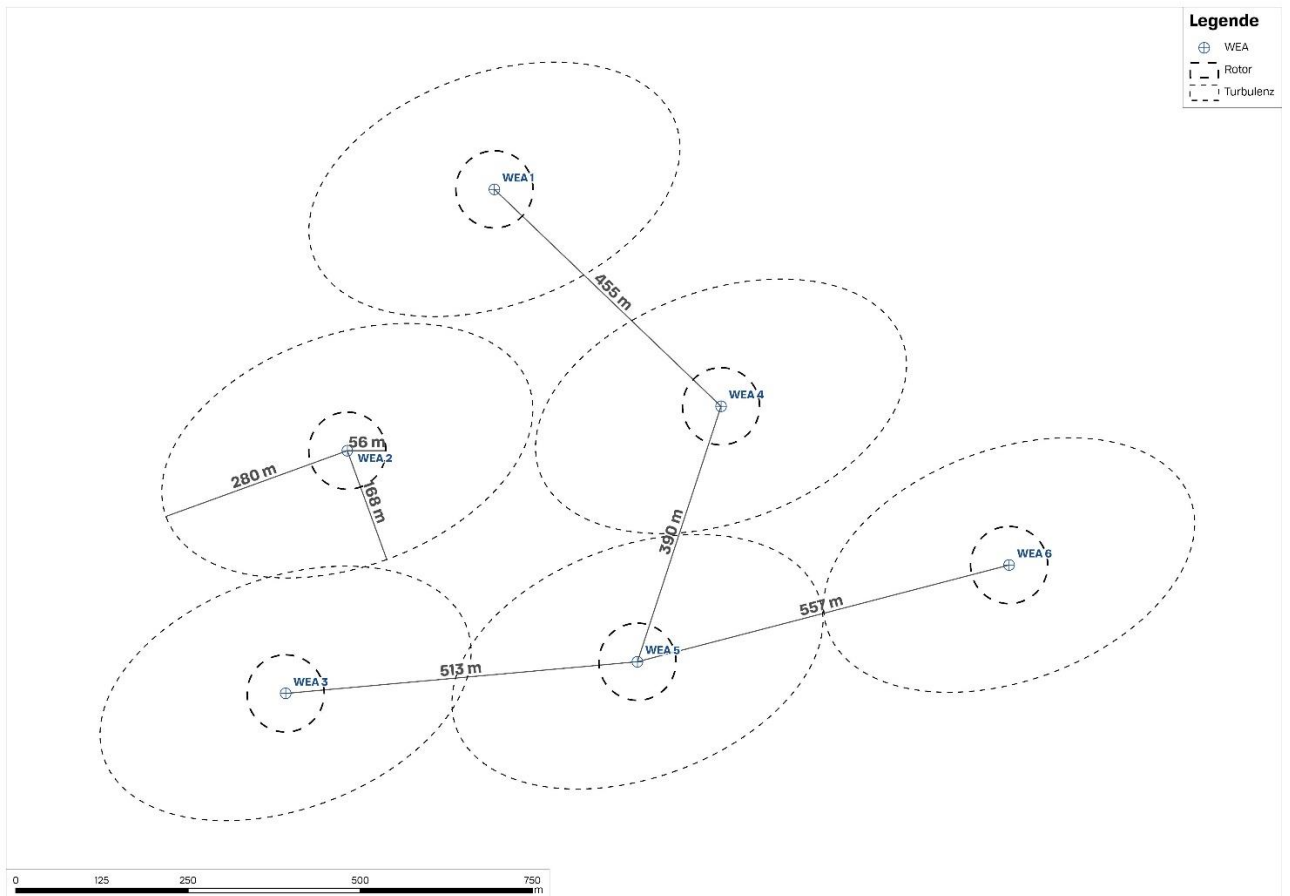


Abbildung 9: Schematisches Windparklayout für sechs WEA mit 112 m Rotordurchmesser. Zu erkennen sind die geringeren Abstände zwischen den Standorten im Vergleich zu den größeren Anlagen. Greifvögel, die sich innerhalb dieses Windparks bewegen, haben ein höheres Risiko mit einer Anlage zu kollidieren, da erstens weniger Freiraum zum Manövrieren bleibt und weil die kleineren Anlagen in aller Regel niedrigere Nabenhöhen aufweisen als größere Anlagen. Dafür nimmt das Gesamtgebilde eine kleinere Fläche ein als bei den sechs größeren Anlagen. Der Windpark hat aber eine geringere Gesamtleistung (eigene Darstellung).

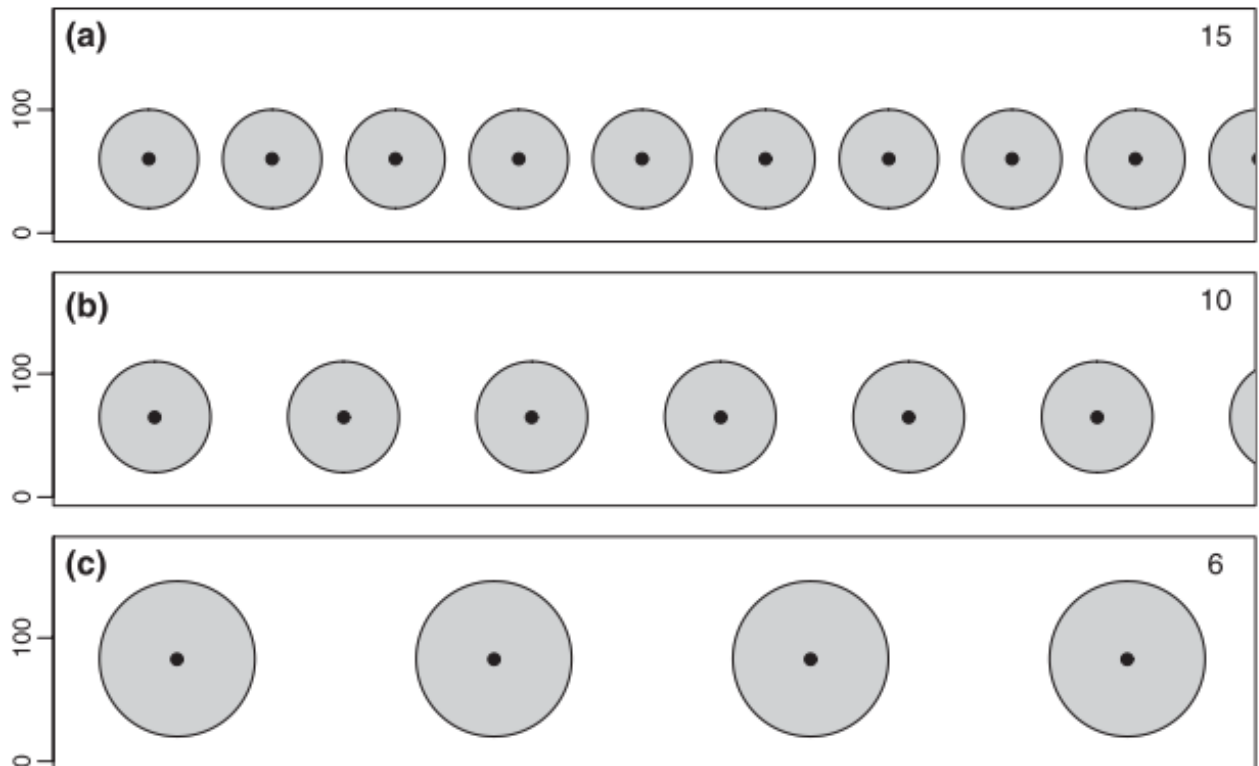


Abbildung 10: Schematische Darstellung von drei Windparklayouts mit unterschiedlichen Anlagentypen. In der rechten oberen Ecke ist Zahl der Anlagen notiert, die jeweils nötig ist, um ein Leistungsequivalent von 30 MW zu erreichen. Selbst bei gleichbleibender Nabenhöhe (Skala am linken Rand) erlauben die größeren Lücken zwischen den Anlagen sicherere Durchflüge von Vögeln zwischen den Anlagen. Entnommen und verändert nach (A. Johnston et al., 2014).

Daneben gibt es noch eine Reihe von weiteren hauptsächlich anthropogenen Faktoren, die den Umfang eines Projektgebiets und nachfolgend die Standortwahl innerhalb des Gebiets beeinflussen (Madders & Whitefield, 2006, S. 1; Rafiee et al., 2018). Ein wichtiges Kriterium besteht in der Einhaltung von gesetzlichen Vorgaben im Hinblick auf Schall- und Schattenemissionen. Diese sind im bereits in der Einleitung erwähnten BImSchG geregelt und dürfen an umliegenden Wohnplätzen nicht über festgelegten Grenzwerten liegen (TA Lärm, 1998). Darüber hinaus können Planungsträger auf kommunaler, regionaler oder auf Länderebene weitergehende Mindestabstände von Windkraftanlagen zu Wohngebäuden definieren. Als Beispiel dienen hier die Anforderungen der Teilfortschreibung Windenergie des Regionalplans Heilbronn Franken 2020 im Zuge der Regionalen Planungsoffensive Erneuerbare Energien (Kist et al., 2023). Auch zu Verkehrswegen wie Bahnschienen, Autobahnen und anderen klassifizierten Straßen sind Sicherheitsabstände einzuhalten.

Dasselbe gilt für Stromtrassen und andere kritische Infrastruktur wie Wasser- und Gasleitungen (Kist et al., 2023).

Neben diesen meist klar in der Landschaft ersichtlichen Bestandteilen moderner Infrastruktur gibt es auch weniger augenfällige Einrichtungen, die im Konflikt mit Errichtung und Betrieb einer Windkraftanlage stehen können. Die Betreiber von Mobilfunknetzen, Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) sowie Rundfunkanstalten nutzen zur Datenübertragung über weite Distanzen oft Punkt-zu-Punkt Richtfunkverbindungen zwischen erhöht montierten Sendeanlagen. Deren Wirkbereich muss vom störenden Einfluss der drehenden Rotoren oder des Turms einer WEA freigehalten werden. Das kann aber in der Praxis meist mit kleinräumigen Verschiebungen eines geplanten Standorts gewährleistet werden (Kist et al., 2023).

Ein potenziell wesentlich größeres Konfliktfeld stellen auf den ersten Blick weitgehend unsichtbare Einrichtungen der zivilen und militärischen Flugsicherung dar. Hier gibt es sowohl konkrete flugbetriebliche Einschränkungen wie die Freihaltung von An- und Abflugschneisen an Flugplätzen und Flughäfen sowie eventueller Platzrunden und Warteschleifen, als auch pauschale Abstandsvorgaben zu Radaren und Navigationshilfen (sog. Funkfeuer). Je nach Einrichtung können diese Schutzbereiche Radien von dutzenden Kilometern für die Windkraftnutzung sperren. Das trifft etwa auf Luftverteidigungsradare des Militärs oder auch auf Radare von staatlichen Wetterdiensten zu. Eines der für Windkraftplanungen gravierendsten Ausschlusskriterien in Deutschland sind Belange der Bundeswehr. Gerade in Süddeutschland sind große Bereiche zu militärischen Übungszwecken für neue Planungen gesperrt oder im Hinblick auf die Höhe der Anlagen mit Restriktionen belegt. Das kann im Einzelfall mit dem Verlauf einer Hubschraubertiefflugstrecke oder der Nähe eines Flugplatzes begründet werden. Dabei gibt es nur äußerst geringe Spielräume für Kompromisse (Kist et al., 2023).

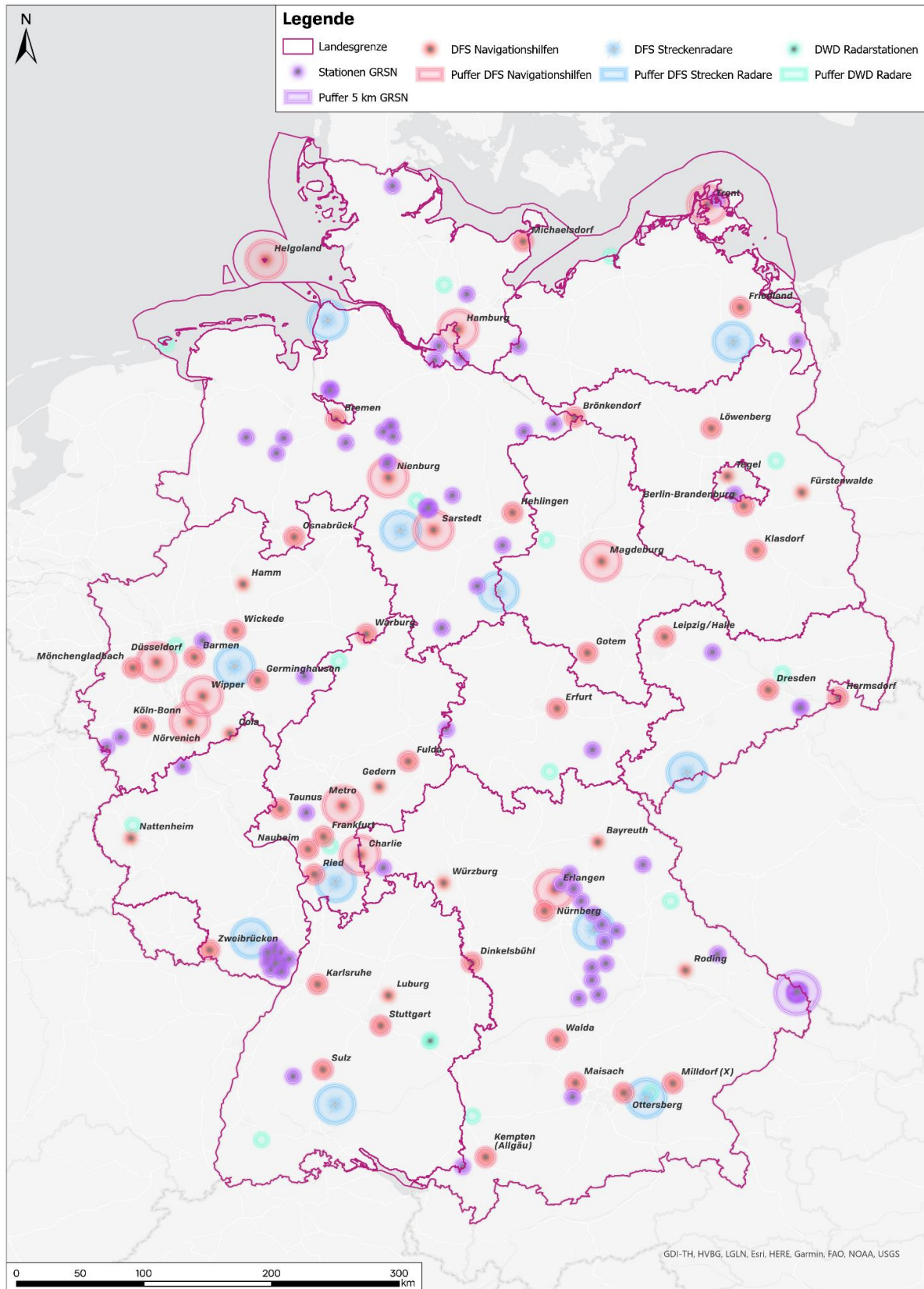


Abbildung 11: Auswahl an anthropogenen Flächenrestriktionen für die Windkraftnutzung in Deutschland. Abgebildet sind Schutzbereiche von Radaren und Funkfeuern der zivilen Flugsicherung und des Deutschen Wetterdienstes sowie Schutzbereiche Geologischer Messstationen des German Regional Seismic Network (eigene Darstellung).

2.3.3 Tendenz zur Anlagenkonzentration als Beitrag zur Kollisionsreduktion

Neben dem Abstand der Anlagen innerhalb eines Windparklayouts hat auch die Konzentration von Anlagen in Windparks Auswirkungen auf das Kollisionsrisiko (Smallwood, Ruge & Morrison, 2009). In Modellrechnungen wurde die positive Wirkung von Standortkonzentration auf die Mortalität einer Rotmilanpopulation im Vergleich zu einer zufälligen Verteilung derselben Anlagenzahl im gleichen Untersuchungsraum nachgewiesen (Schaub, 2012). Während die simulierte Population ohne das Vorhandensein von Windkraftanlagen ein jährliches Wachstum von 5,2 % erreichte, reduzierte sich das Wachstum bei einem einzigen Windpark mit 50 Anlagen auf 4,6 % p.a (Schaub, 2012, S. 115). Das Populationswachstum verlief immer langsamer, je mehr die Anlagenkonzentration abnahm. Die Anlagenverteilung zielte dabei auf dieselbe Energieproduktion gemittelt über alle Standorte. Die Kollisionsrisiken von gruppierten Anlagen wurden kumuliert und so der positive Effekt von zusammengefassten Windparks eher zu niedrig gewertet (Schaub, 2012, S. 117).

Eine Schwäche der Herangehensweise der Arbeit ist die Beschränkung der Betrachtung des Bruterfolgs nur auf weibliche Rotmilane. Dabei würde der Verlust des männlichen Partners während der Nistzeit mit großer Wahrscheinlichkeit zum Scheitern des Brutversuchs führen, da das Weibchen nicht in der Lage wäre, die Nahrungsversorgung alleine zu gewährleisten (Schaub, 2012, S. 117). Um das Kollisionsrisiko zu bewerten, nutzen die Autoren eine Risiko-Distanz-Funktion. Je näher ein Horst an einer Windkraftanlage platziert war, desto höher wurde das Risiko für eine Kollision. Des Weiteren korrelierte Raumnutzungen über weitere Strecken ebenfalls mit einem höheren Kollisionsrisiko, vor allem bei einer aufgelockerten Verteilung der Anlagen im Untersuchungsraum (Schaub, 2012, S. 116).

Die technische Entwicklung von Windkraftanlagen ist unter diesem Gesichtspunkt eher artenschutzkonform, da immer größere und damit leistungsfähigere Anlagen fast nur noch konzentriert auftreten (Tian et al., 2022, S. 762). Das hat unter anderem mit der Einspeisung des erzeugten Stroms zu tun. Je nach vor Ort vorhandener Netzinfrastruktur, sind lokale Mittelspannungsnetze auf der 20 kV oder 33 kV Ebene schlicht nicht mehr in der Lage, die ganze Produktionsmenge einer großen Windkraftanlage bei Volllast aufzunehmen (Kist et al., 2023). Daher muss der Strom auf größere Leitungen in der Verteilnetzebene mit 110 kV

Spannung oder sogar darüber eingespeist werden, um auf diesem Weg auch zu weiter entfernten Verbrauchern zu gelangen. Dazu ist ein eigenes Umspannwerk mit entsprechenden Investitions- und laufenden Kosten nötig. Diese Kosten lassen sich unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten oft nur rechtfertigen, wenn drei Windkraftanlagen, je mehr, desto besser, an einem Netzverknüpfungspunkt angeschlossen werden können. Diese Punkte werden vom Netzbetreiber je nach Kapazität des Stromnetzes zugewiesen und können abhängig nach Entfernung zum Windpark zusätzliche Erschließungskosten verursachen. Der Betreiber ist für die Kabelverlegung bis zu diesem Punkt verantwortlich und abhängig von der Streckenlänge können dafür ebenfalls hohe Kosten anfallen (Kist et al., 2023). Das ist ein guter Grund, in der Praxis mehrere Anlagen in einem Cluster gemeinsam zu erschließen.

Ähnliches lässt sich auch über die Realisierung der übrigen Transport- und Errichtungslogistik sagen. Die Rotoren der aktuell in Planung befindlichen Anlagenmodelle haben je nach Hersteller (bspw. Fa. Enercon oder Fa. Nordex) einen Durchmesser von 160 m bis 175 m. Das bedeutet, dass die Rotorblätter zwischen ca. 78 m und ca. 86 m lang sind. Ein kleiner Teil des Gesamtdurchmessers entfällt immer auf die Nabe, an der die Blätter befestigt werden und die zusammen mit dem Antriebsstrang die mechanische Verbindung zum Generator im Maschinenaus herstellt (siehe Abbildung 6). Eine der größten Schwierigkeiten bei der Errichtung stellt also der Transport der Rotorblätter über das öffentliche Straßennetz bis zur Baustelle dar (siehe Abbildung 12). Bis heute hat kein Hersteller die Produktion eines geteilten Rotorblatts in Angriff genommen. Ein solches Blatt könnte auf der Baustelle zur vollen Länge endmontiert werden. Die physischen Belastungen an den Verbindungsstellen sind im Betrieb auf Dauer wohl zu hoch. Bauliche Änderungen an der Transportroute und eventuell erforderliche Überfahrtsrechte für die Spezialtransporte müssen mit Verkehrsbehörden und privaten Landeigentümern verhandelt werden, sofern sie überhaupt möglich sind (Anderson, 2020).

Auch bei kleineren Anlagen wie der Vestas V136 musste in der Vergangenheit bereits auf kreative Lösungen zurückgegriffen werden, um die Anlagenkomponenten bis zum Windpark transportieren zu können. Bei einem Projekt im Landkreis Sigmaringen wurde beispielsweise eine temporäre Ortsumfahrung mit Aluplatten hergestellt, um eine

ansonsten nicht passierbare Engstelle im Dorf Allmannsweiler zu umfahren (siehe Abbildung 13). Dieser Aufwand verdeutlicht, dass aus der technischen Entwicklung der Erzeugungsanlagen selbst eine Notwendigkeit zur Konzentration der Standorte resultiert. Die Zeit der Windkraftpioniere, die eine einzelne oft kleine Anlagen in der Nähe ihres Wohnorts errichteten und unterhielten ist schon lange vorbei. Für den Rotmilan ist das eine positive Entwicklung, da das Kollisionsrisiko in der Fläche durch die Konzentration der Standorte zumindest nach dem Modell von Schaub (2012) abnehmen sollte.



Abbildung 12: Nächtlicher Transport eines Rotorblatts zum Windpark Bad Saulgau mit drei Anlagen Vestas V136 im Jahr 2019. Durch die Kulisse werden die Dimensionen des Spezialtransports deutlich. Das Blatt hat eine Länge von ca. 66 m. Bei aktuellen Anlagen messen die Blätter an die 86 m (Quelle: eigene Aufnahme).



Abbildung 13: Eine Plattenstraße als temporäre Ortsumgehung im Bau. In der Bildmitte ist ein Bachlauf zu erkennen, der für die Überfahrt zeitweise mit einer Verrohrung eingefasst wurde (Quelle: eigene Aufnahme).

2.3.4 Interaktionsmodi von Greifvögeln mit Windkraftanlagen

In der Forschung zur Interaktion zwischen Vögeln und Windenergieanlagen wird zwischen zwei prinzipiellen Verhaltensmodi unterschieden. Die erste Option ist das großräumige Umfliegen und Meiden einer ganzen Konstellation von WEA. Diese wird als *macro-avoidance* bezeichnet (Marques et al., 2014). Arten die dieses Verhalten zeigen sind durch die Errichtung von neuen Windkraftanlagen einem Habitatverlust durch Verdrängung aus ihrem bisherigen Lebensraum ausgesetzt (Hovick et al., 2014, S. 1686). Die zweite Option sind kleinräumige Ausweichbewegungen und das Durchfliegen von Lücken zwischen WEA. Dieses Verhalten wird dagegen als *micro-avoidance* bezeichnet (Marques et al., 2014).

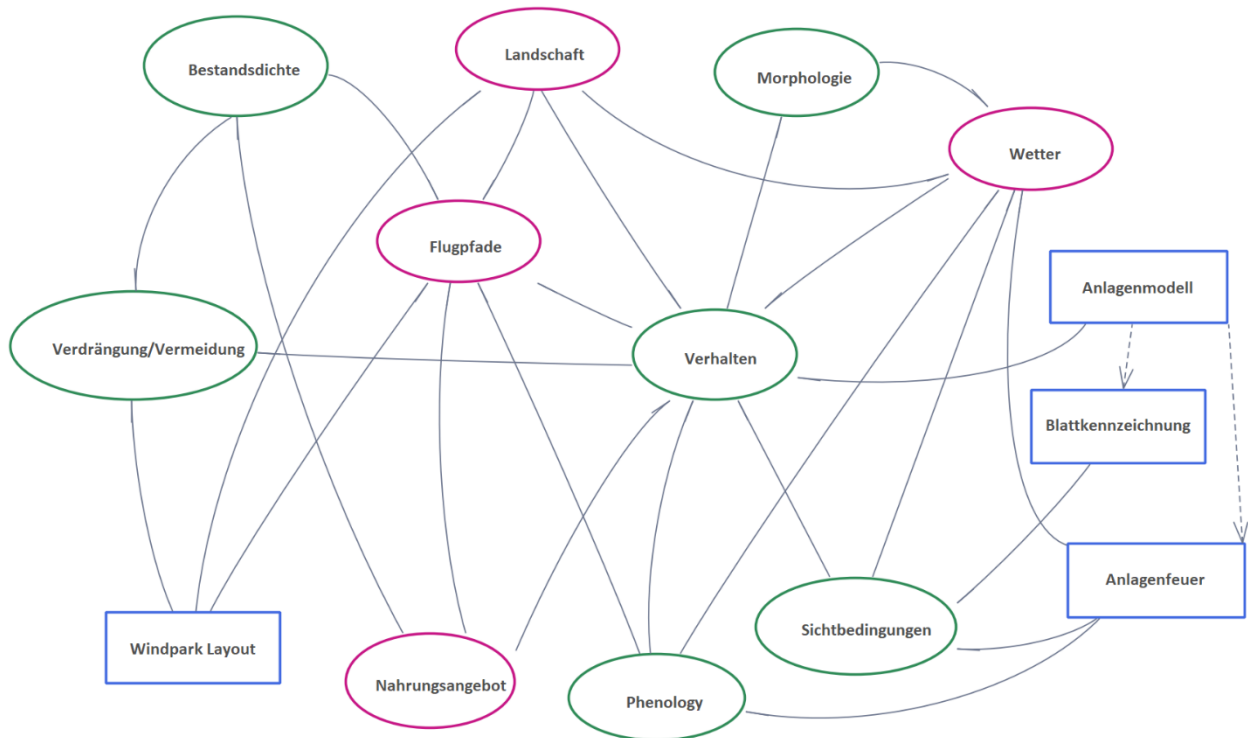


Abbildung 14: Die spezifischen Eigenschaften von Vogelarten (grün), die vorliegende Konfiguration von Windkraftanlagen (blau) und die Standortbedingungen (magenta) bilden ein multifaktorielles Bedingungsgefüge für Kollisionsrisiken an Windkraftanlagen. Entnommen und verändert aus (Marques et al., 2014).

Rotmilane zeigen wie die meisten Greifvögel kein großräumiges Meideverhalten gegenüber Windkraftanlagen. Das konnte unter anderem im Rahmen einer speziell zur Klärung dieser Fragestellung angelegten Telemetriestudie in Hessen belegt werden (Heuck et al., 2019). Einerseits kommt es so nicht zu zusätzlichen Habitatverlusten durch den bereits stattgefundenen und in Zukunft zu erwartenden Windkraftausbau, andererseits steigt durch dieses Verhalten das Potential für Kollisionen. Es ist ebenso einleuchtend, dass Arten die Meideverhalten bei der Wahl der Fortpflanzungsstätten und Nahrungshabitaten gegenüber Windkraftanlagen zeigen, nicht gleichzeitig kollisionsgefährdet sein können (Madders & Whitefield, 2006, S. 2).

Genauere Daten zum Ausweichverhalten von Rotmilanen auf der Mikroebene sind nur vereinzelt vorhanden (Heuck et al., 2019). Auf diesen Umstand wird in der Literatur oft verwiesen und zusätzlicher Forschungsbedarf zu diesem Thema angemeldet (A. Johnston et al., 2014, S. 39). Allerdings gibt es diesbezüglich interessante gesicherte Erkenntnisse zu anderen großen Greifvogelarten, die sich aufgrund des grundsätzlich vergleichbaren

Flugverhaltens der Arten möglicherweise übertragen lassen (Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 878). In Untersuchungen zu Interaktionen zwischen Adlern und Windkraftanlagen in Tasmanien zeigte sich, dass die Tiere einen Sicherheitsabstand zu den Anlagen einhielten, der sich am jeweiligen Rotordurchmesser der einzelnen WEA orientierte. Im Mittel umflogen die Tiere den Gefahrenbereich mit einem Abstand der in etwa dem anderthalbfachen Durchmesser des Rotors entsprach (Hull & Muir, 2013, S. 07). Beim Durchfliegen von Lücken in Windparks wurde von einigen Greifvogelarten außerdem eine Äquidistanz zu den jeweils nächsten Windrädern angestrebt (Hull & Muir, 2013, S. 07).

Das bedeutet im Kontext der Windparkplanung, dass größere Anlagentypen mit weiteren Abständen zwischen den einzelnen WEA das Durchfliegen dieser Lücken vereinfachen und das Manöver damit sicherer für die Tiere machen kann (siehe Abbildung 8, Abbildung 9, Abbildung 10). Die Errichtung von weniger und dafür größeren Anlagen wird in vielen Arbeiten zum Thema als eine wichtige Möglichkeit zur Kollisionsreduktion gesehen (Marques et al., 2014, S. 47; Watson et al., 2018, S. 13).

Auch das Wetter spielt beim Verhalten von Vögeln im Umfeld der Windkraftanlagen eine Rolle. Bei stürmischem Wetter mit starken Winden und eingeschränkter Sicht vergrößern die Tiere ihren Vorsorgeabstand zu den Anlagen. Diese Punkte verdeutlichen, dass Greifvögel im Flug visuelle Eindrücke nutzen, um ihren Weg zwischen und um Windkraftanlagen zu finden und im Normalfall nicht blind für ihre Umgebung sind (Hull & Muir, 2013, S. 09). Dennoch können ungünstige Wetterbedingungen zu erhöhter Gefahr für Kollisionen führen. Das trifft zum Beispiel auf Schwebeflüge bei hohen Windgeschwindigkeiten zu, bei denen es aufgrund von Böen oder Seitenwinden zu unvorhergesehenen plötzlichen Positionsänderungen und damit zu gefährlichen Flugsituationen kommen kann (N. Johnston et al., 2014).

Da, wie bereits für den Rotmilan dargestellt, die Raumnutzung von Greifvögeln nicht randomisiert erfolgt, sondern primär von der Nahrungssuche und sekundär von sozialem Verhalten und Reproduktion bestimmt wird, korrelieren eine intensive Raumnutzung im Umfeld von WEA und höhere Schlagopferzahl nicht unmittelbar miteinander (Smallwood, Ruge & Morrison, 2009). Vielmehr steigern bestimmte Verhaltensweisen von Greifvögeln

das Kollisionsrisiko mit Windkraftanlagen und werden damit in der Literatur als wichtigste Determinanten für Kollisionen noch vor anlagenspezifischen und windparkspezifischen Faktoren beschrieben (Marques et al., 2014, S. 43). Dazu zählen im Einzelnen soziale Verhaltensweisen wie Balzflüge und revieranzeigendes Verhalten ebenso wie Flüge zur Nahrungssuche (Smallwood, Ruge & Morrison, 2009). Dabei können Situationen auftreten, in denen die Tiere durch die Fokussierung auf andere Vögel oder Beutetiere am Boden und in der Luft abgelenkt sind und daher leichter Fehleinschätzungen bezüglich der eigenen Flugsituation in Relation zu Windkraftanlagen unterliegen können (Hull & Muir, 2013; Smallwood, Ruge & Morrison, 2009). Besonders wichtig für die Flugwege, die auf der Nahrungssuche zurückgelegt werden, ist das Nahrungsangebot im Umfeld der Fortpflanzungsstätte. Brutpaare mit reichem Angebot im Umfeld des Bruthorstes legen kürzere Wege zurück, als solche mit weniger Nahrungsangebot im Nahbereich (Pfeiffer & Meyburg, 2015). Bei der Raumnutzung spielt auch die Orientierung an Straßen, Gewässern, Waldrändern und anderen markanten Geländeformen eine wichtige Rolle und diese sollten bei der Planung von Windkraftanlagen berücksichtigt werden (Marques et al., 2014, S. 45). Besonders von großen Greifvögeln für Thermikflüge genutzte sonnenexponierte Hänge sollten bei der Planung als mögliche Konfliktzonen erkannt werden, da hier höhere Flughöhen bis in den Gefahrenbereich einer modernen Windkraftanlage hinein zu erwarten sind (Pfeiffer & Meyburg, 2022).

In Untersuchungen zum Verhalten von Zugvögeln konnte gezeigt werden, dass Raubvögel ihre Flugrouten bei ihrem saisonalen Zug an neu errichteten Windkraftanlagen anpassen und daher nicht angenommen werden kann, dass der Zubau von Anlagen in jedem Fall zu mehr Schlagopfern bei der saisonalen Migration beispielsweise von Rotmilanen führt (Cabrera-Cruz & Villegas-Patraca, 2016; Martín et al., 2018). Dagegen könnten durch die Nutzung von Ausweichrouten andere negative Effekte wie ein höherer Energieverbrauch bei der Wanderung eintreten (Cabrera-Cruz & Villegas-Patraca, 2016, S. 1674).

In der Zusammenschau aller in diesem Kapitel dargestellten Sachverhalte ergibt sich ein facettenreiches Bild zum Themenkomplex Windkraft und Avifauna (siehe erneut Abbildung 14). Viele Faktoren müssen bei einer wissenschaftlichen Betrachtung des Themas berücksichtigt werden. Angefangen hat der Abschnitt bei anlagenspezifischen Merkmalen

wie Tages- und Nachtkennzeichnung oder der Dimensionierung und Bauweise von Turm und Rotor. Weiterhin wurden natürliche und anthropogene Standortfaktoren bei der Planung von Windkraftprojekten beschrieben, um die Determinanten für die Verteilung von Windkraftanlagen in einem Planungsraum deutlich zu machen. Als in der Hauptsache maßgeblicher Faktor bei Kollisionen wurde allerdings das Verhalten der Vögel selbst identifiziert. Es erscheint daher als besonders wichtig, wertvolle Nahrungshabitate von der Windkraftnutzung eher auszunehmen, um den Raumkonflikt zu vermeiden oder auf technische Lösungen wie automatische Detektionssysteme zur Anlagenabschaltung zurückzugreifen. Es besteht weiter Forschungsbedarf zum Ausweichverhalten von Greifvögeln an Windkraftanlagen, um bestehende Erkenntnisse zu bestätigen (Heuck et al., 2019; A. Johnston et al., 2014, S. 39).

3. Verwendete Daten

3.1 Datenerhebung Telemetriestudie Rotmilan

Neben den visuell erfassten Flugpfaden aus Raumnutzungsanalysen mehrerer Jahre, die im nächsten Abschnitt betrachtet werden sollen, sind die Ergebnisse der Telemetriestudie von Pfeiffer & Meyburg (2022) die zweite wichtige Datenquelle dieser Arbeit. Dieser Abschnitt soll einen kurzen Einblick in deren Methodik und Ergebnisse liefern, um einen der beiden Grundsteine für die probabilistische Zuordnung der Flughöhen nachvollziehbar zu machen.

Für die Erfassung der Flughöhen wurden 29 Rotmilane, davon 19 männlich und 10 weiblich, mit einer Kombination aus GPS-Logger, einer durch Solarzellen gespeisten Batterie und einem Drei-Achsen-Beschleunigungssensor (ACC) ausgestattet.

Der Untersuchungszeitraum erstreckte sich über die Jahre 2012 bis 2018. Dabei wurde Telemetrietechnik mit einem Gesamtgewicht von maximal 25 Gramm der e-obs GmbH aus Grünwald, Deutschland verwendet. Die Flugbewegungen der Rotmilane wurden in ihrem Brutgebiet auf einer Fläche von ca. 1.000 km² in der Nähe von Weimar, Thüringen aufgezeichnet (Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 868).

Zentral bei der Datenerhebung war der Energieverbrauch der verwendeten Instrumente. Der Energiebedarf eines Datenloggers steigt bei höherer Punktdichte. Je höher der

Ladestand des Akkus ist, desto mehr Datenpunkte können an einem Tag aufgezeichnet werden. Da der Akku nur über die Solarzelle aufgeladen werden kann, verringert sich bei bedecktem Wetter der Ladestand des Akkus immer weiter und die Dichte der aufgezeichneten Datenpunkte nimmt ab. Je nach erreichtem Ladestand kann die Sendeaktivität so weit sinken, dass nur noch alle paar Tage ein Datenpunkt aufgezeichnet wird, oder die Aufzeichnung sogar völlig zum Erliegen kommt (Pfeiffer & Meyburg, 2022). Diese technische Limitierung war vor allem bei den weiblichen Individuen problematisch, da sie während der Brut und der Aufzucht längere Zeit im oder zumindest direkt am Horst verbrachten. Meist sind diese Orte beschattet, zumal die Brutzeit ausschließlich während der mitteleuropäischen Vegetationsperiode stattfindet, in der Bäume üblicherweise belaubt sind. Das hat negative Auswirkungen auf die Exposition der Solarzellen gegenüber direktem Sonnenlicht und verschlechtert damit die Erfassungsdichte für die betreffenden Individuen in diesen Zeiträumen (Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 872). In der vorliegenden Telemetriestudie wurden die GPS-Logger so programmiert, dass bei einem niedrigen Ladestand nur alle 20 Minuten eine Positionsbestimmung erfolgte. Bei mittlerem Ladestand wurde dann alle fünf Minuten und bei hohem Ladestand sogar jede Sekunde eine Messung durchgeführt (Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 868).

Die Messungen des parallel verwendeten Drei-Achsen-Beschleunigungssensors verursachten nur einen geringen Energieverbrauch und wurden deutlich häufiger (min. 78 Werte in einem Zeitraum von fünf Minuten) abgerufen, auch wenn die Positionsbestimmung per GPS aufgrund eines geringen Ladestands der Batterie reduziert oder eingestellt wurde. Diese Werte dienten unter anderem als Plausibilitätsprüfung für die GPS-Messungen, aber auch um Beginn und Ende der täglichen Aktivitätsperiode der Vögel zu bestimmen. Durch die Auswertung der Achsenwerte war es weiterhin möglich, vertikale Körperhaltungen der Vögel eindeutig von eher horizontalen Stellungen im Schwebeflug zu differenzieren und im Hinblick auf die Flughöhe irreführende GPS-Positionen auszufiltern (Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 869).

Eine methodische Schwierigkeit der Telemetriestudie bestand in der möglichst genauen Bestimmung der tatsächlichen Aktivitätsphase der besenderten Individuen. Das war nötig, um Positionsmessungen von schlafenden Tieren aus der Auswertung ausschließen zu

können. Auch kleinste Bewegungen bei Nacht, die etwa durch Störungen der nächtlichen Ruhezeit der Tiere im Horstbaum bzw. gewählten Schlafplatz auftreten können, sollten ausgefiltert werden. Das war nötig, um die Verteilung der Flughöhen nicht durch überproportional viele bodennahe Werte zu verzerren. Dazu wurde von den Autoren der Studie die Annahme getroffen, dass die erste Flugbewegung des Tages, welche den Vogel mehr als 200 m vom Horstbaum oder Schlafplatz wegführte, den Start der Aktivitätsperiode des Tages bildete. Als das Ende der Aktivitätsphase wurde das Aufsuchen eines Platzes, der nicht weiter als 200 m vom Schlafplatz der letzten Nacht entfernt war, angenommen. Außerdem sollte zu diesem Zeitpunkt der Sonnenuntergang noch maximal zwei Stunden entfernt sein. Um die Genauigkeit dieser Abgrenzung zu gewährleisten, wurden nur Tage in die Auswertung einbezogen, bei denen für Beginn und Ende der Aktivitätsphase GPS-Positionierungen mindestens im fünf Minuten Intervall vorlagen. In die Bestimmung der Aktivitätsperioden flossen nach diesen Kriterien 11.473.174 GPS-Positionen ein (Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 869).

Ein weiterer wichtiger Verarbeitungsschritt war die Korrektur der WGS84 Ellipsoidhöhen aus der GPS-Erfassung zu akkuraten Meereshöhen im konkreten Untersuchungsraum. Flughöhen und Geländeoberflächen werden normalerweise in Bezug auf eine von zwei Näherungen der Erdoberfläche angegeben. Die erste Möglichkeit ist die Nutzung eines mathematischen Modells, das als Ellipsoid bezeichnet wird und sich der dreidimensionalen Form der Erde auf globalem Maßstab annähert. GPS-Höhen werden in diesem System erfasst. Die zweite Möglichkeit ist die Nutzung des mittleren Meeresspiegels, der vom lokalen Gravitationsfeld der Erde abhängt, als Bezugshöhe für einen definierten Ausschnitt der Erdoberfläche. Höhen in lokalen Geländemodellen beziehen sich auf Meereshöhen (Poessel et al., 2018, S. 2068).

Die Differenz zwischen Ellipsoidhöhen und Meereshöhen kann je nach geographischer Breite beträchtlich sein (Fotopoulos et al., 2003). Ein solcher Unterschied ist relevant, um das Kollisionsrisiko für fliegende Vögel an WEA zu bewerten, da hier der Betrachtungsmaßstab etwa im Bereich zwischen 0 m und 250 m über Grund liegt. Bei der Verarbeitung von Daten aus verschiedenen Quellen mit unterschiedlichen Höhenbezugssystemen ist es wichtig, die Daten entsprechend zu integrieren. Um genaue

Flughöhen über Grund zu berechnen, müssen in Bezug auf ein Ellipsoid gesammelte Höhenmessungen zunächst in Meereshöhen umgewandelt werden. Erst danach kann die Geländehöhe aus einem DGM von der Meereshöhe abgezogen werden, um zutreffende Flughöhen über Grund zu erhalten. Einige Hersteller von Telemetrietechnik führen diese Umwandlung bereits bei der Erfassung für den Benutzer durch. In anderen Fällen muss der Benutzer diesen Verarbeitungsschritt selbst vornehmen (Poessel et al., 2018, S. 2068).

Nach dieser wichtigen Maßnahme zur Datenintegration wurden Ausreißer in den erfassten Flughöhen sowie negative Werte aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Danach verblieben noch 319.739 Höhenwerte als valide Datenpunkte für die weitere Betrachtung (Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 870). Die beobachtete Höhenverteilung deckt sich mit den Erkenntnissen einer weiteren ähnlich angelegten Studie aus Hessen, die allerdings eine geringere Stichprobe aufweist (Heuck et al., 2019; Pfeiffer & Meyburg, 2022, S. 878).

Wie bereits in der Einführung zu dieser Arbeit dargestellt, findet die überwiegende Mehrzahl von Flugbewegungen des Rotmilans während des Aufenthalts im Brutgebiet in einem Höhenbereich bis 80 m ü.G. statt. Nach Pfeiffer und Meyburg (2022) liegen 69,5 % der Flugbewegungen von männlichen Rotmilanen in diesem Bereich. Bei weiblichen Exemplaren sind es sogar 85,0 %. Zu weiteren konkreten Erkenntnissen aus der Telemetriestudie und zum artspezifischen Flugverhalten des Rotmilans sowie dem Einfluss von meteorologischen Bedingungen sei an dieser Stelle auf Kapitel 2.2.5 verwiesen.

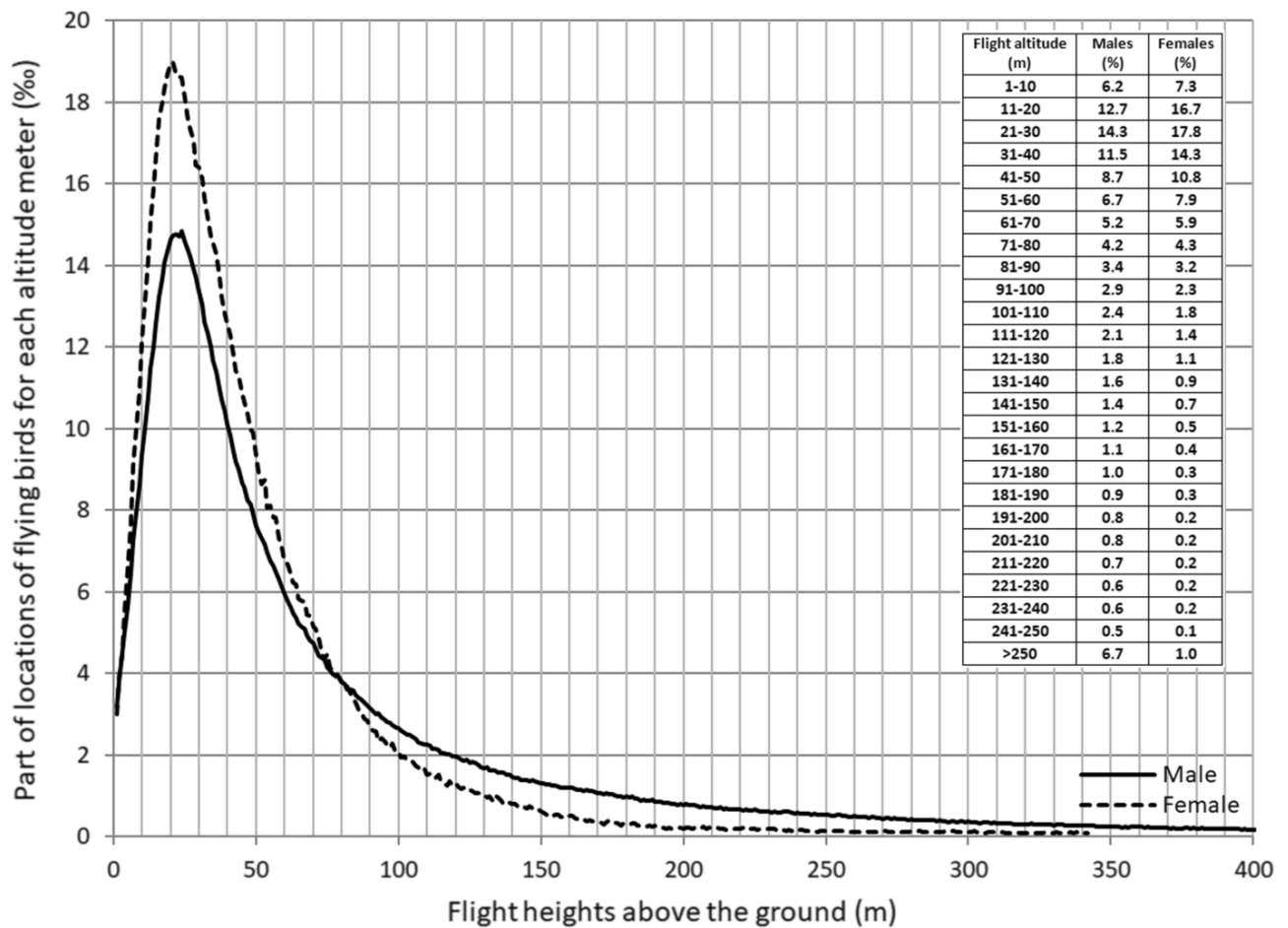


Abbildung 15: Gemessene Flughöhen von männlichen und weiblichen Rotmilanen. Aufgrund der Arbeitsteilung bei der Aufzucht von Jungen unternehmen weibliche Rotmilane in der Brutperiode im Schnitt weniger großräumige Flüge durch das Revier. Hohe Thermikflüge werden von Rotmilanen meist genutzt, um weite Strecken zu überwinden. Daher unterscheiden sich die Höhenverteilungen im Flugverhalten der beiden Geschlechter. Entnommen aus (Pfeiffer & Meyburg, 2022), S. 875.

3.2 Datenerhebung Raumnutzungsanalysen

3.2.1 Untersuchungsgebiet und Aufzeichnungsmethoden

In diesem Abschnitt soll die Datengewinnung der Flugpfade aus den Raumnutzungsanalysen erläutert werden. Nach dem aktuellen Vorgehen für avifaunistische Untersuchungen im Vorfeld eines Genehmigungsverfahrens für Windkraftanlagen werden Gutachterbüros von einem Projektierer damit beauftragt, Flugbewegungen von Greifvögeln und anderen windkraftempfindlichen Arten an den geplanten Standorten für WEA aufzuzeichnen. An diesen Vorgaben orientierten sich auch die Erfassungen der Flugbewegungen, die in dieser Arbeit verwendet werden (LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, 2021). Es werden aber auch Flugbewegungen anderer Arten und ggf.

Interaktionen zwischen diesen aufgezeichnet.

Die Daten der Flugpfade für den praktischen Teil dieser Arbeit stammen konkret aus einem Projektgebiet für Windkraft im Südwesten Deutschlands. Das Gebiet liegt in der Gemeinde Gerstetten im Landkreis Heidenheim (siehe Abbildung 16). Es handelt sich um ein Areal in dem verschiedene Anlagentypen mit unterschiedlichen Errichtungsjahren nebeneinander betrieben werden. Anlass für die erste Raumnutzungsanalyse war die geplante Errichtung von vier WEA Nordex N117 mit 140 m NH deren Bau und Inbetriebnahme dann im Jahr 2017 erfolgte. Bei den Bestandsanlagen in unmittelbarer Nähe handelt es sich um vier Vestas V47 mit 76 m NH mit IBN im Jahr 2001 und fünf Repower MD 77 mit 85 m NH, drei davon mit IBN im Jahr 2002 und zwei mit IBN im Jahr 2003 (siehe auch Abbildung 17).

Dort wurden Flugbewegungen von Rotmilanen und anderen Greifvögeln in einem Radius von 1.000 m um die vier WEA simultan von zwei Beobachtungspunkten über die Brutperioden von insgesamt vier Jahren erfasst. Erstmals fand die Erfassung im Jahr 2013 im Rahmen einer herkömmlichen RNA im Vorfeld der Errichtung der vier Nordex N117 statt. Nachfolgend wurden aufgrund einer Genehmigungsaufgabe des Landratsamtes Heidenheim in den Jahren 2018 bis 2020 Flugbewegungen als Monitoring der Auswirkungen der gegen Ende des Jahres 2017 neu errichteten Anlagen auf die lokale Avifauna erfasst. Dieses Vorgehen wird auch in der Literatur empfohlen, um die Validität von EIA zu erhöhen und falls nötig Maßnahmen zur Kollisionsreduktion ergreifen zu können (Ferrer et al., 2012; Bose et al., 2020). Die für das Jahr 2018 erhobenen Daten wurden aufgrund von noch laufenden Bauaktivitäten, die in Verbindung mit der Errichtung der WEA standen, von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Die Erdbewegungen an den Bauflächen zogen ähnlich wie landwirtschaftliche Bodenbearbeitung eine große Zahl von Vögeln an (Stauss, 2021). An dieser Stelle sei auf die Erkenntnisse zum Jagdverhalten des Rotmilans aus der Literatur in Kapitel 2.2.4 verweisen.

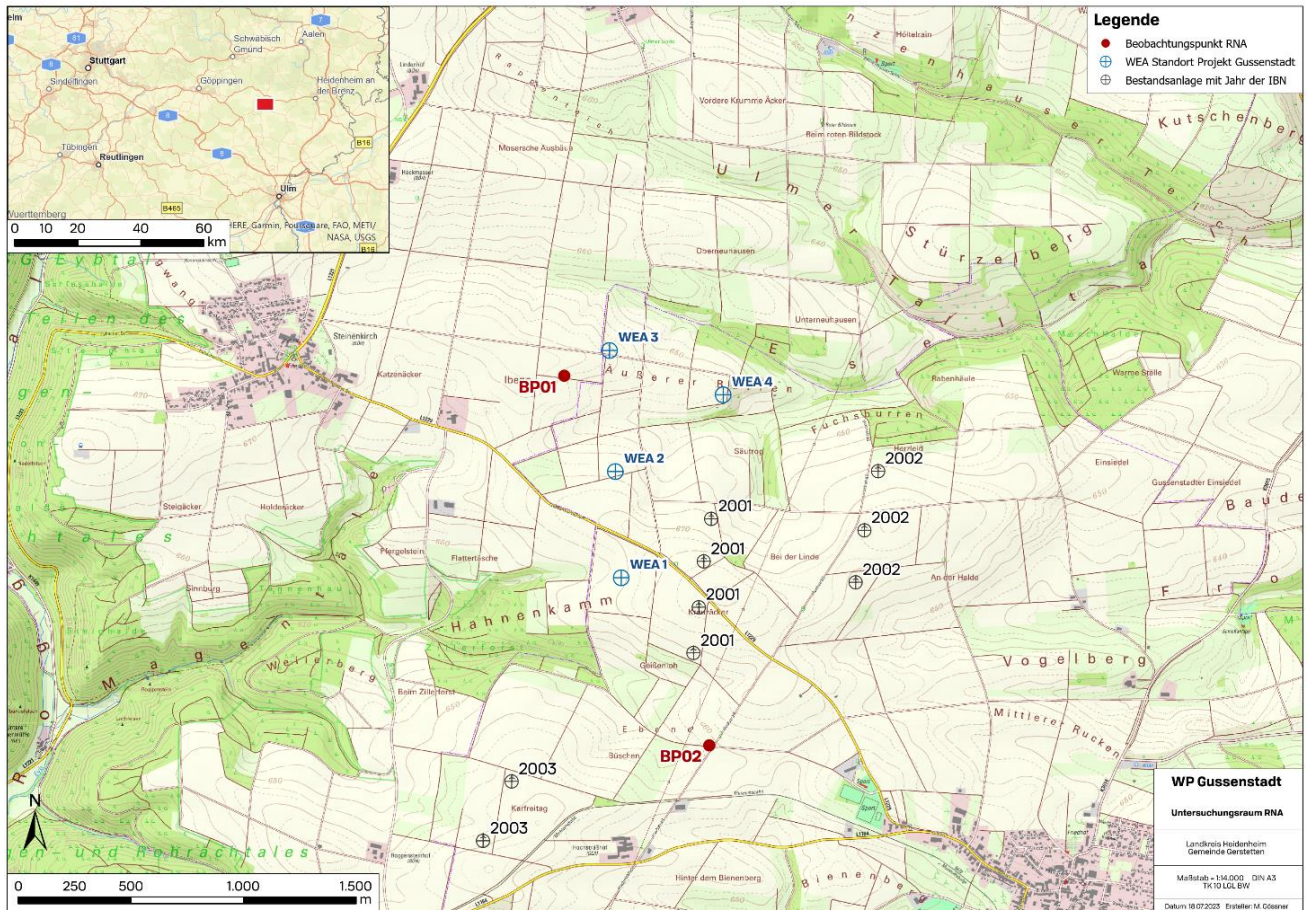


Abbildung 16: Karte des Untersuchungsgebiets für die Erfassung der Flugbewegungen. Links oben in der Nebenkarte ist die Lage im regionalen Kontext zu sehen. In der Hauptkarte sind die vier WEA Nordex N117 mit 140 m NH und IBN im Jahr 2017 eingetragen. Bei den Bestandsanlagen handelt es sich um vier Vestas V47 mit 76 m NH mit IBN 2001 und fünf Repower MD 77 mit 85 m NH drei davon mit IBN 2002 und zwei mit IBN im Jahr 2003. Außerdem sind die Positionen der beiden Beobachtungspunkte vermerkt. Durch das Gebiet verläuft auch eine Hochspannungsleitung, zu erkennen leicht westlich von BP02 mit Verlauf in Richtung Nord-Nord-Ost (eigene Darstellung).



Abbildung 17: Bildlicher Eindruck des Untersuchungsgebiets. Die Aufnahme wurde am Fuß von WEA 3 mit Blickrichtung Süden angefertigt. In der Bildmitte sind fast deckungsgleich hintereinander die beiden Anlagen Nordex N117 mit IBN 2017, WEA 2 und WEA 1 zu sehen. Am linken Bildrand stehen die vier Anlagen Vestas V47 mit IBN 2001. In der rechten Bildmitte sind zwei der fünf Repower MD77 mit IBN 2003 zu sehen. Am unteren rechten Bildrand ist der Feldweg zu erkennen auf dem sich der Beobachtungspunkt BPO1 befand. BPO2 lag hinter der südlichsten der vier Anlagen am linken Rand (eigene Aufnahme).

Es wurden für die drei betrachteten Jahre Flugbewegungen von März bis August an jeweils 18 Terminen aufgezeichnet. Dabei wurde die Raumnutzung von Greifvögeln für 108 Zeitstunden pro Jahr erfasst. Aufgrund der Simultanbeobachtung von zwei Beobachtungspunkten aus, wurden entsprechend 216 Personalstunden im Feld aufgewendet. Dazu kam noch die Digitalisierung der Flugpfade und die Auswertung der Ergebnisse im Büro. Die Aufnahme der Daten erfolgte dabei visuell mit Hilfe von Ferngläsern und händischen Eintragungen in einer gedruckten Kartengrundlage. Für jeden Beobachtungstermin wurde ein neuer blanker Kartenhintergrund verwendet. Bei intensiver Raumnutzung im Beobachtungsbereich konnten auch mehrere Einzelkarten für einen Termin nötig sein. Auf diesen Tageskarten wurden die einzelnen Flugbewegungen zur besseren Unterscheidbarkeit farblich abgestuft eingezeichnet (siehe Abbildung 18). Dabei

wurden teilweise Beobachtungen zum Verhalten der Vögel und Interaktionen mit den WEA in Form von Bemerkungen in einem Tagesprotokoll notiert (siehe Abbildung 19). Als Attribute wurden Erfassungszeiten, Bearbeiter, Beobachtungspunkte, beobachtete Art, charakteristische Verhaltensweisen und ggf. sonstige Beobachtungen erfasst. Teilweise wurden auch Angaben zur geschätzten Flughöhe hinzugefügt. Diese Angabe ist allerdings aufgrund des menschlichen Faktors nicht flächendeckend für alle Erfassungszeiträume vorhanden. Dabei wurde auch eine eher grobe Kategorisierung in beispielsweise 20 m oder 50 m breite Klassen vorgenommen. Nach Abschluss der Erfassungen wurden alle Tageskarten eingescannt und mit Hilfe von fixen Referenzpunkten automatisch georeferenziert. Dazu wurde das Werkzeug *Warp From File* in ArcGIS Pro verwendet. Durch minimalen Versatz oder leichte Verkantung der Einzelseiten beim Einzug in den Scanner kam es im Ergebnis bei einigen Karten bereits zu einer Lageungenaugigkeit von bis zu 20 m in der Realität. Dieser Versatz ist im Kontext der Methode der rein optischen Datengewinnung als gering zu bewerten und wurde auch in Anbetracht der beträchtlichen Anzahl an Tageskarten nicht händisch korrigiert. Die eingezeichneten Flugbewegungen wurden anschließend händisch als zweidimensionale Liniengeometrien ohne Höhen digitalisiert und synoptisch im GIS dargestellt. Dabei wurden aus den Tageskarten entnommenen Zusatzinformationen als Attribute zu den einzelnen Flugbewegungen hinzugefügt. Damit lagen die Daten der Flugbewegungen aus den Raumnutzungsanalysen in Form von Vektordaten im Format .shp vor (siehe Abbildung 23, Abbildung 24, Abbildung 25).

Bei der Datenerfassung bestand das hohe Risiko, dass die Raumnutzung konzentrisch um die Standpunkte herum überschätzt wird. Diese Problem wird in der Literatur zur Durchführung von EIA beschrieben (Jenkins et al., 2018; A. Johnston et al., 2014). Es ist ebenso einleuchtend, dass die Genauigkeit der Verortung von Flugbewegungen mit steigender Entfernung zum Beobachter abnehmen wird. Hier ist es für den Beobachter wichtig, vor Beginn der Erfassung Entfernungen zu im Gelände vorhandenen Orientierungspunkten zu ermitteln und dann bei der Verortung von Flugbewegungen als Referenz zu verwenden. Auch die Aufzeichnungsmethode bei der Datenerhebung wirft Fragen zur allgemeinen räumlichen Genauigkeit auf. Die Aufzeichnung der Flugbewegungen fand mit Hilfe von handelsüblichen Stiften in einer auf DIN A3 gedruckten Karte im Maßstab 1:18.000 statt. Daher bildet der Verlauf eines gemalten Stiftstrichs mit ca.

1 mm Breite in der Realität bereits selbst einen Korridor von 18 Metern Breite. Der Zuschnitt des Untersuchungsraums könnte ebenfalls Einfluss auf die Aufzeichnung der Flugbewegungen innerhalb der physischen Kartengrundlage haben. Beobachter können dazu neigen räumlich identische Flugbewegungen auf der Kartengrundlage mit einem gewissen Versatz aufzuzeichnen, um die Lesbarkeit zu erhalten. Zwar konnten in diesem konkreten Anwendungsfall die vorhandenen Windkraftanlagen selbst als optische Referenzobjekte dienen, Flugbewegungen vor dem relativ weit entfernten Horizont sind dagegen wesentlich schwerer in Ebene und Höhe zu fixieren (siehe Abbildung 17). All diese dargestellten methodischen Schwächen in der Datenerhebung lassen sich nur schwer quantitativ bewerten und daher auch nicht systematisch ausgleichen. Einige dieser Schwachpunkte von herkömmlichen RNA (bzw. EIA) werden auch in der Literatur vielfach beschrieben (Ferrer et al., 2012, S. 44; Jenkins et al., 2018).

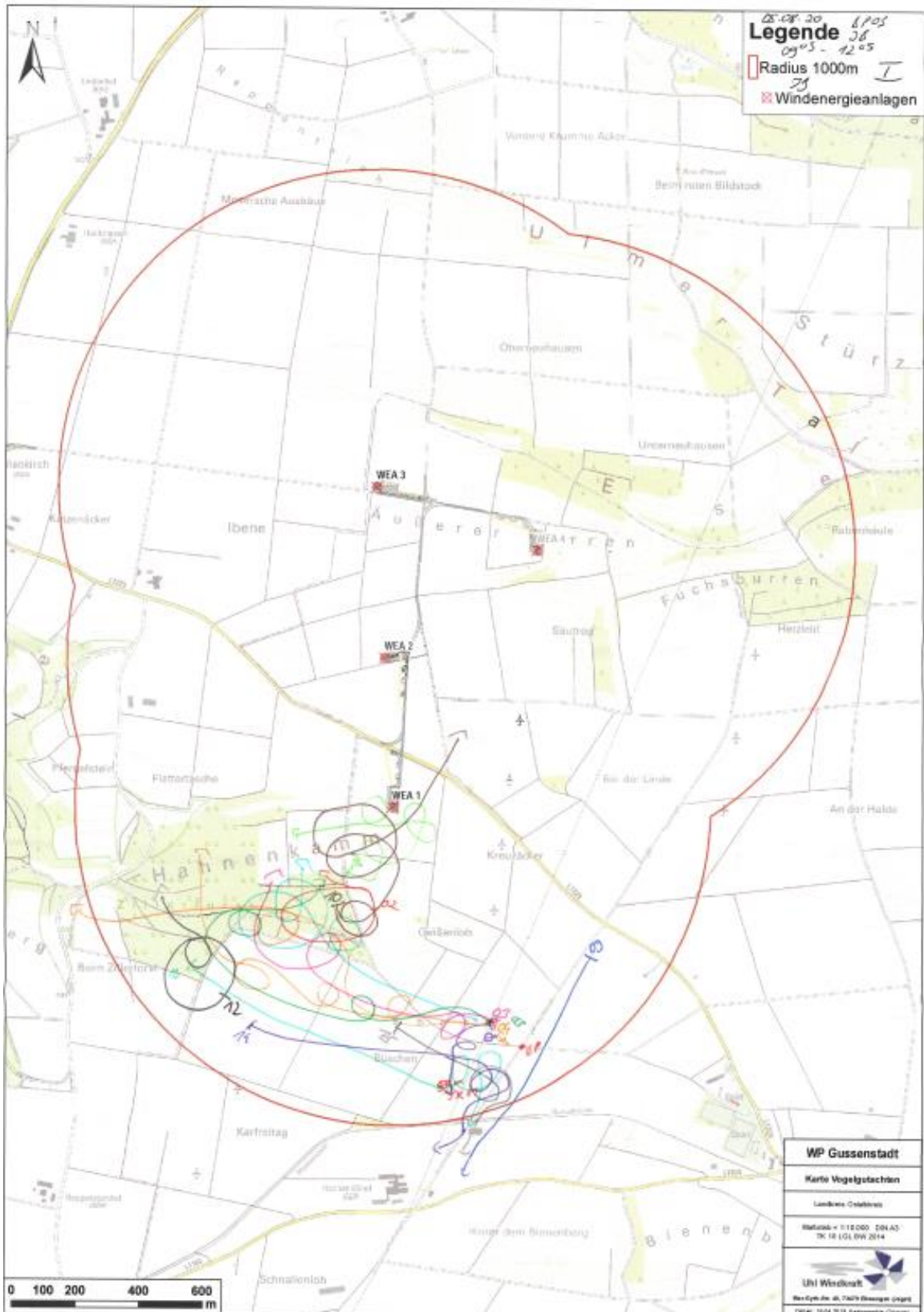


Abbildung 18: Beispiel der Datenaufzeichnung im Feld. Hier die eingescannte Tageskarte 1 des Termins vom 05.08.2020. Die Raumnutzung konzentrierte sich an diesem Morgen auf den Bereich südlich der WEA 1. Dort wurde ein durch Rotmilane besetztes Revierzentrum vermutet (Stauss, 2021).

I

Datum:	05.08.20	Beobachter:	JB				
Uhrzeit:	von: 9 ⁰⁵ bis: 12 ⁰⁵	BP:	BPO5				
Wetter							
Temperatur:	20,7°C (9 ⁰⁵), 27,6°C (12 ⁰⁵)						
Bewölkung [%]:	0/8						
Wind [Bft]:	1-2 (3)						
Windrichtung:							
Flughöhe:	1 = 0 - 10 m; 2 > 10 - 50 m; 3 > 50 - 100 m; 4 > 100 m						
Nf: Nahrungssuchflug; Df: Durch-/Transferflug; Tk: Thermikkreisen; L: Landen; Js: Jagdsturz; So: Sonstiges							
Nr	Art	Zeit		Verhalten	Flug- höhe	Flugwinkel (°)	Bemerkung
		Anfang	Ende				
01	Rm	9 ⁰⁵					2km über auf Strommast
02	Rm	9 ⁰⁵	9 ⁰⁷	Th, NF	1,2		} gemeinsam von Strom- mast ab- geflogen
03	Rm	9 ⁰⁵	9 ⁰⁸	NF	1,2		
04	Rm	09 ⁰⁵	9 ⁰¹	NF	1,2		
05	Rm	09 ⁰⁵	9 ⁰⁶	NF	1,2	fliegt auf Strommast mit 2km	
06	Rm	09 ⁰⁵	9 ⁰¹	NF	1,2		
07	Rm	09 ⁰⁵	09 ⁰⁸	NF	1,2		
08	Rm	09 ⁰⁵	09 ⁰⁸	NF	1,2		
09	Wf	09 ⁰⁹	09 ⁰³	Df	?		
10	Rm	9 ¹²	9 ²⁵	NF	1,2		
11	Rm	9 ¹²	9 ¹²	NF	1		
12	Sum	9 ¹²	9 ¹²	Th	1,2		
13	Rm	9 ²⁵	9 ²⁵	NF	1		
14	Rm	9 ²⁵	9 ²⁸	NF	1		
15	Rm	9 ²⁸	9 ²⁸	NF	1		

Abbildung 19: Beispiel der Datenaufzeichnung im Feld. Hier das Protokoll 1 zur Tageskarte 1 des Termins vom 05.08.2020. In diesem Fall sind Beobachtung zum gezeigten Verhalten, den Wetterbedingungen und eine grobe Einschätzung der Flughöhe notiert worden. Auch Flugbewegungen von anderen Greifvögeln wie Schwarzmilanen (Nr. 12) oder Wanderfalken (Nr. 09) wurden in diesem Zeitausschnitt beobachtet (Stauss, 2021). In die weitere Verarbeitung flossen jedoch nur Flugbewegungen von Rotmilanen ein.

3.2.2 Raumnutzung im Untersuchungsgebiet

Ein wesentliches Produkt aus der Datenerfassung im Gelände ist die synoptische Darstellung aller erfassten Flugbewegungen einer Brutperiode in Karten. Dabei werden Aktivitätsschwerpunkte und weniger attraktive Räume sichtbar. Bei der Betrachtung der drei vorliegenden Ergebniskarten fällt die teilweise drastische Zunahme der Flugbewegungen im Untersuchungsgebiet über die untersuchten Jahre auf (siehe Tabelle 1). Worauf diese zurückzuführen ist, lässt sich nicht im Detail klären, ohne ein solides Verständnis der überregionalen Population, von Zu- und Abwanderungen und dem Brutverhalten der ansässigen Paare erlangt zu haben (Watson et al., 2018, S. 13). Es finden sich vereinzelt Hinweise darauf, dass die Brutperiode des Jahres 2013 aufgrund von langen

und häufigen Niederschlägen besonders ungünstig für den Bruterfolg von Greifvögeln war und daher in gewissem Umfang als außergewöhnlich angesehen werden kann (Stauss, 2021).

Die Betrachtung von aus den Flugbewegungen abgeleiteten statistischen Kennzahlen ergibt einige wesentliche Unterschiede zwischen den Erfassungsjahren (siehe Abbildung 20, Abbildung 21, Abbildung 22). Sowohl die Anzahl an distinkten Flugbewegungen als auch deren Länge variieren zum Teil beträchtlich (siehe erneut Tabelle 1). Es ist insgesamt eine starke Zunahme der Raumnutzung im Untersuchungsgebiet durch den Rotmilan zu beobachten. Es lässt sich also mit Sicherheit sagen, dass der Zubau von vier zusätzlichen Windkraftanlagen nicht zu einer Abnahme der Raumnutzung geführt hat. Das entspricht dem bekannten Interaktionsmodus von Greifvögeln mit WEA. Es tritt also keine *macro avoidance* der Vögel auf, die auf ein Aufgeben des Brutgebiets hinauslaufen würde. Aufgrund der beobachteten Zunahme von Flugbewegungen zwischen den Jahren 2019 und 2020 kann auch schwerlich argumentiert werden, dass die Anlagen einen negativen Einfluss auf die Entwicklung der lokalen Population hatten. Wobei auch andere Faktoren, wie soziales Verhalten während der Balz und bei Revierkämpfen oder das Nahrungsangebot wesentlichen Einfluss auf das Flugverhalten haben (siehe Kapitel 2.2.5).

Trotz der bereits beschriebenen Unsicherheiten um Hinblick auf die Lagegenauigkeit der erfassten Flugpfade, lassen sich deutliche Bewegungsmuster in den Karten erkennen, die vor dem Hintergrund der Landnutzungen im Untersuchungsraum interpretiert werden können. Bei der Betrachtung der Ergebniskarte des Erfassungsjahres 2020 finden sich deutliche Hinweise auf *micro avoidance* im Umfeld der WEA 2 bis WEA 4 (siehe Abbildung 25). Der Rotorbereich der WEA 1 wird dagegen aufgrund der in diesem Bereich besonders intensiven Raumnutzung nicht erkennbar gemieden. Dieses Muster bildet sich in gewisser Weise auch in der Ergebniskarte für das Erfassungsjahr 2019 ab, wobei die Raumnutzung um die nördlichen drei WEA generell geringer ausfällt und die Umfliegung der Rotorbereiche in der Draufsicht hier weniger augenfällig wird (siehe Abbildung 24). Für die Jahre 2019 und 2020 ist jedoch deutlich ein Bereich mit verdichteten Flugbewegungen zwischen den drei nördlichen Anlagen (WEA 2, 3 und 4) festzustellen. Vor allem die kleineren Anlagen Vestas V47 mit IBN im Jahr 2001 nördlich und südlich der Landstraße

werden dagegen nicht erkennbar gemieden, wobei sie aufgrund der niedrigeren Nabhöhe von 76 m und ihrem Rotorradius von 47 m im Höhenbereich bis 99,5 m ü.G. potenziell ein höheres Kollisionsrisiko für den Rotmilan darstellen. In allen drei Erfassungsjahren werden die Aktivitätsschwerpunkte der Tiere über den Freiflächen zwischen kleineren Waldstücken und entlang von Waldrändern deutlich. Auch die Straßen dienen den Vögeln offenbar als Leitstrukturen bei der Raumnutzung. Dieses Verhalten deckt sich mit Erkenntnissen zu bevorzugten Nahrungshabitaten und Jagdgewohnheiten des Rotmilans (siehe Kapitel 2.2.4).

Tabelle 1: Ausgewählte statistische Kennzahlen der Flugbewegungen der drei verfügbaren Erfassungsjahre. Es findet eine Zunahme der Flugbewegungen über alle drei Jahre hinweg statt. Die Gründe dafür sind letztlich nicht zu benennen und daher soll Stelle nicht weiter darüber spekuliert werden. Jedenfalls scheint der Zubau von vier Windkraftanlagen keine Abnahme von Flugbewegungen verursacht zu haben.

Erfassungsjahr	2013	2019	2020
Flugbewegungen	313	799	1.053
Gesamtlänge in m	262.658,1	1.018.914,0	1.384.461,9
Durchschnittslänge in m	839,2	1.275,2	1.314,8
Medianlänge in m	540,0	875,7	1.012,8
min. Länge in m	62,0	11,5	21,6
max. Länge in m	4.742,9	7.443,8	7.637,3

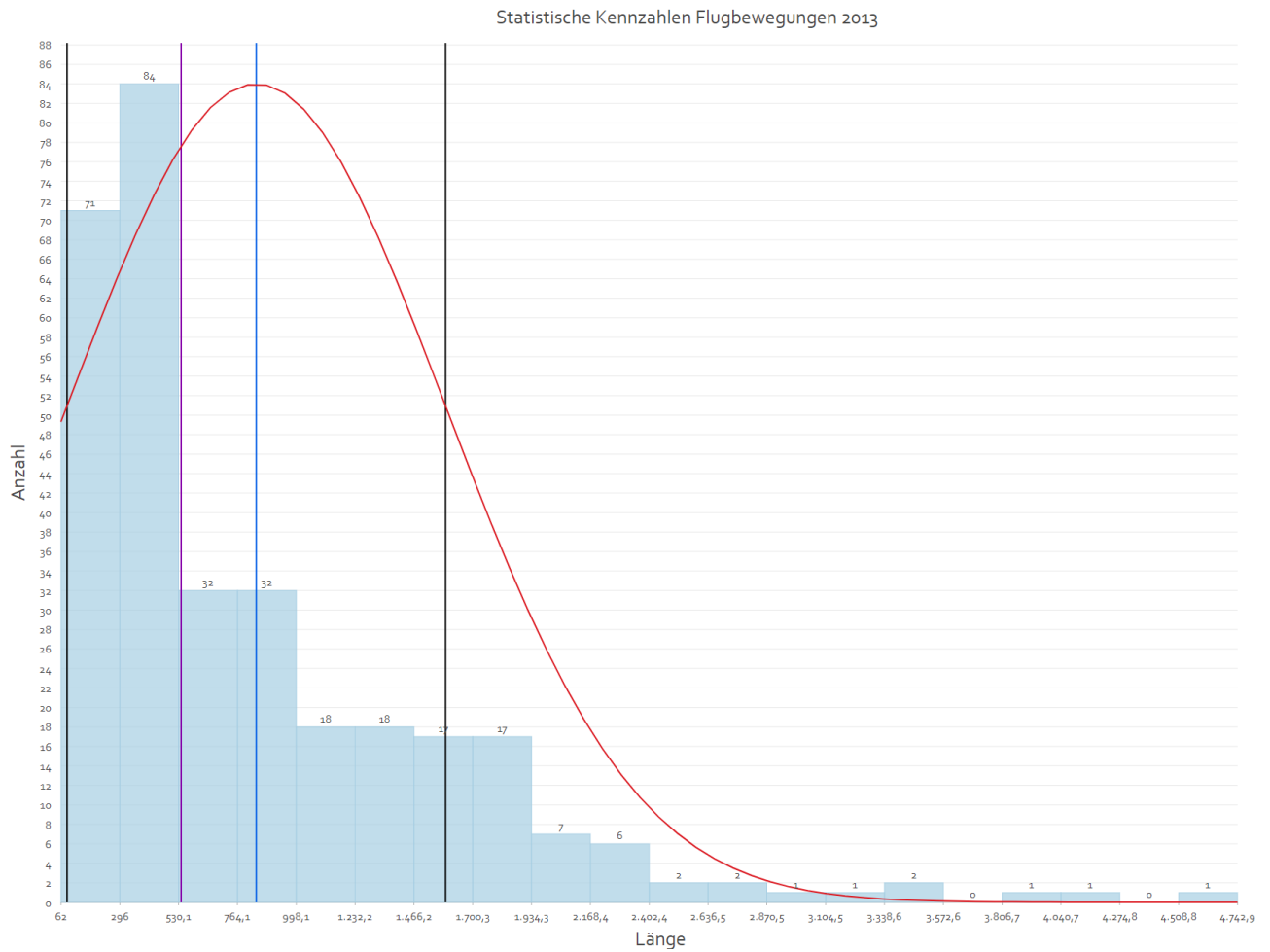


Abbildung 20: Histogramm ausgewählter statistischer Kennzahlen der Flugbewegungen für das Erfassungsjahr 2013. Auf der X-Achse ist die Länge der Flugbewegungen und auf der Y-Achse die Anzahl abgetragen. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie = Normalverteilung.

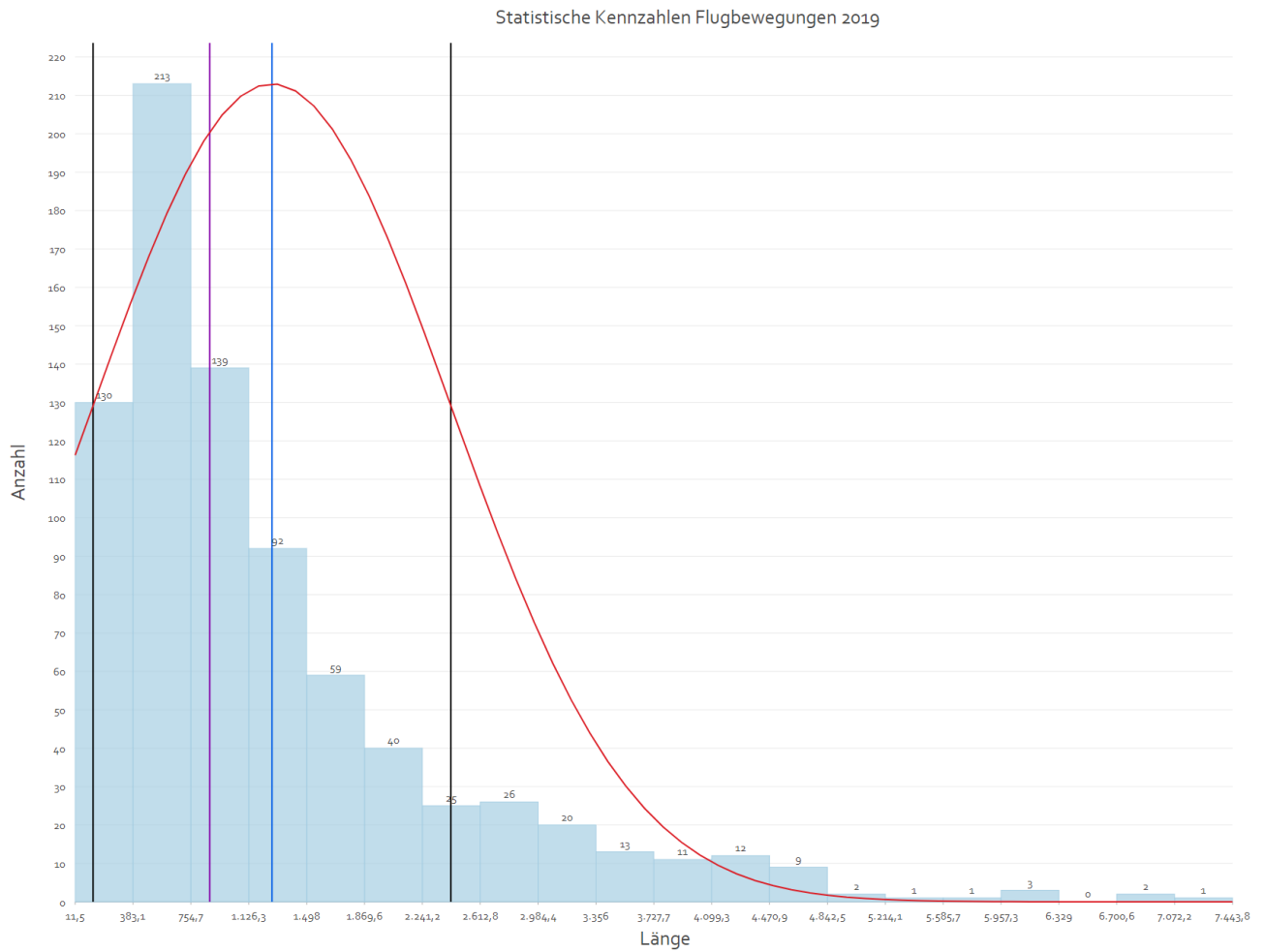


Abbildung 21: Histogramm ausgewählter statistischer Kennzahlen der Flugbewegungen für das Erfassungsjahr 2019. Auf der X-Achse ist die Länge der Flugbewegungen und auf der Y-Achse die Anzahl abgetragen. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie = Normalverteilung.

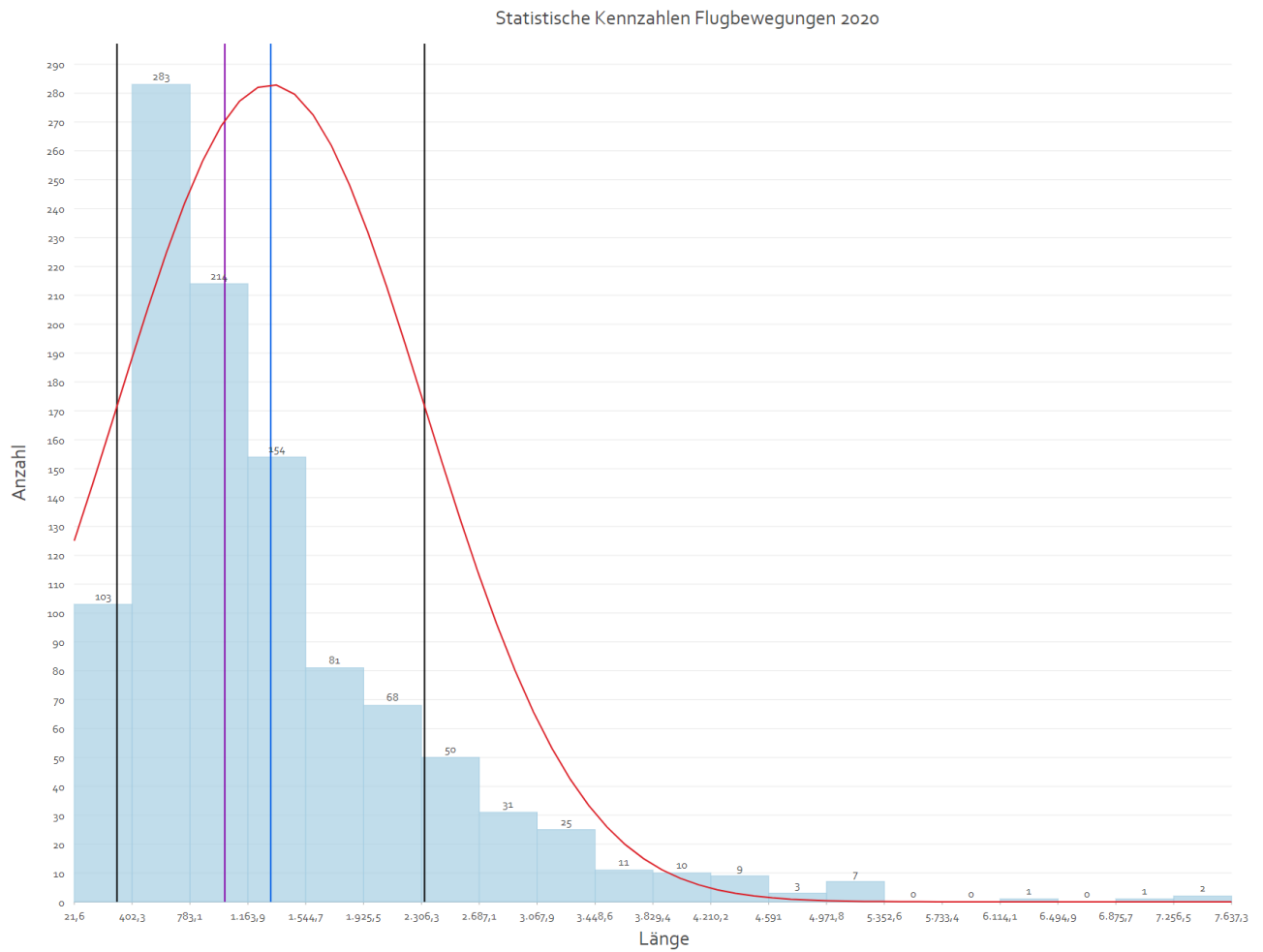


Abbildung 22: Histogramm ausgewählter statistischer Kennzahlen der Flugbewegungen für das Erfassungsjahr 2020. Auf der X-Achse ist die Länge der Flugbewegungen und auf der Y-Achse die Anzahl abgetragen. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie = Normalverteilung.



Abbildung 23: Synoptische Ergebniskarte aller erfassten Flugbewegungen von Rotmilanen im Untersuchungsgebiet für das Jahr 2013. Zu diesem Zeitpunkt waren die WEA 1 bis 4 noch nicht errichtet (Stauss, 2021).

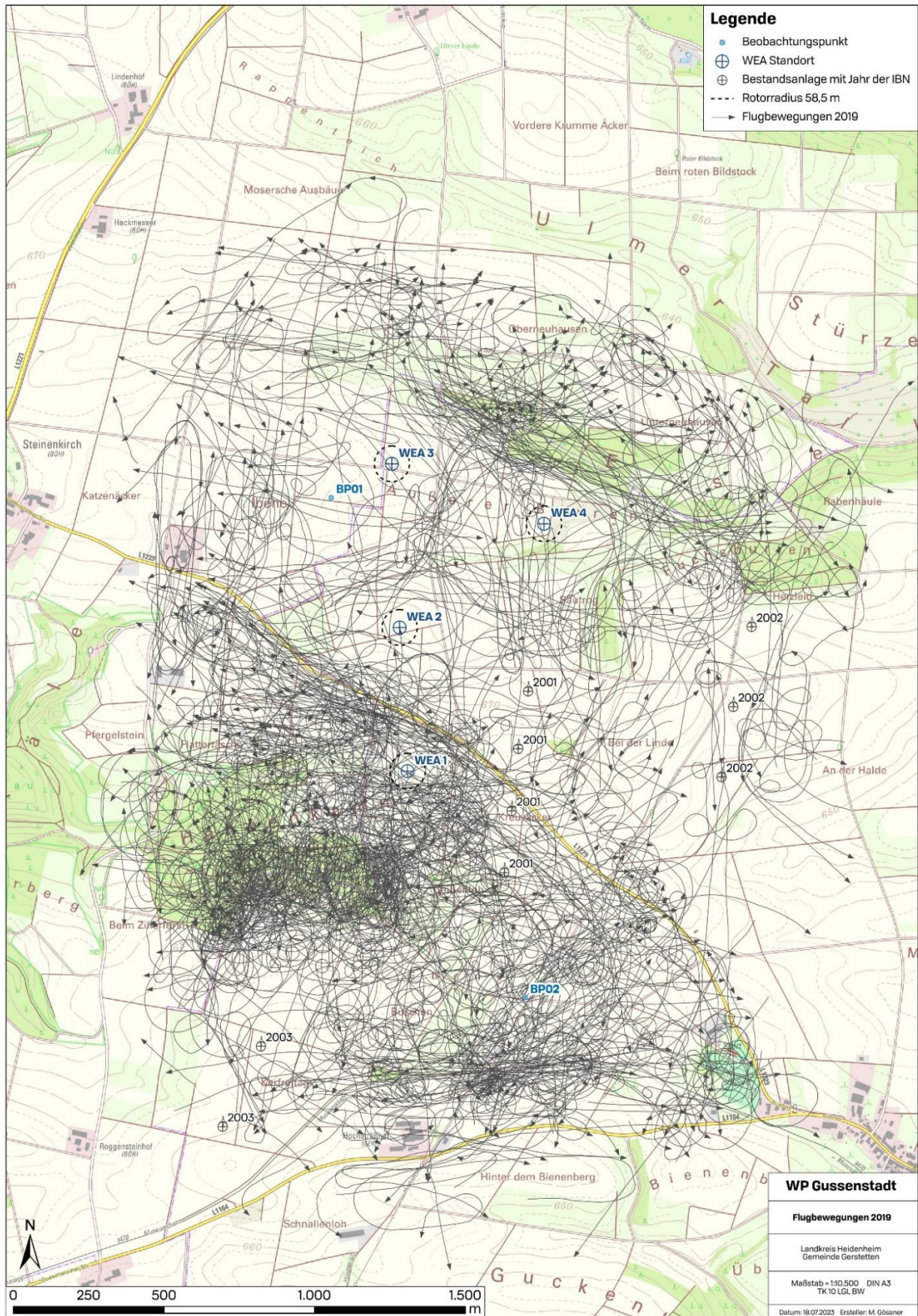


Abbildung 24: Synoptische Ergebniskarte aller erfassten Flugbewegungen von Rotmilanen im Untersuchungsgebiet für das Jahr 2019 (eigene Darstellung).

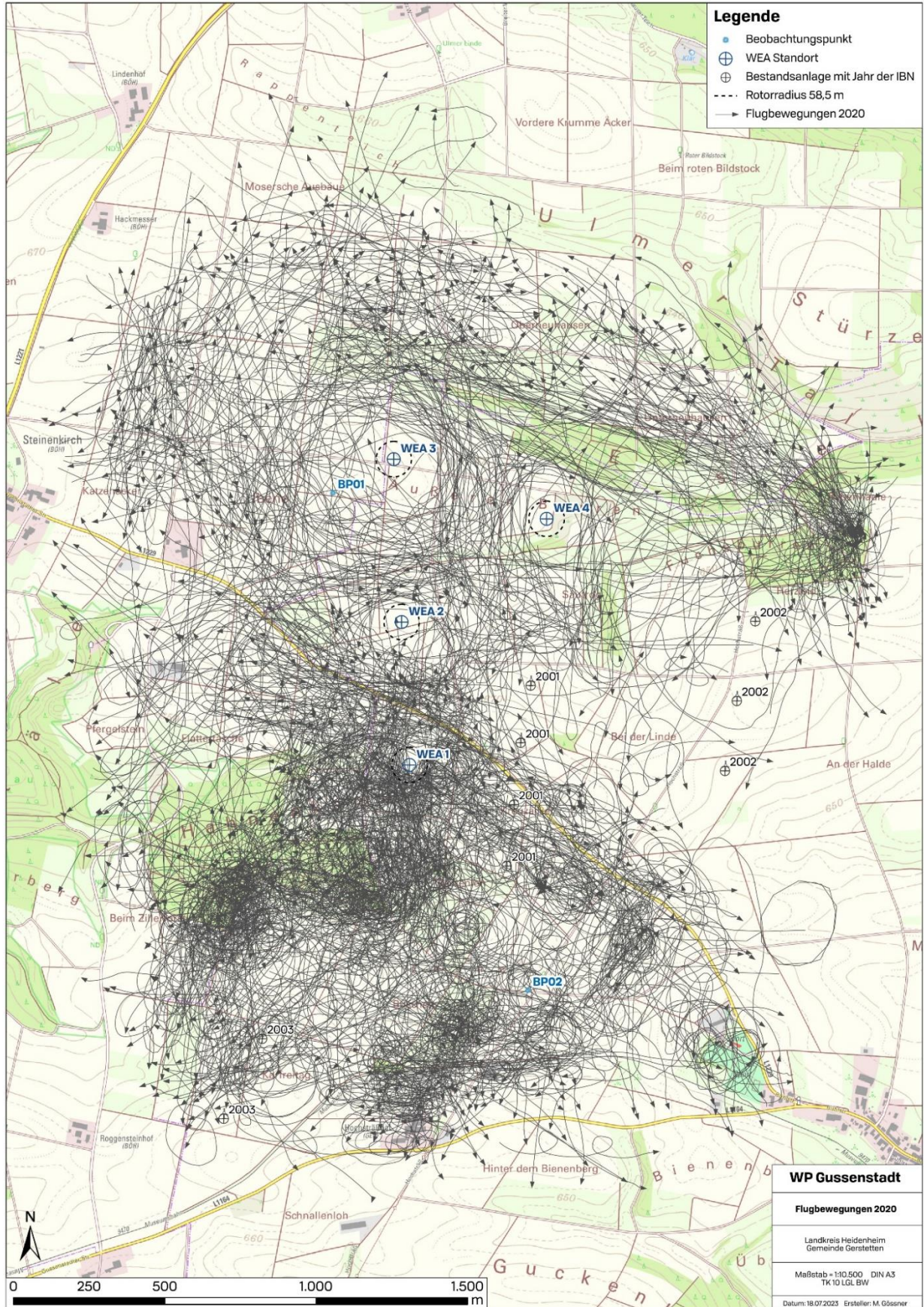


Abbildung 25: Synoptische Ergebniskarte aller erfassten Flugbewegungen von Rotmilanen im Untersuchungsgebiet für das Jahr 2020 (eigene Darstellung).

Die anschließende Auswertung der aus einer RNA gewonnenen Daten im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens erfolgt üblicherweise nach den aktuellen behördlichen Bewertungshinweisen über eine sogenannte Rasteranalyse (siehe Abbildung 26). Ein Raster mit beispielsweise 250 m x 250 m Zellgröße wird über die digitalisierten Linien gelegt und alle Flugbewegungen pro Rasterzelle mittels einer GIS-Analyse gezählt (LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, 2021). Diese Vergrößerung soll die diversen Faktoren, die zur Lageunauigkeit der Flugpfade beitragen können, durch Generalisierung ausgleichen. Einzelne Flugbewegungen, die eine Rasterzelle mehrfach durchfliegen, werden dabei als eine zusammenhängende Flugbewegung gewertet. Aus der Zahl der Flugbewegungen je Raster und der Position der geplanten Anlagen und insbesondere dem Rotordurchmesser wird dann beurteilt, ob ein sogenanntes signifikant erhöhtes Tötungsrisiko nach § 44 Abs.1 Bundesnaturschutzgesetz für geschützte Arten durch den Bau der Windkraftanlagen entstehen würde. Dabei hat die Untere Naturschutzbehörde als Verfahrensführerin einen erheblichen Ermessensspielraum. Denn ein einheitlicher quantitativer Bewertungsmaßstab existiert nicht. Ebenso spielt die Höhe der beobachteten Flugbewegungen keine Rolle in der Bewertung, obwohl diesem Faktor in der Literatur zum Themenkomplex eine entscheidende Bedeutung beigemessen wird (LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, 2021; Smeraldo et al., 2020). Auch Erkenntnisse zum Flugverhalten von Greifvögeln und speziell Rotmilanen auf der Mikroebene werden dabei außer Acht gelassen.

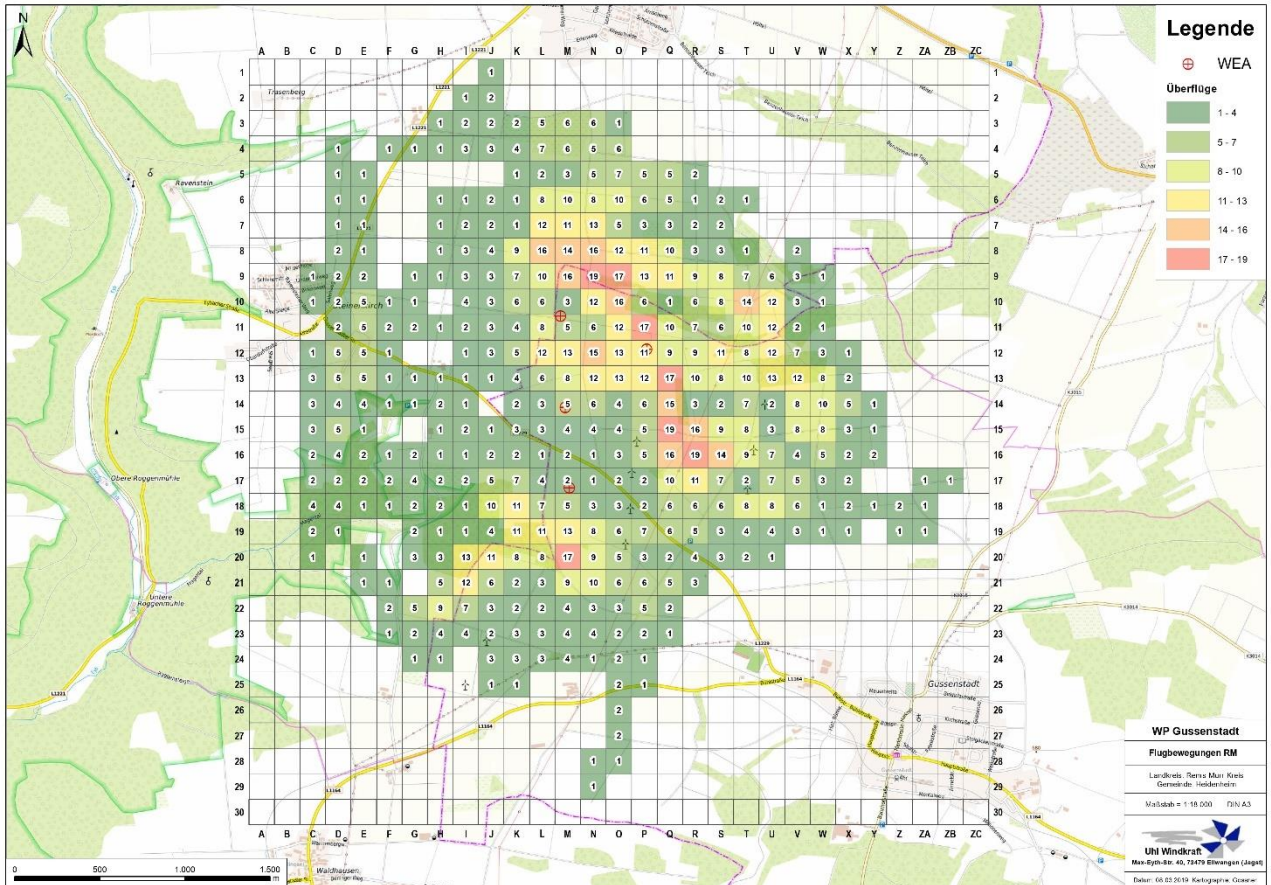


Abbildung 26: Beispiel einer Rasteranalyse von Flugbewegungen. Hier das Erfassungsjahr 2013. Die Summe der angeschnittenen Flugbewegungen pro Rasterzelle wird gezählt und das Ergebnis sowohl farblich dargestellt, als auch die genauen Zellwerte angegeben (eigene Darstellung).

4. Methoden Zuordnung Flughöhen

4.1 Datenaufbereitung

Eine Anreicherung der durch direkte Beobachtung erlangten Daten zur Raumnutzung im Untersuchungsgebiet mit durch Telemetrie ermittelten Daten zur Flughöhenverteilung könnte helfen, die Bewertung von Kollisionsrisiken an Windkraftanlagen fundierter vornehmen zu können. In dieser Arbeit sollen Möglichkeiten diese Anreicherung durchzuführen erarbeitet und verglichen werden. Eine Arbeit von Johnston et al. aus dem Jahr 2014 verfolgte einen vergleichbaren Ansatz zur Bewertung des Kollisionsrisikos von Seevögeln mit Off-Shore Windkraftanlagen. Dabei wurden unsystematisch visuell beobachtete Flughöhen aus verschiedenen Erfassungen mittels eines kubischen Splines in Verbindung mit Bootstrapping zu Aufenthaltswahrscheinlichkeiten in einem Höhenband modelliert. Mit Hilfe dieses Ansatzes wurden vereinzelt vorhandene Beobachtungen zu

Flughöhen verschiedener Vogelarten zu einem größeren Datensatz modelliert. Anschließend wurde der Volumenanteil des Rotors einer Windkraftanlage im jeweiligen Höhenband zur Bewertung eines Kollisionsrisikos herangezogen (A. Johnston et al., 2014). Die bereits aus der Literatur beschriebenen Unsicherheiten zum Verhalten von Vögeln im Nahbereich von WEA waren auch hier ein Faktor. Eine wichtige Erkenntnis dieser Arbeit war ebenfalls, dass höhere Anlagen mit größerem Rotordurchmesser ein geringes Kollisionsrisiko für viele Seevögel darstellen, als eine größere Zahl von niedrigeren Anlagen mit kleinerem Rotordurchmesser (A. Johnston et al., 2014, S. 40). Eine Modellierung von Flughöhen für den Rotmilan ist in dieser Arbeit nicht notwendig, da bereits detaillierte Erkenntnisse zum Sachverhalt vorliegen (Heuck et al., 2019; Pfeiffer & Meyburg, 2022). Es gilt allerdings diese Erkenntnisse auf konkrete Flugpfade ohne genaue Höhenangaben zu übertragen.

Die Bearbeitung der Daten aus den RNA begann mit der Extrahierung von Wegpunkten aus den Linien der Flugbewegungen. Um den einzelnen Vertices der Linien einfacher Flughöhen zuordnen zu können, wurden also zunächst die Linien in Punkt *Feature Classes* umgewandelt. Dazu wurde das Werkzeug *Feature Vertices To Points* in ArcGIS Pro verwendet. Die Punkte jedes Flugpfads erbten dabei den Objektschlüssel der ursprünglichen Linie. Anhand dieses Schlüssels konnten sie nach der Zuordnung von Flughöhen wieder zu durchgehenden Pfaden zusammengefügt werden.

Nach der Extrahierung der Wegpunkte wurde deutlich, dass es beträchtliche Unterschiede zwischen den Daten der drei vorliegenden Jahre gab (siehe Tabelle 2). Die aus den Flugpfaden extrahierten Punkte lagen aufgrund des Workflows bei der händischen Digitalisierung teilweise sehr eng zusammen. Besonders in Kurvenbereichen lag eine sehr hohe Punktdichten vor (etwa ein Punkt alle 1,5 m). Daher war eine Generalisierung bzw. Angleichung der Datenstruktur nötig, bevor mit der Zuordnung von Flughöhen begonnen werden konnte. Die Änderung der Flughöhe um einen Meter bei einem Punktabstand von nur anderthalb Metern fällt prozentual wesentlich extremer aus, als bei einem Punktabstand von zehn Metern. Daher hätte der jeweilige Punktabstand bei der Zuordnung von Flughöhen berücksichtigt werden müssen. Das hätte eine wesentliche Komplikation bedeutet, ohne die Qualität des Ergebnisses wesentlich zu verbessern. Zur Umsetzung der

Standardisierung wurde das Werkzeug *Generate Points Along Line* in ArcGIS Pro verwendet (siehe Abbildung 27). Bei der Generierung von Vertices wurde die Annahme getroffen, dass in Anbetracht der Datenstruktur, ein Punkt alle zehn Meter entlang eines Flugpfads den Verlauf einer Flugbewegung ausreichend abbilden und zu keiner Verzerrung hinsichtlich der Raumnutzung führen würde.

Vor allem die Daten aus 2019 wiesen eine sehr hohe Punktmenge auf, obwohl die Länge an erfassten Flugbewegungen kürzer ausfiel als für das Jahr 2020 (siehe Abbildung 30, Abbildung 31). Dagegen war die Punktdichte der Daten aus 2013 recht niedrig und die Generierung eines Punktes alle zehn Meter entlang der Flugpfade führte sogar zu einer Verdoppelung der Vertices (siehe Abbildung 28, Abbildung 29). Bei den Daten des Erfassungsjahres 2020 war der Effekt der Standardisierung am geringsten (siehe Abbildung 32, Abbildung 33).

Da es sich, wie bereits dargestellt, bei den Vertices nicht um gemessene Koordinaten oder Datenpunkte im Verlauf einer Flugbewegung, sondern um näherungsweise Positionsbestimmungen im Prozess der Digitalisierung der Kartierungsgrundlagen handelte, wurde also die räumliche Dichte dieser Punkte vor der weiteren Prozessierung vereinheitlicht, ohne dadurch einen wesentlichen Informationsverlust in Kauf nehmen zu müssen. Die ihrem Prinzip nach infinitesimal herunterskalierbaren Vektordaten täuschen also in diesem Anwendungsfall eine Genauigkeit vor, die einen erheblichen jedoch schwer zu quantifizierenden Anteil an Scheingenauigkeit beinhaltet. Der Verlust oder die Einführung von einzelnen Vertices zur Reduzierung des Datenumfangs bzw. der Verbesserung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse nach der Zuordnung von Flughöhen erschien daher in diesem Anwendungsfall und in Anbetracht der Datenherkunft als annehmbarer Kompromiss.

Im nächsten Schritt konzentrierte sich die praktische Arbeit auf die Erstellung einer Werteliste mit Flughöhen gemäß der empirisch gesicherten prozentualen Höhenverteilung (siehe Tabelle 3). Aus dieser Liste sollten dann mit Hilfe von drei Algorithmen, Werte zu den aus Flugbewegungen extrahierten Wegpunkten zugeordnet werden. Dieses zweistufige Vorgehen wurde vor allem gewählt, um den Code zur Prozessierung schlank und modular zu

halten. Außerdem wurde der Wertebereich der Flughöhen bei 260 m ü.G. gekappt. Zwar wurden in der Telemetriestudie vereinzelt auch wesentliche höhere Flugbewegungen (im Maximum 1.613 m ü.G.) erfasst, diese spielen aber für das Kollisionsrisiko an aktuell im On-Shore Betrieb üblichen Windkraftanlagen mit etwa 250 m Gesamthöhe keine wesentliche Rolle mehr und wurden daher konservativ in den Höhenbereich zwischen 251 m und 260 m ü.G. inkludiert. Auch war der Anteil an der Gesamtverteilung mit 3,9 % eher gering.

Da in den Daten aus den Raumnutzungsanalysen keine Angaben zum Geschlecht von beobachteten Individuen enthalten waren, wurde aus den geschlechtsspezifischen Verteilungswerten ein einfacher Durchschnitt gebildet und als Grundlage für die Zuordnung von Flughöhen verwendet (siehe Tabelle 3).

Zur Erstellung der bereits erwähnten Werteliste wurde dann ein Python Skript erstellt. Die Funktionsweise des Skripts lässt sich wie folgt beschreiben. Als Eingabe wurden die für beide Geschlechter durchschnittlichen Höhenanteile der Höhenklassen verwendet. Die Länge der Werteliste wurde jeweils anhand der Anzahl der erzeugten Punkte im 10 m Abstand für die drei Erfassungsjahre bestimmt. Dann wurde bezogen auf den Umfang des Punktdatensatzes des jeweiligen Erfassungsjahres und den Anteilen in den Höhenklassen eine Werteliste mit Flughöhen erstellt, die die beabsichtigten Werteanteile enthielt (siehe Abbildung 34 Tabelle 4). Wichtige Quellen für die Erstellung dieses Scripts waren die ausführlichen Tutorialseiten der W3Schools.com und geeksforgeeks.org für Python (<https://www.w3schools.com/python/default.asp>, <https://www.geeksforgeeks.org/generating-random-number-list-in-python/>, abgerufen am 01.03.2023). Elemente aus diesen beiden Quellen wurden kombiniert und für die Anwendung in dieser Arbeit angepasst. Für das Skript der Erstellung der Liste wurden die beiden Pakete *random* und *csv* verwendet. Der entsprechende Code wurde über die Python Konsole in ArcGIS Pro ausgeführt. Die drei resultierenden Tabellen zeigten die beabsichtigte Werteverteilung und waren daher als Grundlage für die probabilistische Zuordnung von Flughöhen im nächsten Schritt geeignet (siehe Tabelle 4).

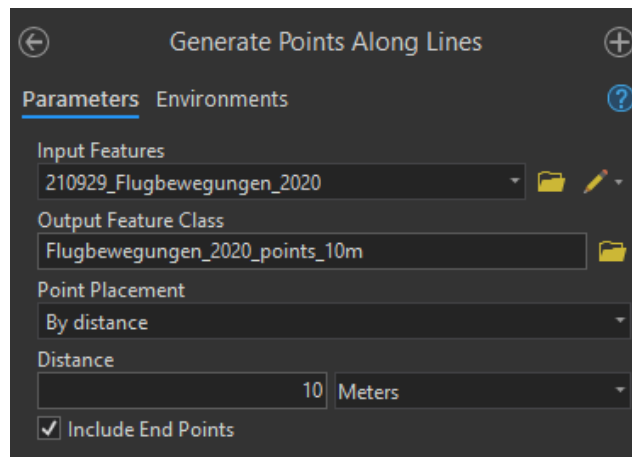


Abbildung 27: Einstellungsparameter bei der Ausführung der Extrahierung von Punktdaten für die Standardisierung der Flugbewegungen des Erfassungsjahres 2020.

Tabelle 2: Die Anzahl an Vertices in den Ursprungsdaten und die Menge an Punkten nach der Extrahierung. Durch die Standardisierung auf Punktabstände von 10 m verdoppelte sich die Punktzahl des Datensatzes von 2013. Dagegen sank die Punktzahl im Jahr 2019 auf ca. ein Fünftel des Ursprungsdatensatzes. Die geringsten Auswirkungen auf die Punktdichte hatte die gewählte Anpassung im Jahr 2020.

Erfassungsjahr	Vertices Ursprungsdaten	Points Along Line 10 m
2013	13.242	26.718
2019	499.607	103.102
2020	166.455	140.012

Tabelle 3: gemessene Höhenverteilung aus der Telemetriestudie (Pfeiffer & Meyburg, 2022).

Flughöhe in m	Männchen	Weibchen	Durchschnitt
1-10	6,2%	7,3%	6,8%
11-20	12,7%	16,7%	14,7%
21-30	14,3%	17,8%	16,1%
31-40	11,5%	14,3%	12,9%
41-50	8,7%	10,8%	9,8%
51-60	6,7%	7,9%	7,3%
61-70	5,2%	5,9%	5,6%
71-80	4,2%	4,3%	4,3%
81-90	3,4%	3,2%	3,3%
91-100	2,9%	2,3%	2,6%
101-110	2,4%	1,8%	2,1%
111-120	2,1%	1,4%	1,8%
121-130	1,8%	1,1%	1,5%
131-140	1,6%	0,9%	1,3%

141-150	1,4%	0,7%	1,1%
151-160	1,2%	0,5%	0,9%
161-170	1,1%	0,4%	0,8%
171-180	1,0%	0,3%	0,7%
181-190	0,9%	0,3%	0,6%
191-200	0,8%	0,2%	0,5%
201-210	0,8%	0,2%	0,5%
211-220	0,7%	0,2%	0,5%
221-230	0,6%	0,2%	0,4%
231-240	0,6%	0,2%	0,4%
241-250	0,5%	0,1%	0,3%
251 - 260	6,7%	1,0%	3,9%
Summe	100,0%	100,0%	100,0%



Abbildung 28: Ausschnitt der Vertices aus der Digitalisierung der Flugbewegungen des Jahres 2013. Die Kurvenbereiche weisen eine hohe Punktdichte auf. Auf Geraden sind die Punktabstände wesentlich größer, bis zu 180 m.

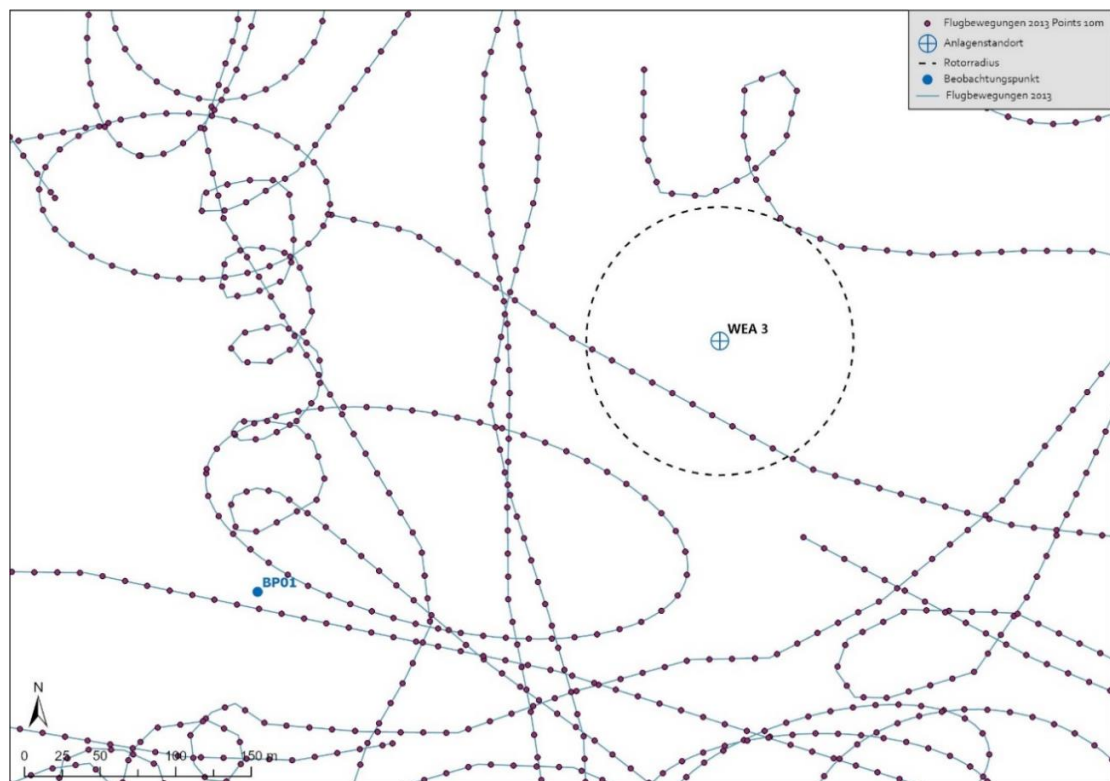


Abbildung 29: Ausschnitt der auf 10 m Abstände standardisierten Punkte der Flugbewegungen des Jahres 2013.



Abbildung 30: Ausschnitt der Vertices aus der Digitalisierung der Flugbewegungen des Jahres 2019. Die Kurvenbereiche weisen eine sehr hohe Punktdichte auf.

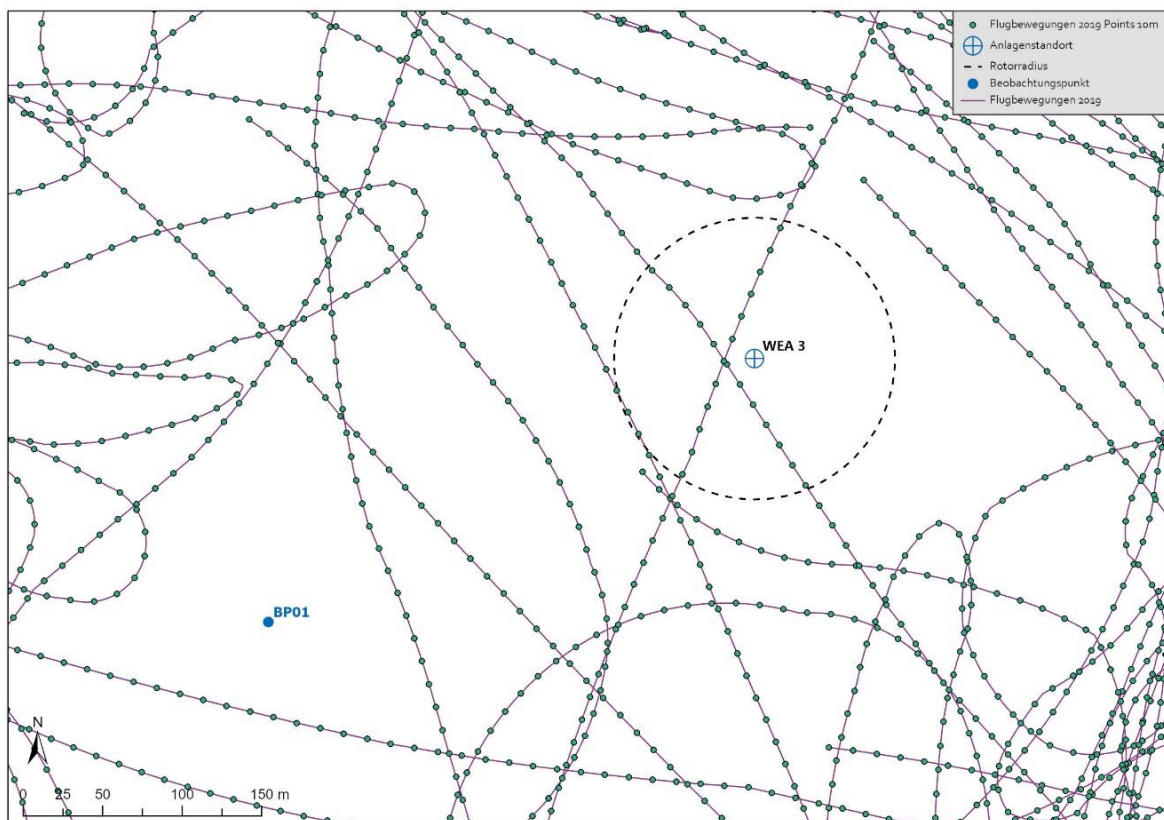


Abbildung 31: Ausschnitt der auf 10 m Abstände standardisierten Punkte der Flugbewegungen des Jahres 2019.

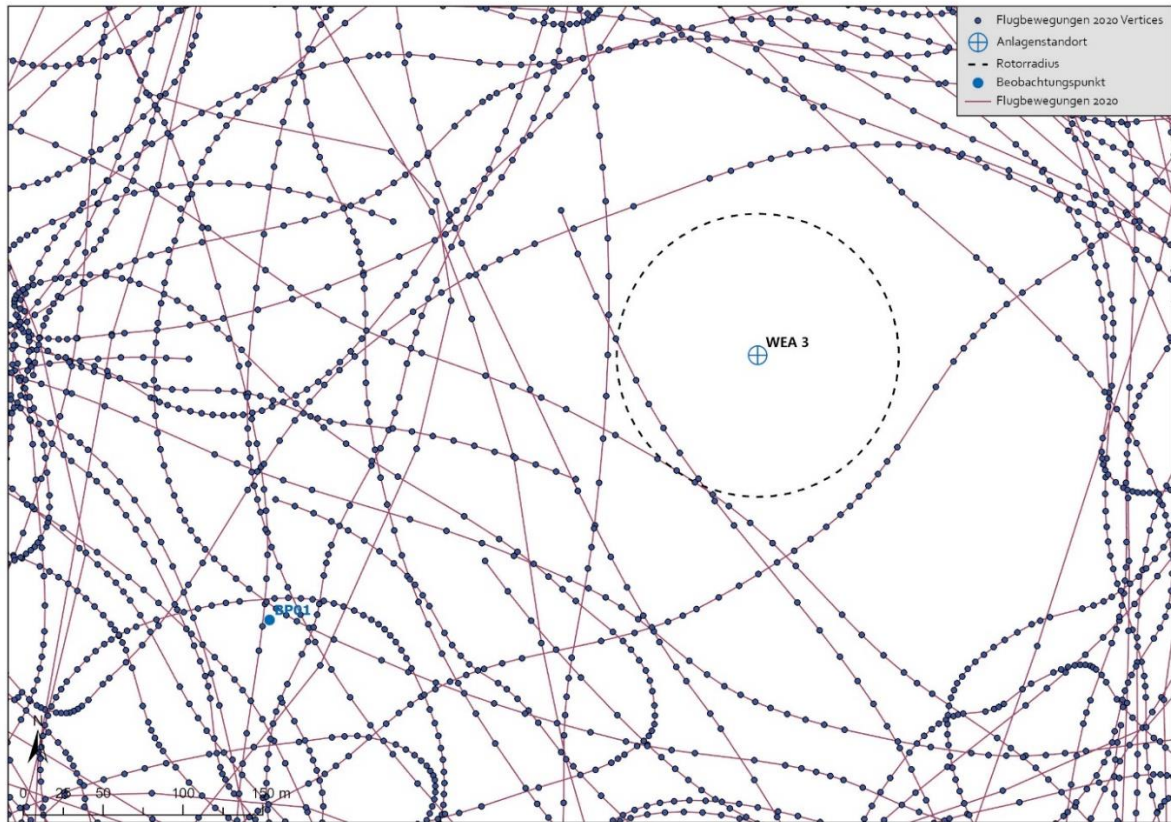


Abbildung 32: Ausschnitt der Vertices aus der Digitalisierung der Flugbewegungen des Jahres 2020.

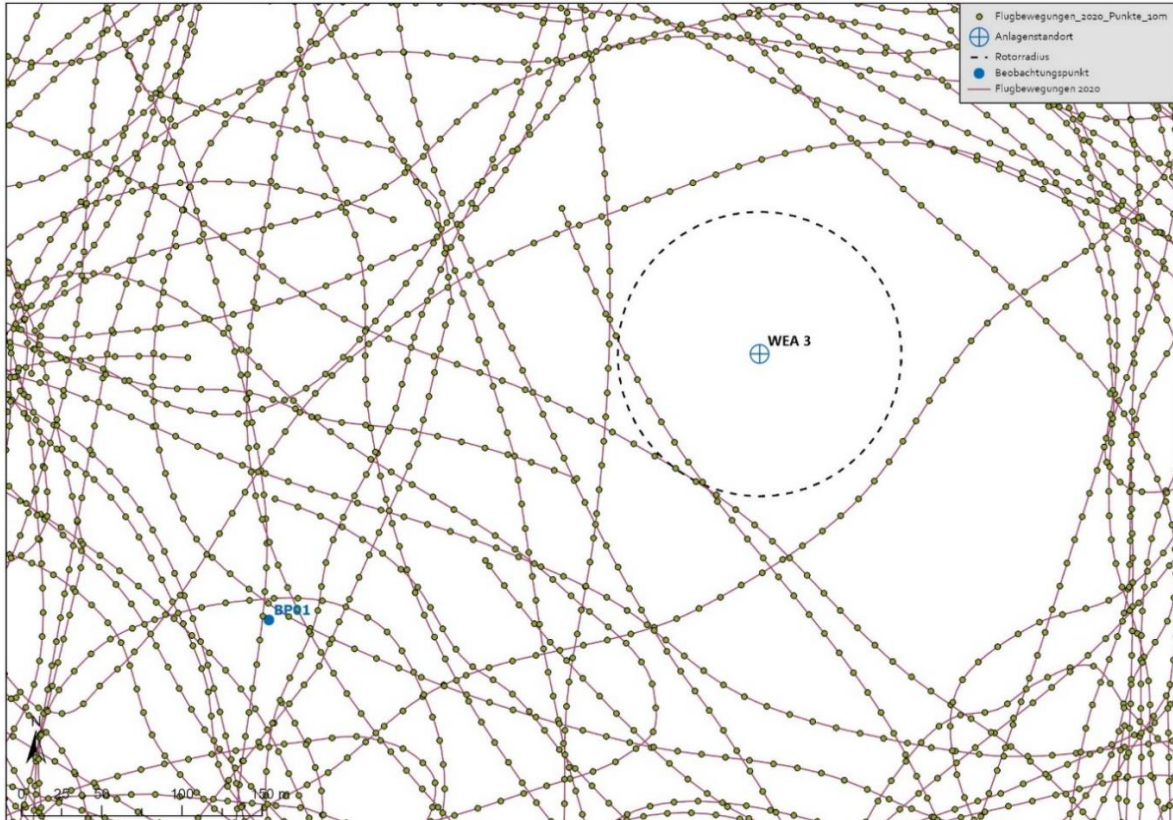


Abbildung 33: Ausschnitt der auf 10 m Abstände standardisierten Punkte der Flugbewegungen des Jahres 2020.

```

1  import csv
2  import random
3
4  # Die prozentuale Verteilung der Flughöhen aus der Telemetriestudie auf Zehnerstufen bezogen
5  distribution = [0.068, 0.147, 0.161, 0.129, 0.098, 0.073, 0.056, 0.043, 0.033, 0.026, 0.021, 0.018, 0.015,
6                0.013, 0.011, 0.009, 0.008, 0.007, 0.006, 0.005, 0.005, 0.005, 0.004, 0.004, 0.003, 0.039]
7
8  # Die Anzahl der Zehnerstufen, 0 m - 260 m also 26 Stufen
9  num_ranges = len(distribution)
10
11 # Die Anzahl der Werte insgesamt, wird durch den jeweiligen Datensatz mit den Flugbewegungen bestimmt
12 total_numbers = 26718
13
14 # Die Liste in welcher die Werte gespeichert werden
15 numbers = []
16
17 # Schleife, um Zahlen für jede Zehnerstufe zu generieren
18 for i in range(num_ranges):
19     # Anzahl der Zahlen, die in dieser Zehnerstufe generiert werden sollen
20     num_numbers = int(distribution[i] * total_numbers)
21
22     # Die untere und obere Grenze der Zehnerstufe berechnen
23     lower_bound = i * 10 + 1
24     upper_bound = (i + 1) * 10
25
26     # Eine Schleife, um die Zahlen in der aktuellen Zehnerstufe zu generieren
27     for j in range(num_numbers):
28         # Eine Zufallszahl zwischen der unteren und oberen Grenze der aktuellen Zehnerstufe generieren
29         number = random.randint(lower_bound, upper_bound)
30
31         # Die generierte Zahl wird zur Liste hinzugefügt
32         numbers.append(number)
33
34 # Die Liste der Zahlen sortieren
35 numbers.sort()
36
37 # Die Liste der Werte in eine CSV-Datei schreiben, diese sind mit Zeilenumbruch getrennt
38 with open(r"E:\Marlin\UNIGIS\Masterarbeit\Daten\Listen\Nummernliste_2013.csv", 'w', newline='') as csvfile:
39     writer = csv.writer(csvfile)
40     for number in numbers:
41         writer.writerow([number])
42
43 # Testfunktion, ist mit der Ausgabe als .csv redundant
44 #print(numbers)

```

Abbildung 34: Das Python Skript für die Erstellung der Liste mit Werten die der empirisch beobachteten Flughöhenverteilung des Rotmilans entsprechen. Dabei wurden die Prozentwerte der 26 Höhenstufen aus Tabelle 3 als Dezimalzahlen angegeben. Der zweite wichtige Input ist der Umfang der auf 10 m Abstände standardisierten Wegpunkte der Flugbewegungen.

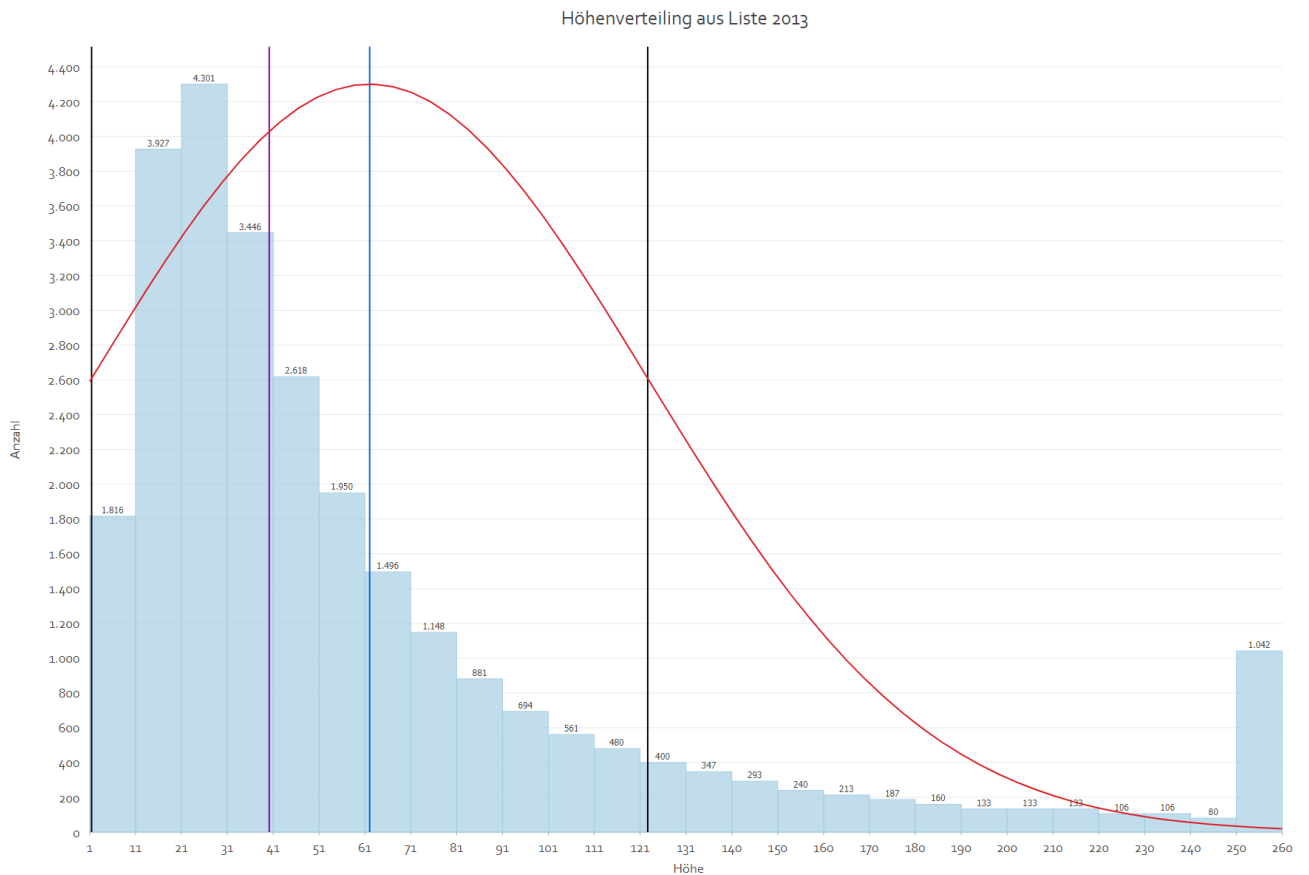


Abbildung 35: Die Höhenverteilung der für das Jahr 2013 erstellten Liste im Histogramm. Die Verteilung ahmt die Daten aus der Telemetriestudie gut nach. Ausnahme: am rechten Rand ist die Häufung der Werte zu erkennen, die durch die Kappung der Flughöhe auf 260 m entstanden ist. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie = Normalverteilung.

Tabelle 4: Die erzeugten Tabellen zeigten alle die beabsichtigte Verteilung von Flughöhen.

Erfassungsjahr	2013	2019	2020
Punkte	26.718	103.102	140.012
Durchschnittshöhe in m ü.G.	61,80	61,85	61,86
Medianhöhe in m ü.G.	40	40	40
Standardabweichung	60,38	60,42	60,42
min.	1	1	1
max.	260	260	260

4.2 Randomisierte Zuordnung

Nach der Aufbereitung der Bewegungsdaten und der Erstellung der Werteliste wurde ein Skript erstellt, das aus der erstellten Liste Flughöhen für die aus den Flugbewegungen extrahierten Punkte nach dem Zufallsprinzip zog (siehe Abbildung 36). Es handelte sich dabei um eine Ziehung mit Zurücklegen mit Beachtung der Reihenfolge, da die Punkte anhand ihrer Feature-ID aufsteigend geordnet waren und diese Reihenfolge bei der Importierung der Punktliste beibehalten wurde. Auch zur Erstellung dieses Scripts waren die ausführlichen Tutorialseiten der W3Schools.com und geeksforgeeks.org für Python (<https://www.w3schools.com/python/default.asp>, <https://www.geeksforgeeks.org/python-select-random-value-from-a-list/>) (abgerufen am 03.03.2023) wichtige Quellen. Elemente aus diesen beiden Quellen wurden kombiniert und für die Anwendung in dieser Arbeit angepasst.

```

1  import geopandas as gpd
2  import random
3  import pandas as pd
4
5  # Funktion, um zufällige Werte aus einer Liste zuzuweisen
6  def assign_random_values(data, value_list):
7      random_values = [random.choice(value_list) for _ in range(len(data))]
8      data["Flughöhe"] = random_values
9      return data
10
11 # Pfade zu den Input und Output Dateien
12 input_shp_file = r"E:\Marlin\UNIGIS\Masterarbeit\Daten\Input\Flugbewegungen_2013_Punkte_10m.shp"
13 output_shp_file = r"E:\Marlin\UNIGIS\Masterarbeit\Daten\Output\Random\Random_2013.shp"
14 csv_file = r"E:\Marlin\UNIGIS\Masterarbeit\Daten\Listen\Nummernliste_2013.csv"
15
16 # Liste mit vorher erstellten Werten aus der CSV-Datei importieren
17 liste_2013 = pd.read_csv(csv_file, header=None)[0].tolist()
18
19 # Shapefile einlesen
20 gdf = gpd.read_file(input_shp_file)
21
22 # Zufällige Werte aus der Liste zuweisen und in neues Feld schreiben
23 gdf_with_values = assign_random_values(gdf, liste_2013)
24
25 # Shapefile mit den neuen Werten exportieren
26 gdf_with_values.to_file(output_shp_file)
27

```

Abbildung 36: Das Python Skript für die rein zufällige Zuordnung von Flughöhen aus der erstellten Liste am Beispiel des Datensatzes für das Jahr 2013.

4.3 Randomisierte Zuordnung mit Autokorrelation, Abweichung 5 m

In einem zweiten Schritt wurde ein Skript erstellt, das aus der erstellten Liste Flughöhen nach dem Zufallsprinzip zog. Es wurde aber nur der erste Wert einer Flugbewegung rein zufällig zugeordnet. Für alle weiteren Wegpunkte eines Flugpfades mit gleichlautender Ursprungs-ID wurden nur Werte in Betracht gezogen, die maximal fünf Meter nach oben oder unten abweichen durften (siehe Abbildung 37). Auch eine gleichbleibende Flughöhe war zulässig. Für dieses Skript wurden die Pakete *random*, *pandas* und *geopandas* verwendet. Um das Paket *geopandas* in ArcGIS Pro verwenden zu können, musste zunächst das voreingestellte *Python Environment* geklont und dann das Paket zu diesem hinzugefügt werden. Dann musste das neue erstellte *Environment* zur Prozessierung ausgewählt werden. Außerdem führte anfangs die Ausführung des Scripts zu einem Fehler, wenn die aktuelle Version von *geopandas* (0.12.2) in Verbindung mit Python 3.9 verwendet wurde. Ein *Downgrade* der Version des *geopandas* Pakets auf den kompatiblen Stand 0.9.0 behob das Problem.

```

1 import geopandas as gpd
2 import random
3 import pandas as pd
4
5 # Funktion, um zufällige Werte aus einer Liste zuzuweisen, die Abweichung kann variiert werden
6 def assign_random_values(data, value_list):
7     last_heights = {}
8     for index, row in data.iterrows():
9         orig_fid = row["ORIG_FID"]
10        if orig_fid in last_heights:
11            deviation = random.choice([-5, 0, 5])
12            new_height = last_heights[orig_fid] + deviation
13            data.at[index, "Flughöhe"] = max(0, min(new_height, 260))
14        else:
15            data.at[index, "Flughöhe"] = random.choice(value_list)
16            last_heights[orig_fid] = data.at[index, "Flughöhe"]
17    return data
18
19 # Pfade zu den Input und Output Dateien
20 input_shp_file = r"E:\Marlin\UNIGIS\Masterarbeit\Daten\Input\Flugbewegungen_2013_Punkte_10m.shp"
21 output_shp_file = r"E:\Marlin\UNIGIS\Masterarbeit\Daten\Output\Abweichung 5 m\Abweichung_5m_2013.shp"
22 csv_file = r"E:\Marlin\UNIGIS\Masterarbeit\Daten\Listen\Nummernliste_2013.csv"
23
24 # Liste mit vorher erstellten Werten aus der CSV-Datei importieren
25 liste_2013 = pd.read_csv(csv_file, header=None)[0].tolist()
26 liste_2013 = [max(0, min(height, 260)) for height in liste_2013]
27
28 # Shapefile einlesen
29 gdf = gpd.read_file(input_shp_file)
30
31 # Zufällige Werte aus der Liste zuweisen und in neues Feld schreiben
32 gdf_with_values = assign_random_values(gdf, liste_2013)
33
34 # Shapefile mit den neuen Werten exportieren
35 gdf_with_values.to_file(output_shp_file)

```

Abbildung 37: Das Skript für die Zuordnung von Flughöhen mit Autokorrelation zum letzten verarbeiteten Punkt am Beispiel des Jahres 2013. Die maximale Abweichung betrug fünf Meter.

4.4 Randomisierte Zuordnung mit Autokorrelation, Abweichung 15 m

In einem dritten Schritt wurde das Skript aus dem vorherigen Durchgang so angepasst, dass die in Zeile 11 des Scripts definierte maximale Abweichung in der Flughöhe zwischen den Wegpunkten bis zu 15 Meter statt nur fünf Meter betragen durfte (siehe Abbildung 37). Auch eine gleichbleibende Flughöhe war zulässig.

5. Ergebnisse

5.1 Randomisierte Zuordnung

Die zufällige Zuordnung von Flughöhen zu den Wegpunkten der Flugbewegungen aus der vordefinierten Liste reproduzierte die empirische Verteilung aus der zugrundeliegenden Werteliste (siehe Tabelle 4, Tabelle 5). Die Abweichungen innerhalb der einzelnen Flugbewegungen waren allerdings beträchtlich und spiegelten nicht das natürliche Flugverhalten eines Greifvogels wider (siehe Abbildung 38).

Tabelle 5: Die Durchschnitts- und Medianwerte der zufällig zugeordneten Flughöhen stimmen mit der jeweiligen Tabellengrundlage überein. Auch die Standardabweichungen sind nahezu identisch.

Erfassungsjahr	2013	2019	2020
Punkte	26.718	103.102	140.012
Durchschnittshöhe in m ü.G.	61,80	61,85	61,86
Medianhöhe in m ü.G.	40	40	40
Standardabweichung	60,0	60,71	60,44
min.	1	1	1
max.	260	260	260

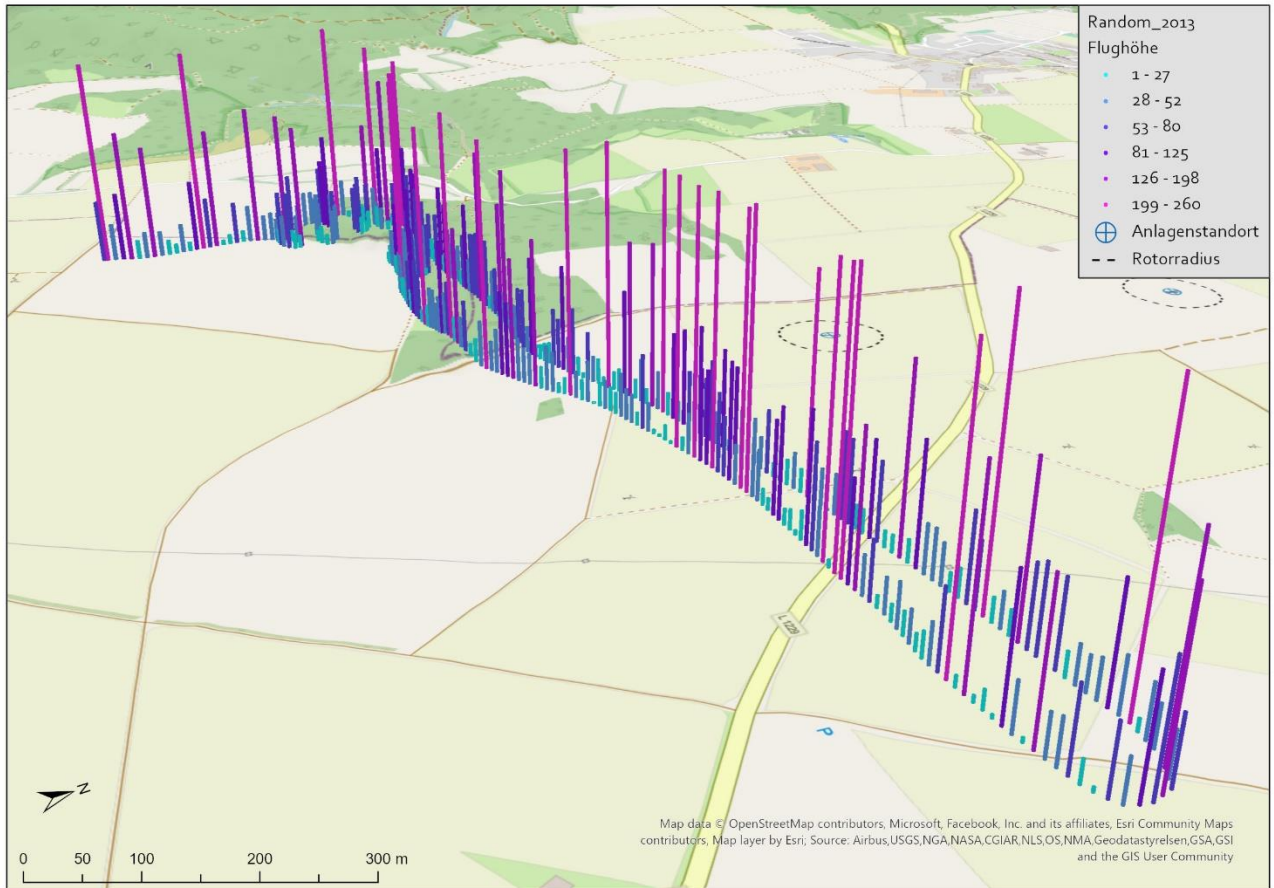


Abbildung 38: Beispiel einer Flugbewegung aus dem Jahr 2013 aus dem Süden des Untersuchungsgebietes mit zufällig zugeordneten Höhen zu jedem Wegpunkt. Die Variation der Flughöhe ist extrem und füllt den ganzen Wertebereich aus.

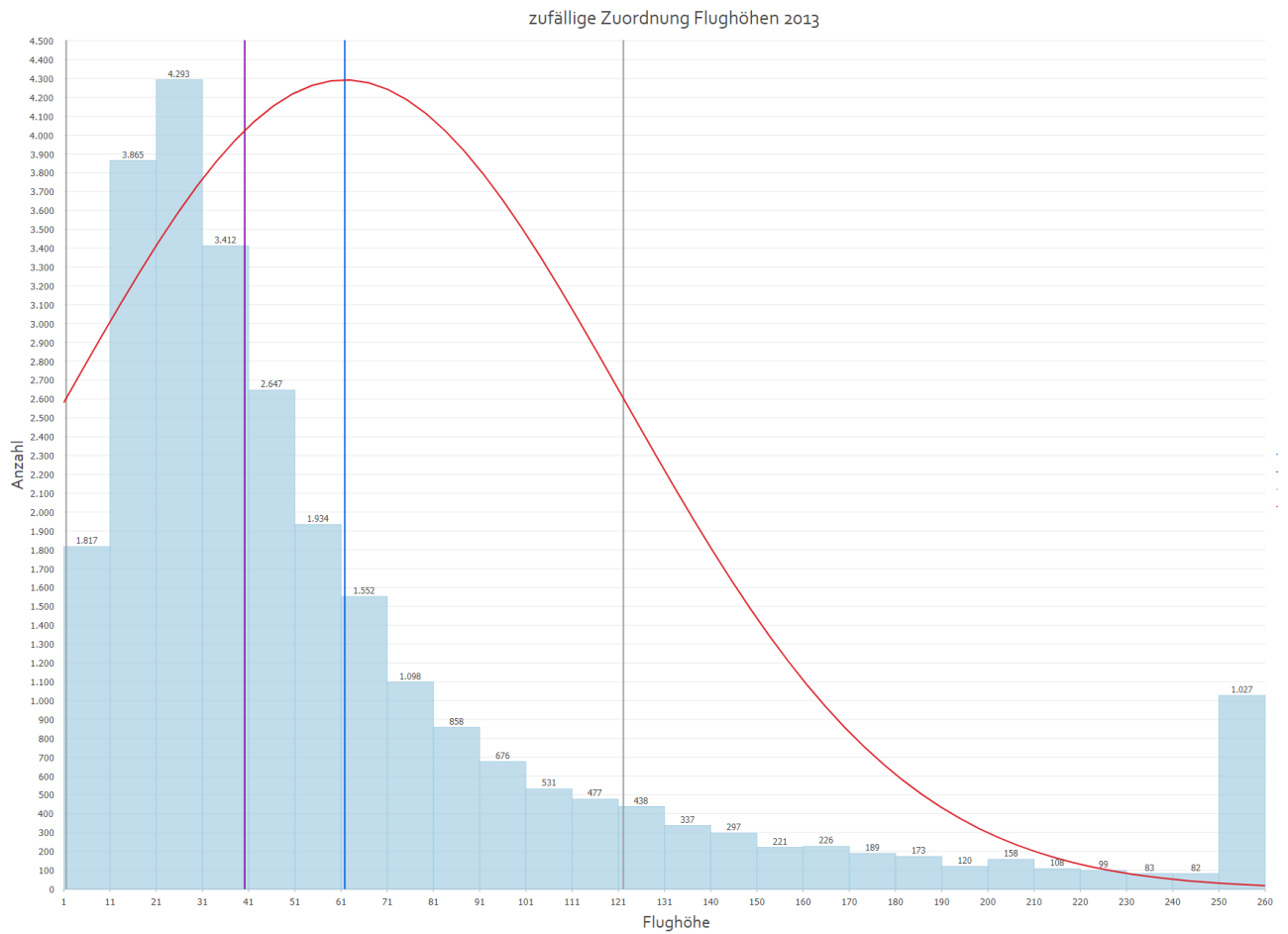


Abbildung 39: Bei einer rein zufälligen Zuordnung von Flughöhen zum Datensatz des Jahres 2013 ohne Berücksichtigung von Autokorrelation resultierte diese Verteilung. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie = Normalverteilung.

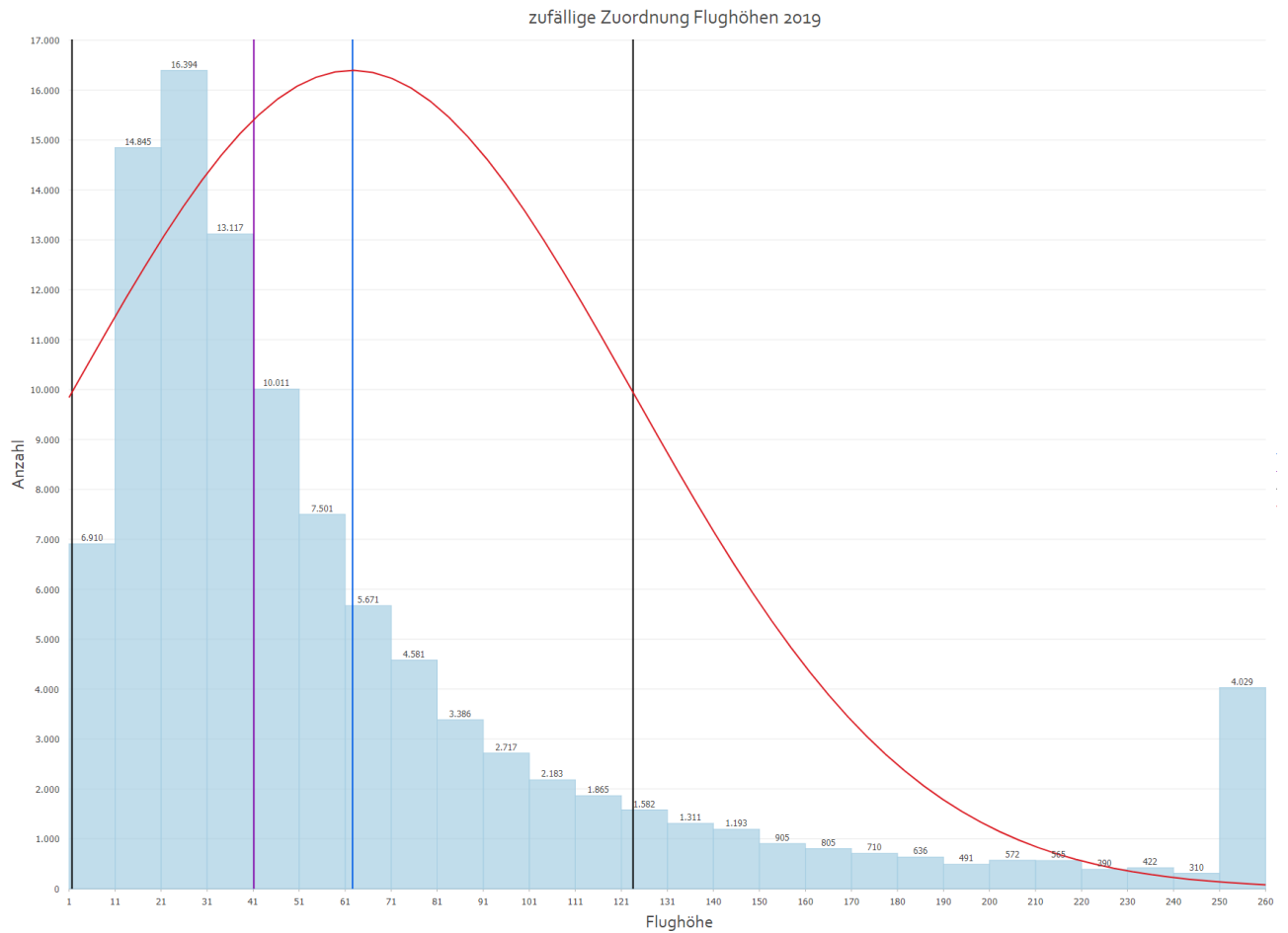


Abbildung 40: Bei einer rein zufälligen Zuordnung von Flughöhen zum Datensatz des Jahres 2019 ohne Berücksichtigung von Autokorrelation resultierte diese Verteilung. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie = Normalverteilung.

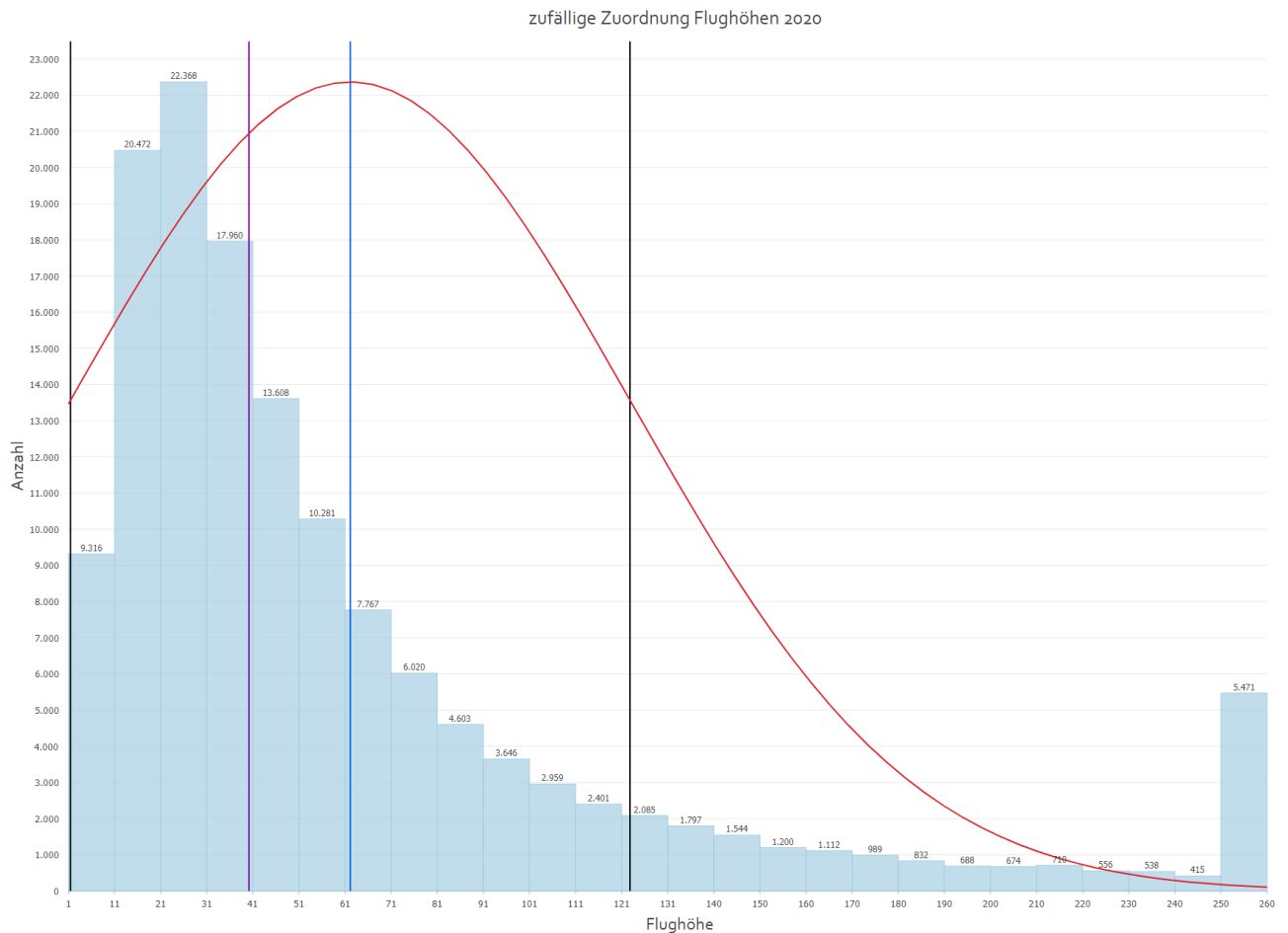


Abbildung 41: Bei einer rein zufälligen Zuordnung von Flughöhen zum Datensatz des Jahres 2020 ohne Berücksichtigung von Autokorrelation resultierte diese Verteilung. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie = Normalverteilung.

5.2 Randomisierte Zuordnung mit Autokorrelation, Abweichung 5 m

Die zufällige Zuordnung von Flughöhen zu den Wegpunkten der Flugbewegungen aus der vordefinierten Liste reproduzierte nicht die empirische Verteilung aus der zugrundeliegenden Werteliste (siehe Tabelle 6). Der Medianwert liegt um gut zehn Meter höher als bei der Ausgangsliste. Auch die Durchschnittshöhe und die Standardabweichung liegen leicht höher als bei der Ausgangsverteilung im vorherigen Durchgang. Dementsprechend sind niedrigere Flughöhen in diesem Ergebnis eher unterrepräsentiert. Auch der Ausschlag in der Höhenklasse 250 m bis 260 m fällt hier geringer aus als beim vorherigen Durchgang und erscheint eher geglättet (siehe Abbildung 42). Eine wiederholte Durchführung würde das Ergebnis sicher leicht variieren. Die grundsätzliche Tendenz weist aber in allen drei Erfassungsjahren in die gleiche Richtung. Daher können die Ergebnisse wohl als repräsentativ gelten.

Tabelle 6: Resultierende statistische Kennzahlen der Zuordnung mit Einschränkung der Abweichung auf maximal 5 m. Die Verteilung unterscheidet sich von der rein zufälligen Ziehung aus der Liste.

Erfassungsjahr	2013	2019	2020
Punkte	26.718	103.102	140.012
Durchschnittshöhe in m ü.G.	68,77	69,63	69,53
Medianhöhe in m ü.G.	51	50	51
Standardabweichung	62,16	61,65	63,21
min.	1	1	1
max.	260	260	260

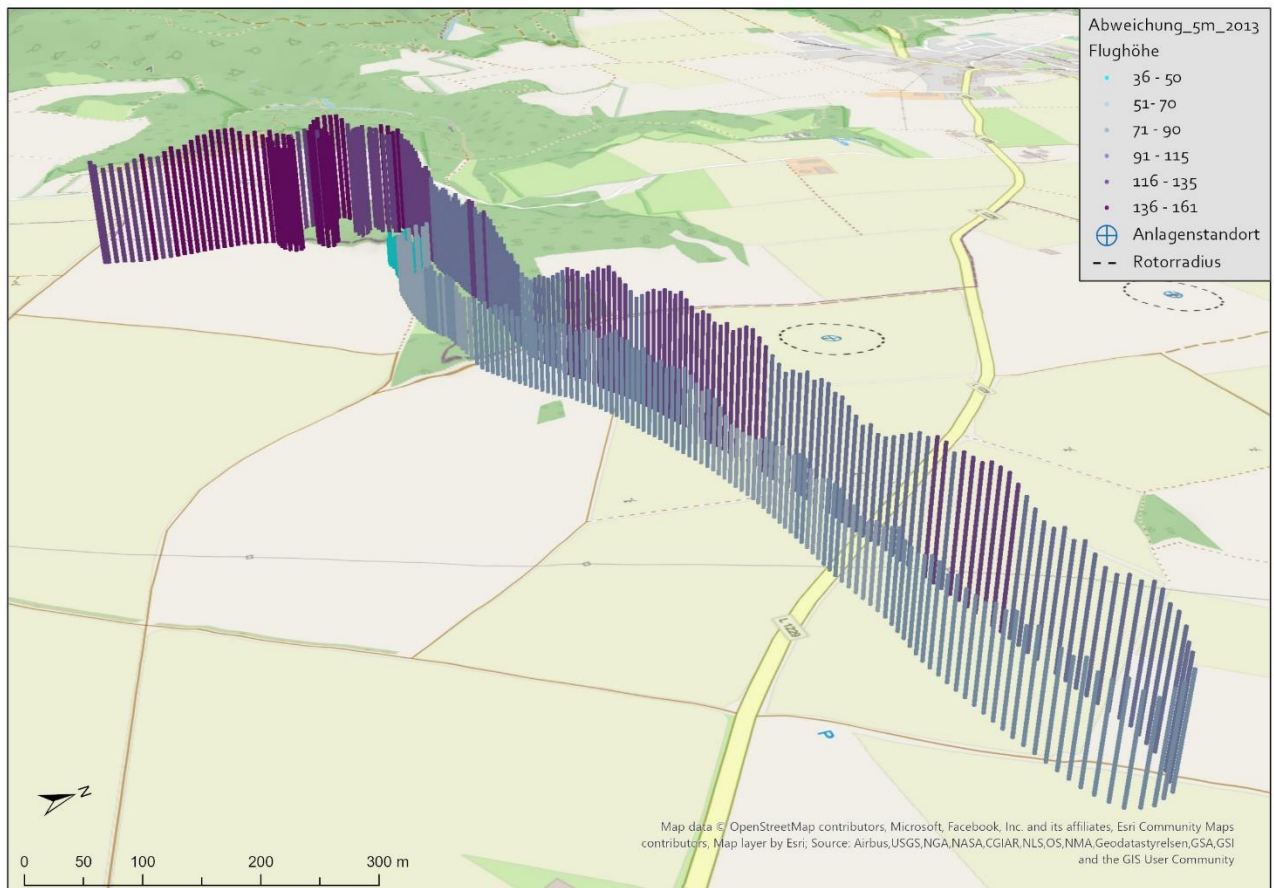


Abbildung 42: Beispiel einer Flugbewegung aus dem Jahr 2013 aus dem Süden des Untersuchungsgebietes mit anfangs zufällig zugeordneter Höhe und maximaler Abweichung von fünf Metern zwischen jedem Wegpunkt. Die Variation der Flughöhe ist geglätteter und füllt nicht den ganzen Wertebereich aus.

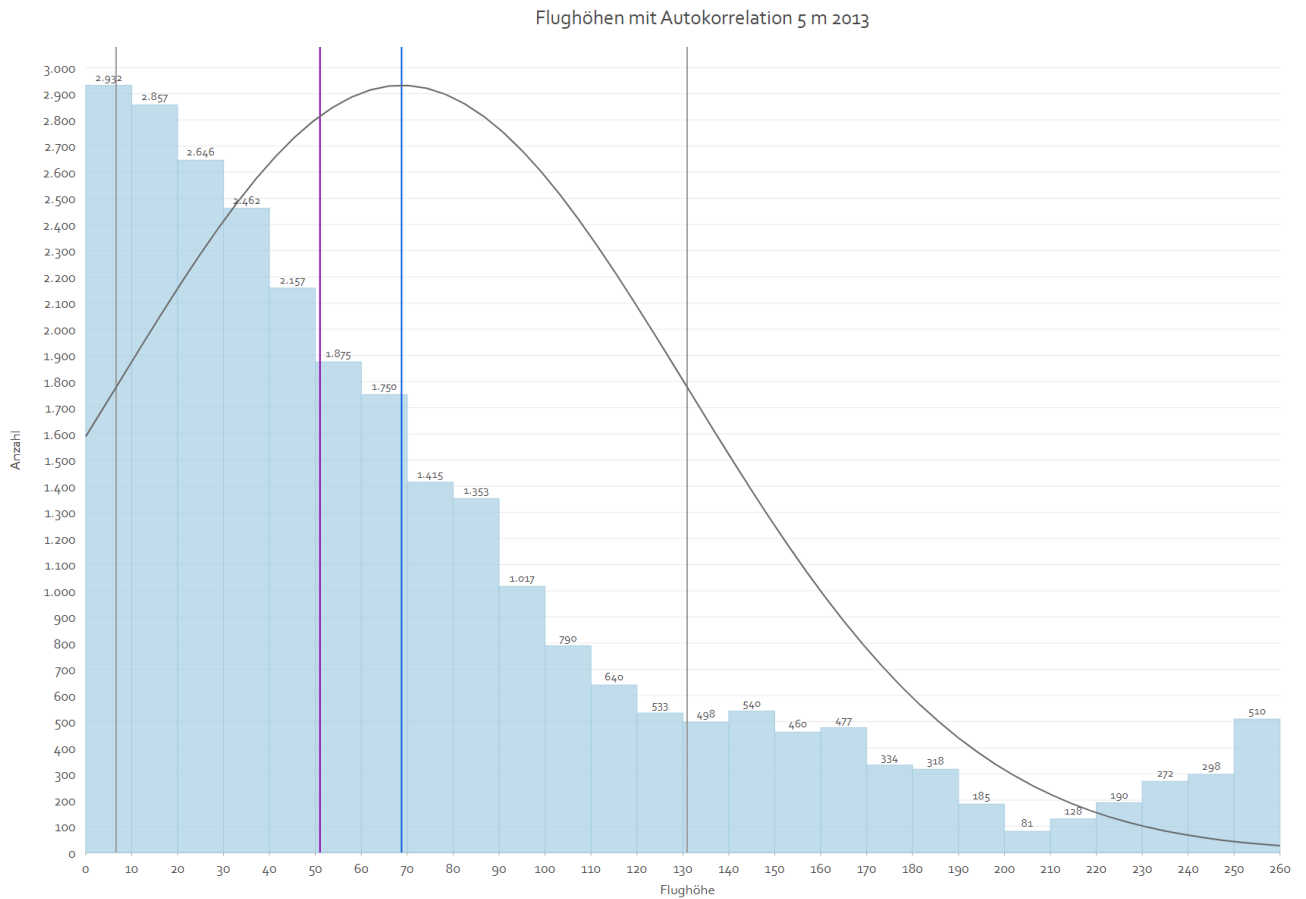


Abbildung 43: Die resultierende Verteilung bei einer Zuordnung mit max. 5 m Abweichung für das Jahr 2013 im Histogramm. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, graue Linien = Normalverteilung.

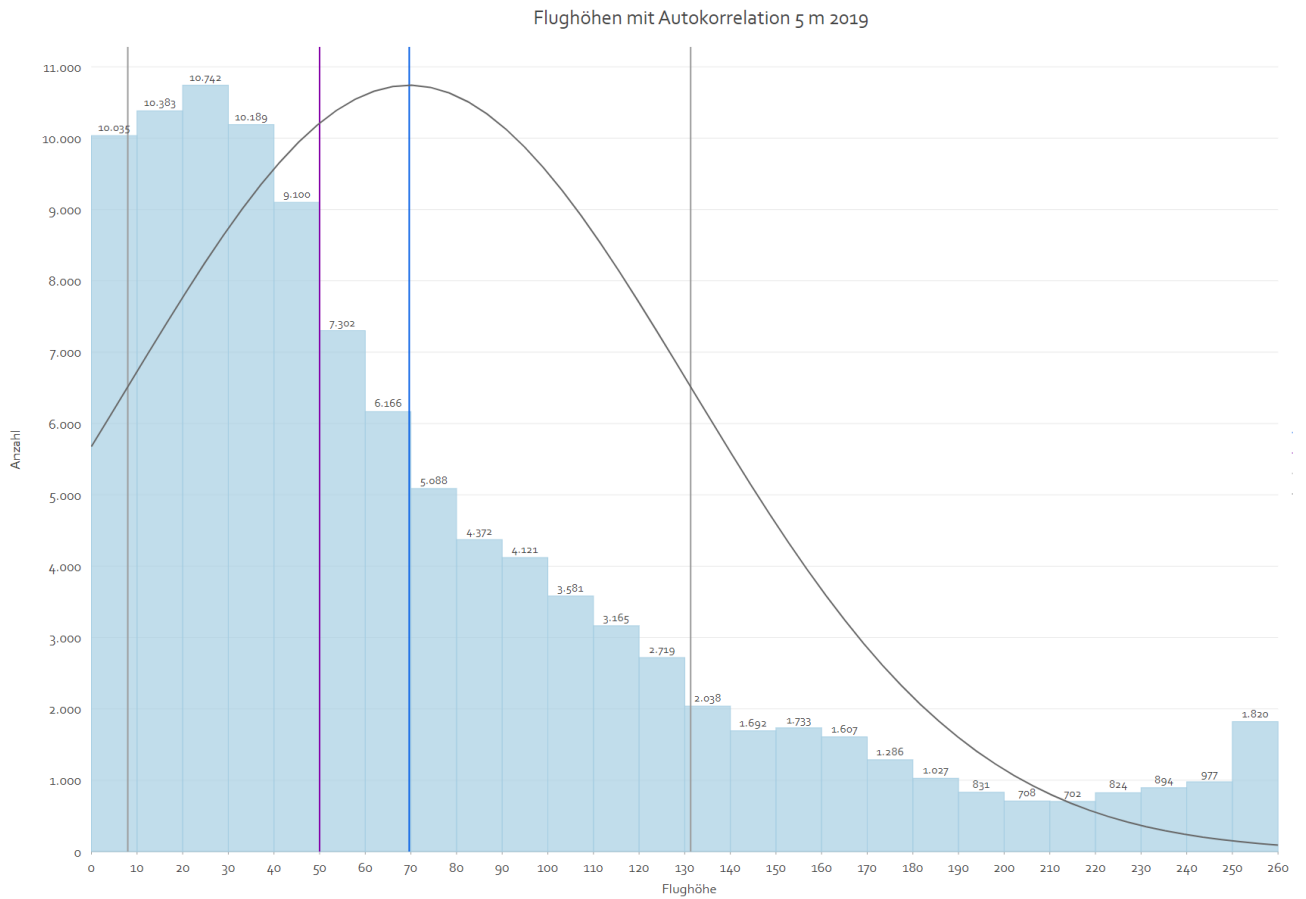


Abbildung 44: Die resultierende Verteilung bei einer Zuordnung mit max. 5 m Abweichung für das Jahr 2019 im Histogramm. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, graue Linien = Normalverteilung.

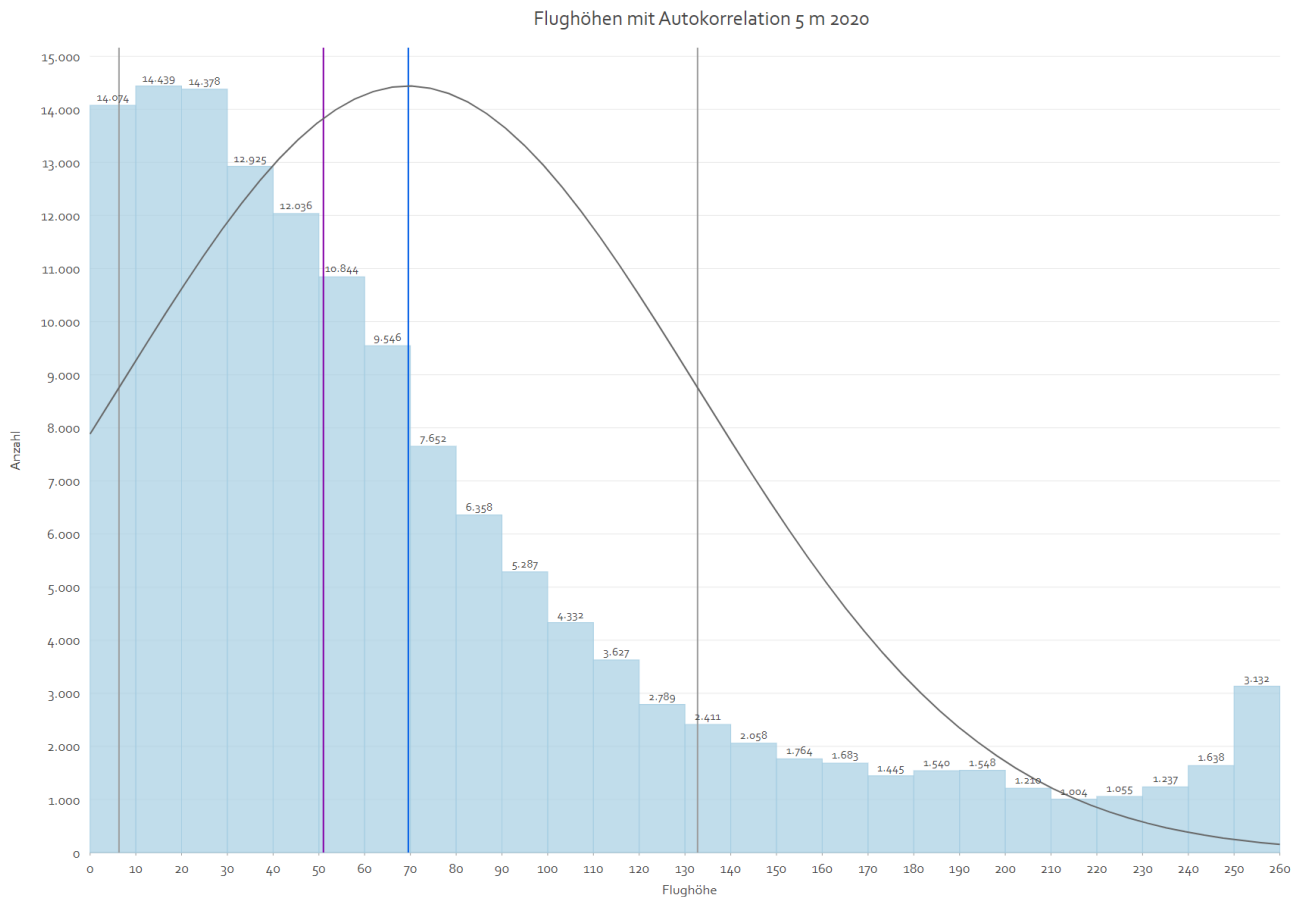


Abbildung 45: Die resultierende Verteilung bei einer Zuordnung mit max. 5 m Abweichung für das Jahr 2020 im Histogramm. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, graue Linien = Normalverteilung.

5.3 Randomisierte Zuordnung mit Autokorrelation, Abweichung 15 m

Die Ergebnisse der Zuordnung mit maximal 15 m Abweichung unterschieden sich untereinander deutlich mehr als bei den vorangegangenen Durchgängen (siehe Tabelle 7). Dieser Parameter führte zu einer starken Deviation gegenüber der ursprünglichen Verteilung in der Werteliste. Der Verlauf der Flugbewegungen gibt aber ein realistisches Bild ab (siehe Abbildung 46). Die Höhenverteilung tendierte mit steigender Punktzahl immer weiter in Richtung einer Normalverteilung. Die drei Kennzahlen Durchschnitt, Median und Standardabweichung stiegen über die drei Erfassungsjahre immer weiter an. Es ist anzunehmen, dass bei einer noch höheren Punktzahl der Durchschnitt irgendwann bei 130 m Flughöhe ü.G. liegen würde. Auch näherten sich Durchschnitt und Medianwert immer weiter an und würden bei höherer Abweichung oder höherer Punktzahl perspektivisch identisch liegen. Bei der Betrachtung der zugehörigen Histogramme zeigte sich auch ein

auffälliges Muster zwischen den Höhenklassen. Beginnend beim dritten *Bin* war jede dritte Klasse wesentlich geringer besetzt als die beiden vorangegangenen. Dieses Muster lässt sich vor allem innerhalb des Wertbereichs der Standardabweichung beobachten. Woher dieser Effekt rührt, ist nicht klar. Das Muster taucht aber in allen drei Erfassungsjahren in ähnlicher Form auf (Abbildung 47, Abbildung 48, Abbildung 49).

Tabelle 7: Statistische Kennzahlen der Zuordnungen mit maximal 15 m Abweichung. Die Höhenverteilung tendiert mit steigender Punktzahl immer weiter in Richtung einer Normalverteilung.

Erfassungsjahr	2013	2019	2020
Punkte	26.718	103.102	140.012
Durchschnittshöhe in m ü.G.	90,39	97,36	100,10
Medianhöhe in m ü.G.	75	81	90
Standardabweichung	72,55	73,96	75,32
min.	1	1	1
max.	260	260	260

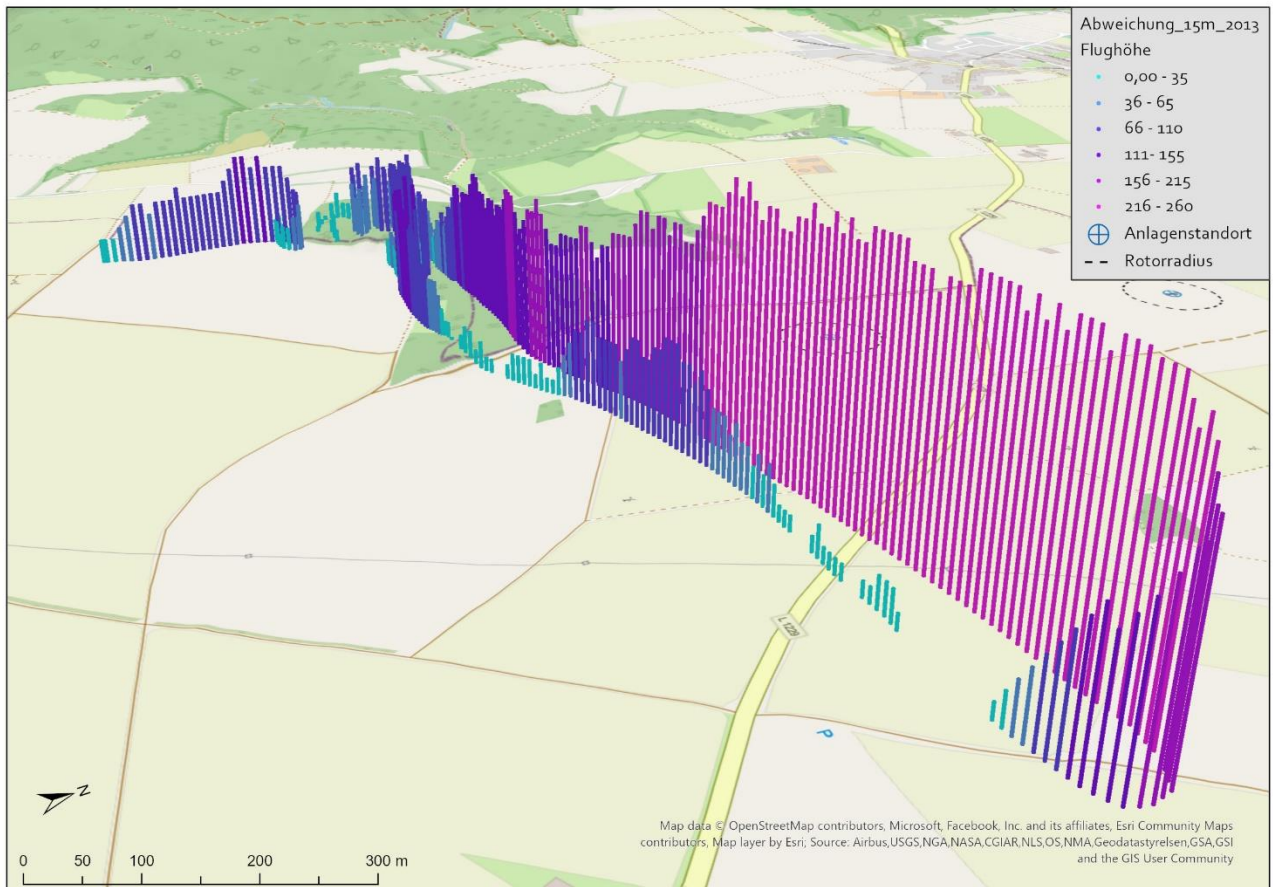


Abbildung 46: Beispiel einer Flugbewegung aus dem Jahr 2013 aus dem Süden des Untersuchungsgebietes mit anfangs zufällig zugeordneter Höhe und maximaler Abweichung von 15 Metern zwischen jedem Wegpunkt. Die Variation der Flughöhe ist weniger geglättet und füllt nahezu den ganzen Wertebereich aus. In diesem Fall verlief ein langer Abschnitt der Bewegung bei nahezu maximaler Höhe. Es treten aber auch einige Höhen von null Metern ü.G. auf.

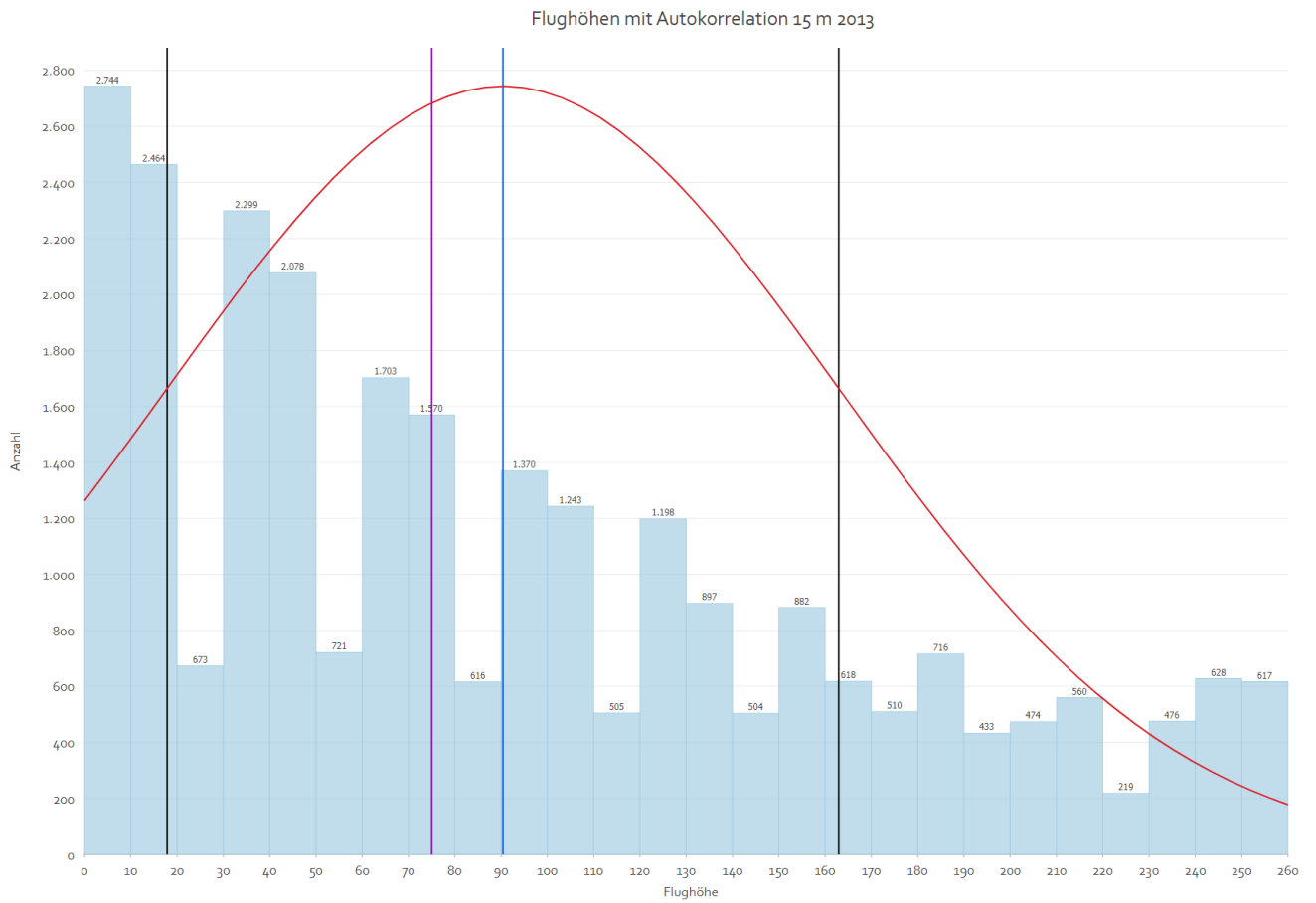


Abbildung 47: Graphik der resultierenden Verteilung mit maximal 15 m Abweichung für das Jahr 2013 im Histogramm. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie = Normalverteilung.

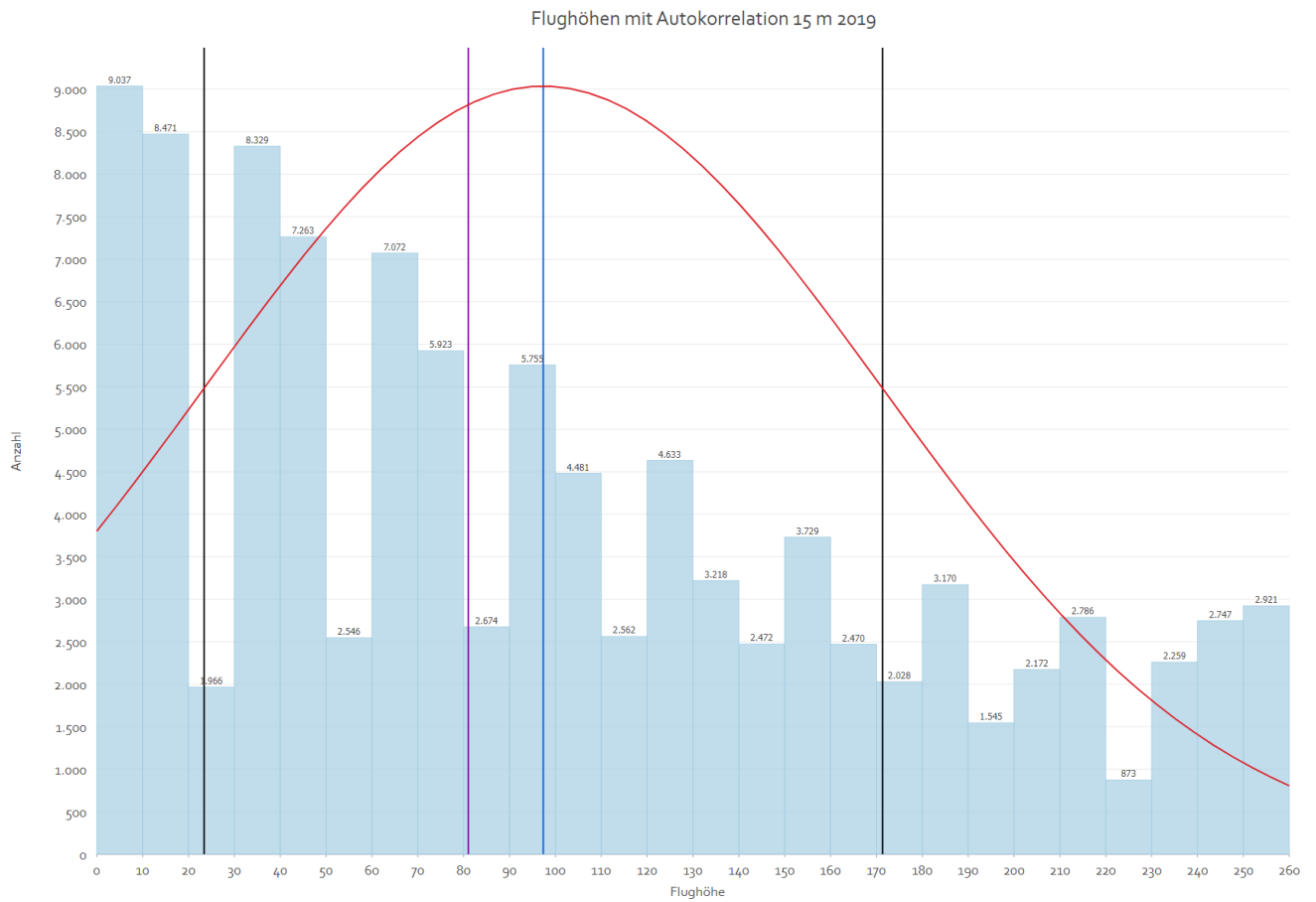


Abbildung 48: Graphik der resultierenden Verteilung mit maximal 15 m Abweichung für das Jahr 2019 im Histogramm. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie = Normalverteilung.

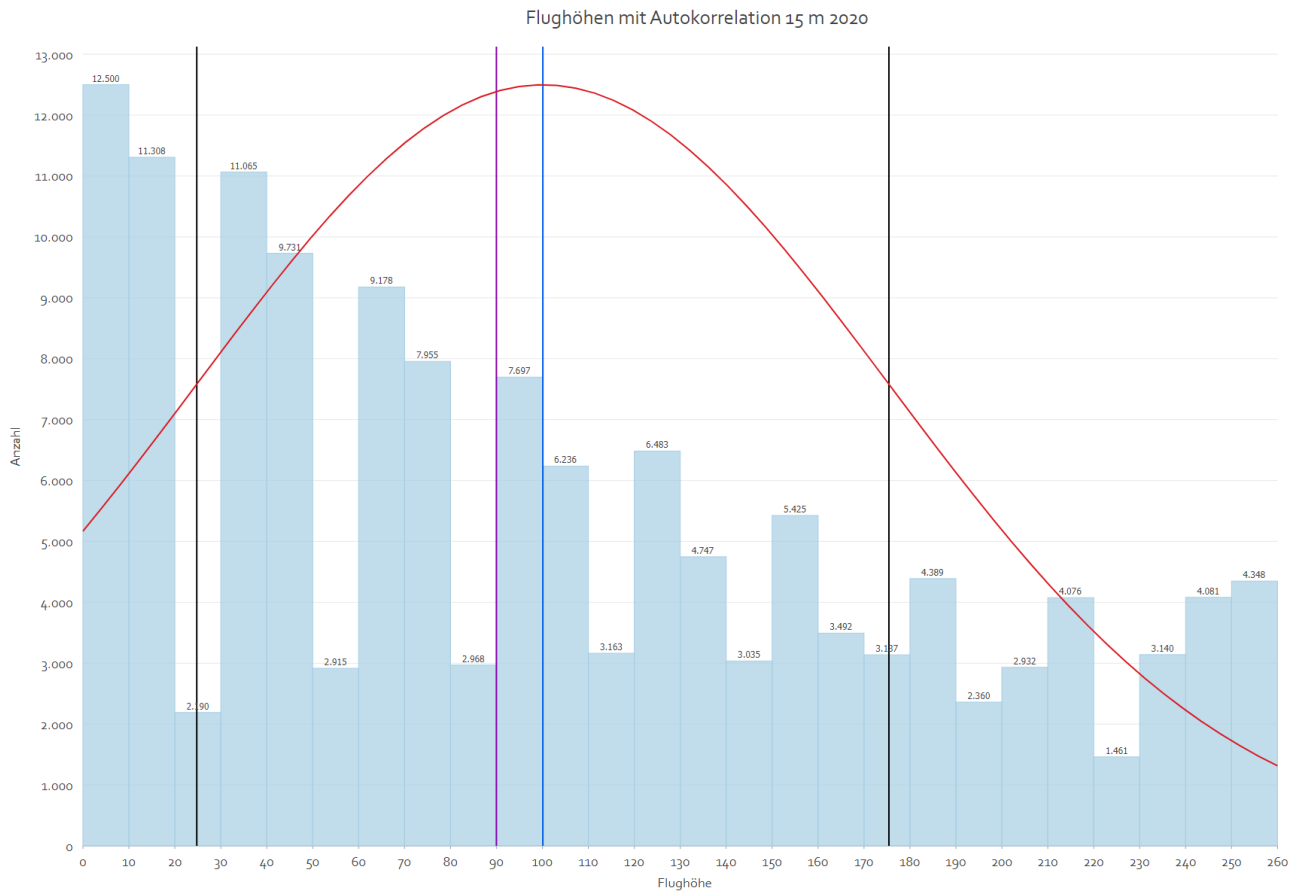


Abbildung 49: Graphik der resultierenden Verteilung mit maximal 15 m Abweichung für das Jahr 2020 im Histogramm. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie = Normalverteilung.

6. Diskussion

6.1 Ergebnisse und Verbesserungsansätze

In dieser Arbeit sollten zweidimensionalen Liniengeometrien von visuell erfassten Flugbewegungen durch probabilistische Methoden mit empirisch in einer Telemetriestudie gemessenen Flughöhen versehen werden, um so eine verbesserte Abbildung der dreidimensionalen Raumnutzung durch den Rotmilan zu gewinnen. Dieses Ziel ist in drei aufeinander aufbauenden Ansätzen mit Hilfe von dazu erstellten Python Skripts erreicht worden. Nach einer rein zufälligen Zuordnung aus einer Werteliste, die die beabsichtigte Werteverteilung so nah wie möglich abbildete, wurden Werte mit einem lokalen Autokorrelationskriterium von maximal fünf bzw. fünfzehn Metern Abweichung zugewiesen. Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Zuordnung von Flughöhen ein Kompromiss zwischen der Reproduktion der empirischen Höhenverteilung und den Freiheitsgraden der Flughöhenvariabilität gefunden werden muss. Eine rein zufällige Zuordnung aus der vordefinierten Liste reproduzierte die empirische Verteilung perfekt. Je lockerer danach der Abweichungsparameter bei der Autokorrelation eingestellt wurde, desto weiter entfernte sich das Ergebnis von der angestrebten Verteilung und tendierte zu einer Normalverteilung innerhalb des vergebenen Wertebereichs. Bei einer zulässigen Abweichung von bis zu 15 Metern traten außerdem auffällige Lücken in der Befüllung der Höhenklassen auf, für die keine Erklärung gefunden werden konnte. Dieses Dilemma würde sich möglicherweise durch Anpassungen am verwendeten Algorithmus abmildern oder sogar gänzlich lösen lassen. Die probabilistische Zuordnung von Flughöhen zu durch direkte Beobachtung gewonnenen Flugpfaden könnte eine Alternative zur vollständigen Modellierung von Flugbewegungen bieten. Bei der vollständigen Modellierung müssen zwar mehr Annahmen getroffen werden als bei den in dieser Arbeit vorgestellten probabilistischen Ansätzen, aber die aus RNA gewonnenen Daten haben ihre eigenen Einschränkungen und Ungenauigkeiten (Poessel et al., 2018, S. 2069). Wodurch sich die Frage stellt, ob die Qualität der erhobenen Daten den Aufwand der Zuordnung von Flughöhen überhaupt rechtfertigen, oder ob nicht vielmehr eine Betrachtung der Raumnutzung im Kontext der unterschiedlichen Habitategenungen im Vorhabenbereich und bezogen auf übliche Reviergrößen des Rotmilans im Rahmen einer HPA zielführender wäre.

In diesem Anwendungsbeispiel spielte die Orographie im Untersuchungsgebiet keine

wesentliche Rolle bei der Raumnutzung (siehe Abbildung 17). Es gab beispielsweise keine südexponierten Hänge, die besonders für Thermikflüge genutzt wurden. Den Flugpfaden wurden außerdem Höhen über Grund zugeordnet. Daher war keine Korrektur der Attributwerte im Hinblick auf das lokale Gelände nötig. Bei der Anfertigung einer auf diesen Daten basierenden dreidimensionalen Visualisierung oder Risikoanalyse sollte allerdings darauf geachtet werden, dass es sich bei den zugeordneten Höhen nicht um absolute Höhen handelt, sondern zur korrekten Abbildung immer ein lokales DGM nötig ist. Grundsätzlich lassen sich diese Methoden also auch auf Untersuchungsgebiete mit komplexerer Topografie anwenden.

Die Verwendung eines einfachen Durchschnittswerts aus den geschlechtlich distinkten Höhenverteilungen könnte durch eine getrennte Betrachtung verbessert werden. Informationen zum Geschlecht von Individuen waren aber nicht in den Daten aus den RNA enthalten.

Eine weitere Annahme bei der Bearbeitung der Fragestellung war die Kappung der Flughöhe auf maximal 260 Meter über Grund. Die Häufigkeitsverteilung jenseits von 250 Metern Flughöhe war aus den Ergebnissen der Telemetriestudie nicht mehr im Detail abzulesen. In Anbetracht der empirisch beobachteten Höhenverteilung erscheint diese Kappung als akzeptabel. Eine Alternative dazu wäre die händische Anpassung der Höhenverteilung im oberen Wertebereich gewesen. Die Kappung diente aber auch zur Vereinfachung der Zuordnung von Flughöhen.

Zur besseren Übertragung der erhobenen Flugcharakteristik des Rotmilans in der Höhe könnte man eine vertiefte Auswertung der Flugtrajektorien aus der Telemetriestudie von Pfeiffer und Meyburg (2022) vornehmen. Dazu wäre beispielsweise die Durchführung einer Variogrammanalyse mit *moving window* denkbar, um die Semivarianz der Flughöhen innerhalb einzelner Flugbewegungen zu ermitteln. Ähnliches wäre auch im Hinblick auf den Einfluss der Tageszeit auf die Flughöhen denkbar. Den Ausgangsdaten aus den RNA im Untersuchungsgebiet lagen allerdings keine durchgängigen Angaben zur Tageszeit bei. Der Einfluss der Tageszeit auf Raumnutzung und Flughöhe würde sich ebenfalls aus den Rohdaten der Telemetriestudie quantifizieren lassen (siehe Abbildung 50). Bei zukünftigen

Erfassungen muss daher mehr Wert auf eine konsequente Notierung aller relevanten Attribute gelegt werden, um alle Möglichkeiten bei der Auswertung zu gewährleisten.

Im Prozess der Erstellung des Python Scripts wurde anfangs auch ein Ansatz verfolgt, der einer Ziehung aus der Werteliste ohne Zurücklegen gleichgekommen wäre. Das führte in der Konsequenz aber zu einer unweigerlichen Leerung der Liste und gegen Ende der Prozessierung wären die Diskrepanzen in den Flughöhen zwischen zwei Wegpunkten potenziell auf den Wertebereich der zugrundeliegenden Liste (0 m - 260 m) angewachsen. Diese Diskrepanzen hätten dann wieder mit Hilfe eines Filters ausgeschlossen werden müssen, wobei wiederum ein Grenzwert für die maximal zulässige Abweichung hätte festgelegt werden müssen. Es zeigte sich aber, dass auch eine Ziehung mit Zurücklegen die angestrebte Gesamtverteilung bei eher enger Fassung des Abweichungskriteriums ebenso gut abbildete und die in der Realität eher geglätteten Flugtrajektorien wesentlich besser nachahmte, ohne Werte aussortieren zu müssen (siehe Abbildung 50).

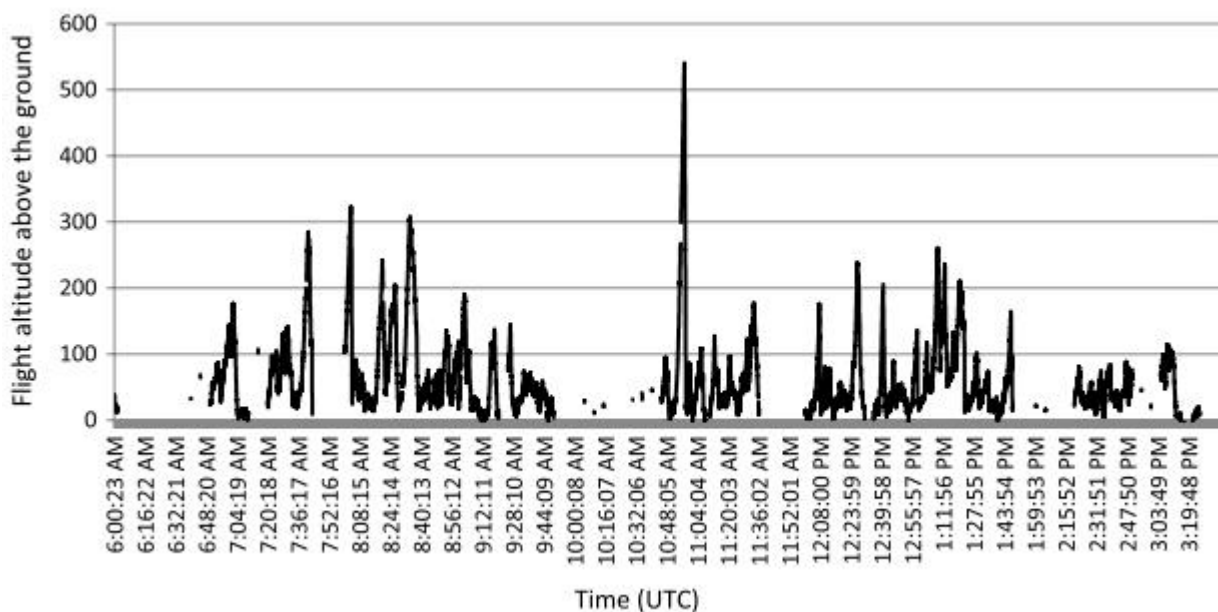


Abbildung 50: Beispielhafter Verlauf einer durch Telemetrie erfassten Flugbewegung eines Rotmilans. Oben als 3D-Darstellung und unten als graphische Darstellung mit abgetragenem Höhenverlauf über die Tageszeit. Entnommen aus (Pfeiffer & Meyburg, 2022).

6.2 Perspektivischer Windkraftausbau und Kollisionsrisiko

Wie bereits in der Einführung zu dieser Arbeit und in Kapitel 3.1 dargestellt, findet die überwiegende Mehrzahl von Flugbewegungen des Rotmilans während des Aufenthalts im Brutgebiet in einem Höhenbereich bis 80 m ü.G. statt. Nach Pfeiffer und Meyburg (2022) liegen 69,5 % der Flugbewegungen von männlichen Rotmilanen in diesem Bereich. Bei weiblichen Exemplaren sind es sogar 85,0 %. Nach der Berechnung eines einfachen Durchschnitts ($69,5 + 85,0 / 2 = 77,25$) lässt sich also die gesicherte Aussage treffen, dass

abhängig vom Anlagentyp nur 22,75 % aller Flugbewegungen von Rotmilanen aufgrund der Flughöhe im dreidimensionalen Raum überhaupt für eine Betrachtung von Kollisionsrisiken mit Windkraftanlagen in Frage kommen (siehe Abbildung 15). Das gilt jedenfalls für moderne Anlagen, deren Abmessungen hinsichtlich Rotordurchmesser und Nabenhöhe eine Rotorunterkante von etwa 80 m ü.G. aufweisen.

Betrachtet man dazu beispielweise die bisher in Baden-Württemberg in Betrieb gegangenen Windkraftanlagen wird deutlich, dass etwa die Hälfte aller errichteten WEA dieses Kriterium erfüllen (siehe Abbildung 51). Die andere Hälfte besteht aus älteren und damit in aller Regel sowohl in Bezug auf die Nabenhöhe als auch auf den Rotordurchmesser kleineren WEA. Diese zweite Hälfte der bestehenden Anlagen macht allerdings nur 39 % der installierten Leistung aus. Der Anteil an der tatsächlich eingespeisten elektrischen Leistung wird dabei wahrscheinlich noch niedriger sein. Eine genaue Auswertung dazu wäre jedenfalls interessant.

Der Zubau von neuen Windkraftanlagen in Baden-Württemberg findet seit den Jahren 2012/2013 so gut wie ausschließlich mit Modellen statt, deren Rotorunterkante höher als 80 m ü.G. liegt (siehe Abbildung 52). Da die seit den frühen 2000er Jahren errichteten Anlagen langsam das Ende ihrer Lebensdauer erreichen und wo immer möglich durch modernere Anlagen ersetzt werden, wird der Anteil von Anlagen mit Rotorunterkanten von ca. > 80 m ü.G. am Anlagenpark in Baden-Württemberg in Zukunft immer weiter steigen. Dadurch wird sich sowohl der Anteil an Erneuerbarem Strom im Netz erhöhen als auch das Kollisionsrisiko für viele Vogelarten verringern.

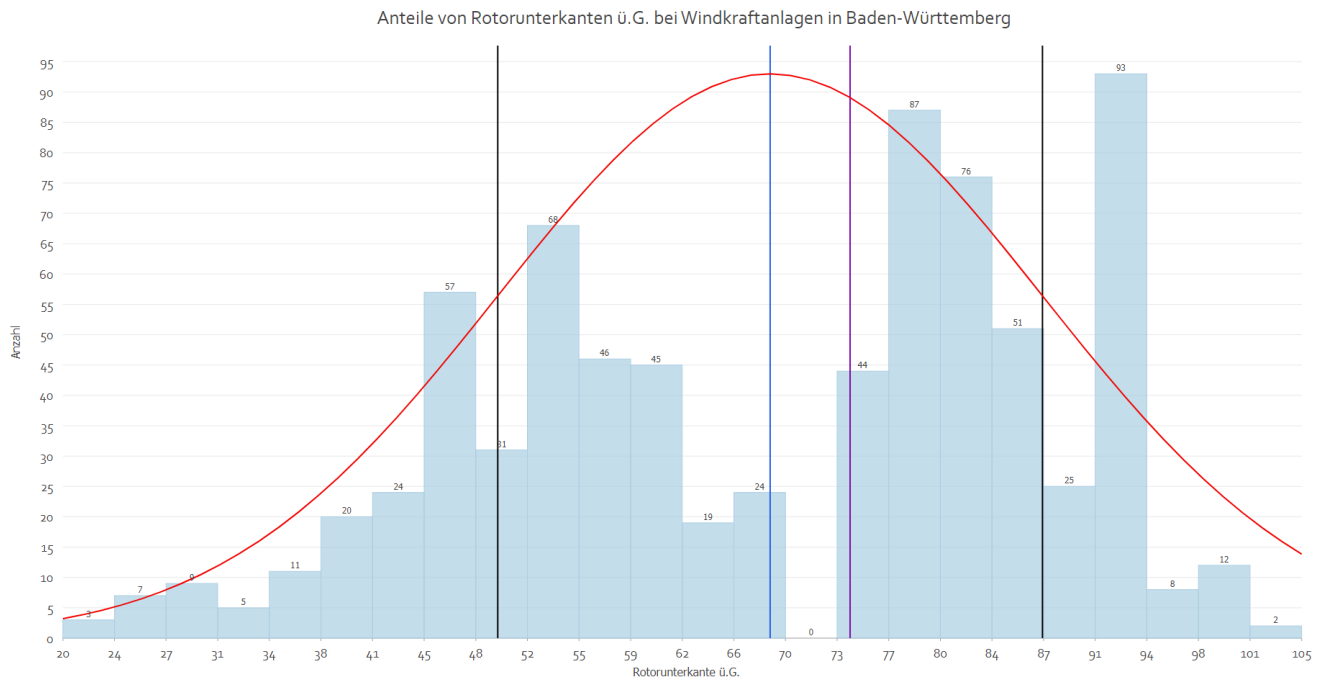


Abbildung 51: Höhen der Rotorunterkanten von bestehenden Windkraftanlagen in m ü.G. für Baden-Württemberg Stand 07/2023 im Histogramm. Etwa 53,8 % aller Anlagen weisen eine Rotorunterkante auf, die kleiner als 78 m ist. Deren Anteil an der installierten Leistung beträgt aber nur 39 % (eigene Darstellung, Datengrundlage: <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de>, abgerufen am 25.07.2023).



Abbildung 52: Höhen der Rotorunterkanten in m ü.G. von Windkraftanlagen in Baden-Württemberg nach dem Jahr ihrer Inbetriebnahme (eigene Darstellung, Datengrundlage: <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de>, abgerufen am 25.07.2023).

6.3 HPA statt RNA?

Ein großer Nachteil der direkten Beobachtung von Greifvögeln ist die mangelnde Unterscheidbarkeit von Individuen im Untersuchungsraum, wie sie bei der Erfassung von Flugbewegungen im Rahmen von Telemetriestudien möglich ist. Höchstens bei beobachteten Ein- und Ausflügen an Horstbäumen können einzelne Tiere unter Umständen einem konkreten Revier zugeordnet werden. Daher sind keine detaillierten Erkenntnisse zur individuellen Raumnutzung oder tatsächlichen Reviergrößen möglich. Es wird lediglich die kollektive Raumnutzung erfasst. Auch der Betrachtungsmaßstab reicht nicht aus, um die Raumnutzung eines Rotmilans in den ohne Weiteres üblichen Aktivitätsbereichen von über 60 km² mit wenigen menschlichen Beobachtern repräsentativ zu überwachen (siehe Kapitel 2.2.5). Die Flugbewegungen in den Ergebniskarten der RNA wirken daher an den Rändern der Kartierungsgrundlage seltsam abgehackt und die Raumnutzung im Maßstab des gesamten Reviers bleibt unberücksichtigt. Da zudem menschliche Beobachter die Flugbewegungen von festen Beobachtungspunkten aus mit Hilfe von optischen Hilfsmitteln aufzeichnen, besteht weiterhin das hohe Risiko, dass die Raumnutzung konzentrisch um die Standpunkte herum überschätzt wird. Zwar konnten in diesem konkreten Anwendungsfall die Windkraftanlagen selbst als optische Referenzobjekte dienen, Flugbewegungen vor dem ansonsten leeren Horizont sind dagegen wesentlich schwerer in der Ebene und der Höhe zu fixieren. Diese methodischen Schwächen lassen sich nicht quantitativ bewerten und daher auch nicht systematisch ausgleichen (Ferrer et al., 2012, S. 44; Jenkins et al., 2018). Auch der Zuschnitt des Untersuchungsraums könnte Einfluss auf die Aufzeichnung der Flugbewegungen in der physischen Kartengrundlage haben.

Die Bedeutung der konkreten Umweltbedingungen und Faktorenkonstellationen für eine aussagekräftige Bewertung des Tötungsrisikos durch Windkraftanlagen hat in jüngster Zeit auch Eingang in die behördliche Genehmigungspraxis gefunden. In Baden-Württemberg besteht ab 2021 die Möglichkeit, statt einer herkömmlichen RNA eine Habitatpotentialanalyse (HPA) für den Rotmilan durchzuführen. Die Einführung der HPA zur artenschutzrechtlichen Bewertung einer Windkraftplanung erscheint wesentlich zielführender als die bis dahin gebräuchlichen Raumnutzungsanalysen ohne konkrete quantitative Kriterien zur Bewertung eines signifikanten Tötungsrisikos. Die Wahl der passenden Bewertungsgrundlage richtet sich dabei nach Anzahl und Entfernung der

kartierten Horste zu den geplanten Anlagen. Dabei sind für alle als windkraftempfindlich eingestuftten Arten Mindestabstände für Windkraftanlagen zu kartierten Revieren sowie Habitatpräferenzen aufgeführt.

Für den Rotmilan ist ein so genannter Nahbereich von 300 m um kartierte Horste, einschließlich in den letzten drei Jahren besetzter Wechselhorste, als Tabuzone für die Windkraftnutzung festgelegt (LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, 2021). Es wird davon ausgegangen, dass die Häufigkeit der zu erwartenden Flugbewegungen in unmittelbarer Nähe des Horstes ein signifikant erhöhtes Tötungsrisiko auslöst. Dabei sei an dieser auf die gleichlautenden Erkenntnisse von Schaub (2012) zum Kollisionsrisiko in Abhängig von Anlagendichte und Entfernung verwiesen. Bei Abständen < 1.000 m zwischen Fortpflanzungsstätte und geplanter WEA wird von Seiten der Genehmigungsbehörde ein signifikant erhöhtes Tötungsrisiko nach § 44 Abs. 1 BNatSchG angenommen, dass aber durch Erstellung einer Habitatpotentialanalyse ggf. in Verbindung mit einer vollwertigen Raumnutzungsanalyse ausgeräumt werden kann (LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, 2021). Zeigen diese Gutachten etwa eine durchschnittliche Raumnutzung im Vorhabenbereich, müssen geeignete Ausgleichs- und Vermeidungsmaßnahmen als Auflage zur Genehmigung akzeptiert werden, um das Vorhaben zur Umsetzung zu bringen. Liegen bis zu sieben Reviere mit Brutpaaren in einem Radius von 3,3 km um eine geplante WEA aber keines davon innerhalb von 1.000 m reicht eine HPA mit belegter durchschnittlicher oder unterdurchschnittlicher Habitateignung im Vorhabenbereich aus, um die Zulässigkeit zu belegen. Bei mehr als sieben Revierpaaren in einem Umkreis von 3,3 km wird von einem für die Population bedeutsamen Revierzentrum ausgegangen, in dem keine Windkraftnutzung zulässig ist (LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, 2021). Die Methodik der HPA stützt sich auf viele wissenschaftlich belegte Charakteristika des Rotmilans, die zum Teil in vorangegangenen Abschnitten erläutert wurden und wird hauptsächlich über GIS-Analysen öffentlich zugänglicher Daten in Büroarbeit bewerkstelligt. Dabei spielen die Landnutzungen im Vorhabenbereich eine wichtige Rolle.

Der wichtigste Vorteil der HPA gegenüber der RNA ist der größere Untersuchungsraum. Dieser wird gebildet, indem um alle kartierten sowie im Erfassungsjahr besetzten Rotmilanhorste in einem Radius von drei Kilometern um geplante Windkraftanlagen

wiederum ein Radius von drei Kilometern gezogen wird (siehe Abbildung 53). Innerhalb dieses Bereichs wird die Landnutzung über öffentliche Daten, beispielsweise Open Street Map, ermittelt und nach der Attraktivität für den Rotmilan bewertet (LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, 2021). Dieser Betrachtungsmaßstab ist besser geeignet, um die Raumnutzung innerhalb des Reviers abzuschätzen, als die kleinräumige Erfassung von Flugbewegungen in einem Radius von 1.000 m um die geplanten Anlagen. Es wird auch deutlich, wo die geplanten Anlagen in Relation zu den wahrscheinlichen Nutzungsschwerpunkten der Tiere liegen. Diese werden gemäß den Erkenntnissen zum Jagdverhalten des Rotmilans zwischen den Fortpflanzungsstätten und den attraktiven Nahrungshabitaten im Offenland, an Waldrändern und an Ortsrandlagen verlaufen. Das intensive Überfliegen von großen Waldflächen, geschlossenen Siedlungen und anderen weniger attraktiven Bereichen wird dagegen eher die Ausnahme bleiben. Eine Bewertung der Auswirkungen eines Vorhabens auf dieser Grundlage erscheint wesentlich sinnvoller als die Aufzeichnung einzelner Flugbewegungen auf einer in Relation zu den üblichen Aktivitätsradien von Rotmilanen relativ kleinen Fläche unmittelbar um die geplanten Standorte.

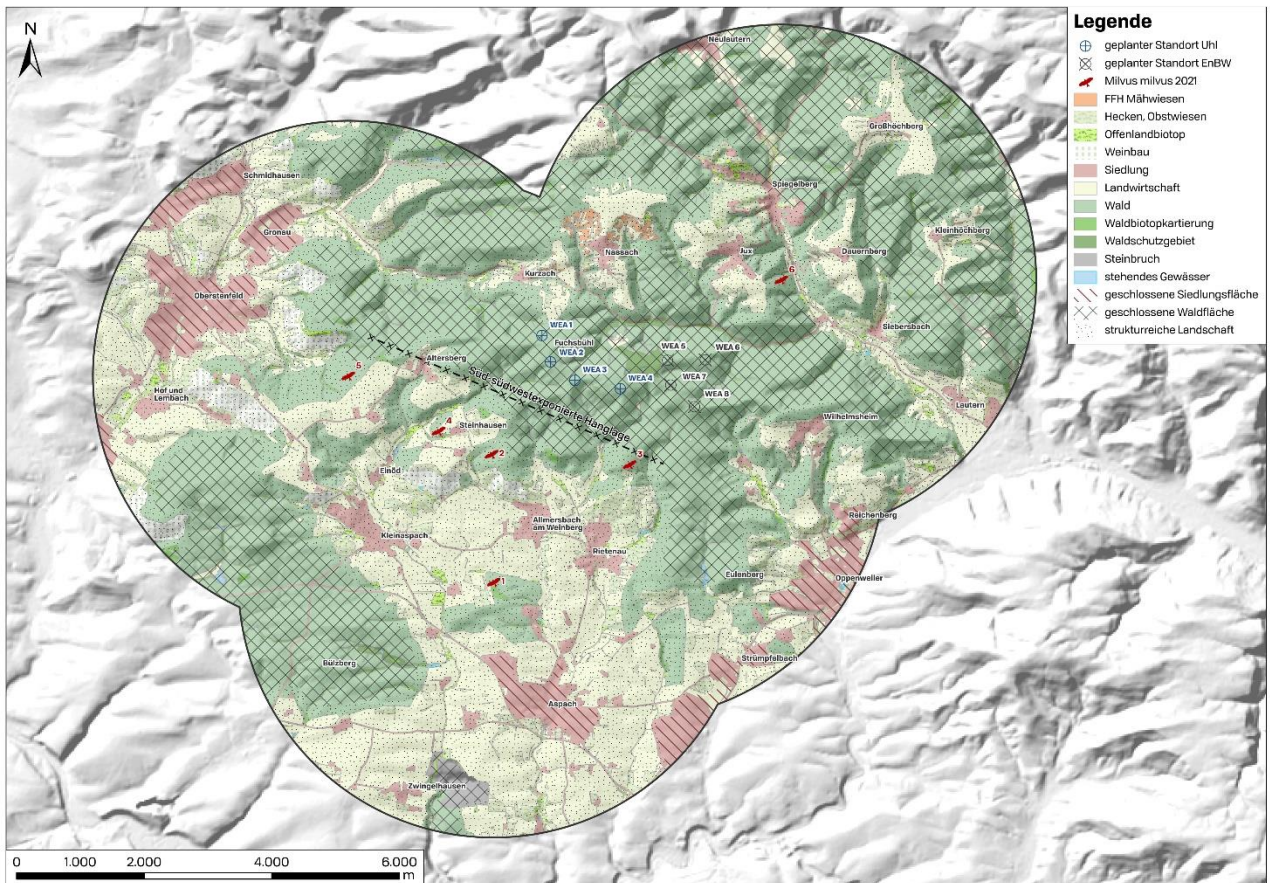


Abbildung 53: Analyse von Landnutzungen im Rahmen einer HPA für den Rotmilan. Diese soll dazu dienen, die zu erwartende Raumnutzung zwischen Fortpflanzungsstätten und Nahrungshabitaten abzuschätzen. Auch Landschaftselemente wie sonnenexponierte Südhänge mit überdurchschnittlicher Raumnutzung werden dabei berücksichtigt (Quelle: eigene Darstellung, Datengrundlage: Open Streetmap).

7. Fazit

Die probabilistische Zuordnung von Flughöhen ist prinzipiell geeignet, um eine gemessene Flughöhenverteilung auf Wegpunkte von erhobenen Flugpfaden anzuwenden. Dabei muss ein Kompromiss zwischen der akkuraten Abbildung der gewünschten Verteilung und einem im Ergebnis realistischen Flugbild gefunden werden. Eine rein zufällige Zuordnung, die aber streng der vorgegebenen Verteilung folgt, produziert keine geglätteten Flugverläufe wie sie bei Rotmilanen in der Natur zu beobachten sind. Die Extrema aus der Werteliste können direkt aufeinanderfolgend mit einem horizontalen Abstand von zehn Metern auftreten. Mit Ausnahme eines schnellen Sturzflugs zur Jagd am Boden kommen solche Bewegungen nicht vor. Eine derart schnelle Steigerung der Flughöhe ist auch unter Nutzung von Aufwinden völlig ausgeschlossen. Mit der Einführung einer Beschränkung der maximalen

Abweichung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wegpunkten eines Flugpfads wird es etwas schwieriger die angestrebte Gesamtverteilung abzubilden. Anhand der statistischen Kennzahlen ist eine Tendenz zur Normalverteilung innerhalb des vorgegebenen Wertebereichs zu beobachten. Bei maximal fünf Metern Abweichung erscheinen die Flugpfade auf eine Höhenregion beschränkt. Bei günstigen thermischen Bedingungen mit thermischem Auftrieb wäre ein solches Muster auch in der Realität so zu beobachten. Bei maximal 15 Metern Abweichung zwischen zwei zehn Meter voneinander entfernten Wegpunkten gleichen sich die statistischen Kennzahlen noch weiter der Normalverteilung an, wobei eine höhere Punktzahl das Phänomen zusätzlich verstärkt. Der Verlauf der Flugbewegungen würde beispielweise zu einer turbulenten atmosphärischen Situation passen, bei der viel zusätzlicher Auftrieb durch orographische Winde zur Verfügung steht. Bei einer Vertiefung der Methoden aus dieser Arbeit müsste eine Lösung für dieses Dilemma gefunden werden.

In Anbetracht der Datenherkunft der verwendeten Flugpfade und deren inhärenten geometrischen Ungenauigkeiten stellt sich weiterhin die Frage, ob nicht doch die vollständige Modellierung aller Achsen von Flugbewegungen der geeignetere Weg ist, die Raumnutzung im dreidimensionalen Raum zu beschreiben. Um das zu bewerkstelligen, müsste allerdings eine genauere Analyse der Rohdaten aus der Telemetriestudie erfolgen, um die Einflüsse von Tageszeit, Witterung, Geschlecht und Jahreszeit möglichst genau einbeziehen zu können. Danach könnte eine Modellierung der Raumnutzung in einem Untersuchungsgebiet unter Berücksichtigung der Landnutzung über den Verlauf der Brutperiode stattfinden. Die Ergebnisse der Modellierung könnten dann zumindest im Hinblick auf die zweidimensionale Lage mit erhobenen Daten aus RNA abgeglichen werden, um ein solches Modell lokal zu validieren.

Die beschriebenen Schwachpunkte von aktuell durchgeführten RNA lassen sich möglicherweise in Zukunft durch die Nutzung von automatisierten kamerabasierten Detektionssystemen wie DTBird umgehen. Diese Systeme könnten die Erfassung von Flugbewegungen im Vorfeld der Errichtung von WEA wesentlich verbessern. Sie bieten aber auch die Möglichkeit im Betrieb zur Anlagensteuerung eingesetzt zu werden. So könnten Anlagen bei unmittelbar bevorstehenden Rotordurchflügen im Notfall abgeschaltet oder

gebremst werden. Daher stellt sich die Frage, wie sinnvoll die Durchführung sowohl von RNA als auch HPA in Zukunft noch sein werden. Die wahrscheinlich in naher Zukunft bevorstehende Einführung von funktionierenden automatischen Detektionssystemen in Verbindung mit einer situativen Abschaltung von einzelnen Anlagen zur Vermeidung von Kollisionen würde die Relevanz von EIA jeglicher Art deutlich reduzieren. Diese könnten dann allenfalls noch dazu dienen, die Notwendigkeit der Installation solcher Systeme an einzelnen Anlagen oder ganzen Windparks nachzuweisen.

Auch die perspektivische Entwicklung in der Struktur des Anlagenbestands weist aufgrund der technischen Entwicklung und unter rein ökonomischen Gesichtspunkten in eine Richtung, die im Ergebnis zu geringeren Kollisionsrisiken bei Flügen von Vögeln bis ca. 80 m ü.G. führen wird. Möglicherweise werden aber höhere Anlagen verstärkt ein raumwirksames Hindernis für Zugvögel darstellen, die sich auf der Wanderung in Höhen zwischen 80 m und 300 m ü.G. bewegen.

Es stellt sich auch insgesamt die Frage der Bedeutung von Verlusten durch Windkraftanlagen für die Bestandsentwicklung betroffener Arten. Denn die Auswirkungen von eintretenden Kollisionen mit Windkraftanlagen auf die Populationsentwicklung von Greifvögeln und speziell dem Rotmilan sind nicht sicher nachgewiesen. Dagegen ist sehr wohl bekannt, dass einerseits die intensivere landwirtschaftliche Nutzung die Nahrungsgrundlage von Rotmilanen immer weiter einschränkt und andererseits Vergiftungen verschiedenster Art zu prozentual an der Gesamtsterblichkeit bemessen, beträchtlichen Individuenverlusten führen. Diese beiden Faktoren haben mit einiger Sicherheit einen wesentlich höheren Einfluss auf die Entwicklung der Population als die Kollision mit anthropogenen Strukturen im Allgemeinen und Windkraftanlagen im Besonderen.

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anzahl von Windkraftanlagen im Betrieb pro Jahr für das Land Baden-Württemberg. (Quelle: <http://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/erneuerbare-.....> - 9 -

Abbildung 2: Beringung eines kleinen Singvogels. Auf dem Ring befindet sich eine Identifikationsnummer sowie eine Kurzadresse. Zu dieser können zukünftige Finderinnen den Ring senden (Quelle: NABU/Guido Rottmann). - 13 -

Abbildung 3: Ein ausgewachsener Rotmilan im Flug. Die charakteristische Musterung der Flügelunterseiten ist gut zu erkennen. Dabei sind die Federspitzen der Handschwingen schwarz und die Fläche der Tragschwingen weiß-gräulich gefärbt. Der Kopf erscheint weiß. Auch die markanten V-förmigen Schwanzfedern fallen auf (Bild von Wolfgang Eckert auf Pixabay, abgerufen am 20.05.2023). - 20 -

Abbildung 4: Ein Rotmilan in sitzender Position. Die mehrfarbigen Federn bilden ein prachtvolles Muster. Der weißliche Kopf mit gelbem Schnabel und schwarzer Spitze ist in der Nahaufnahme gut zu erkennen (Bild von Bundschatten auf Pixabay, abgerufen am 20.05.2023). - 21 -

Abbildung 5: Nach AVV-Kennzeichnung sind für Windkraftanlagen über 100 m Gesamthöhe sowohl eine Tagkennzeichnung mit roten Streifen (links) als auch eine Nachtkennzeichnung mit roten Blinkleuchten (rechts) vorgeschrieben. Die Tagkennzeichnung der Rotorblätter kann die visuelle Erkennung der Anlagen für Vögel erleichtern, während die künstliche Befeuerung nachteilige Effekte auf Zugvögel haben kann (entnommen aus: <https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/V136-4-2-MW>). - 34 -

Abbildung 6: Zeichnerische Darstellung des Maschinenhauses einer Windkraftanlage des Typs Vestas V136. Zu sehen sind die Leuchten der Nachtkennzeichnung und weitere Baugruppen einer WEA. Für Kollisionen von Greifvögeln sind besonders die Rotorblätter ein maßgeblicher Faktor (Entnommen und verändert aus <https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/V136-4-2-MW>). - 35 -

Abbildung 7: Ablauf des Planungsprozesses zur Ausweisung von Vorranggebieten für die Windkraftnutzung auf Ebene eines deutschen Regionalverbands. Die Umsetzung wird zum größten Teil über GIS gestützte Analysen bewerkstelligt, in die Daten aus vielfältigen

Quellen eingearbeitet werden (Kist et al., 2023)..... - 36 -

Abbildung 8: Schematisches Windparklayout für sechs Anlagen mit 172 m Rotordurchmesser. Zu erkennen sind Ausrichtung und Größe der Turbulenzellipsen, die den Abstand der WEA untereinander bestimmen. Überschneidungen der Ellipsen sind dabei möglich aber nicht erwünscht, da sie sich ertragsmindernd auswirken. Durch eine zu enge Platzierung sinkt die Effizienz der Anlagen im Windschatten, die sich im sogenannten Parkwirkungsgrad ausdrückt. Bei einer angenommenen Hauptwindrichtung aus west-süd-west erleiden also die Anlagen 4, 5 und 6 Ertragsminderungen gegenüber den frei angeströmten Anlagen 1, 2 und 3 (eigene Darstellung). - 41 -

Abbildung 9: Schematisches Windparklayout für sechs WEA mit 112 m Rotordurchmesser. Zu erkennen sind die geringeren Abstände zwischen den Standorten im Vergleich zu den größeren Anlagen. Greifvögel, die sich innerhalb dieses Windparks bewegen, haben ein höheres Risiko mit einer Anlage zu kollidieren, da erstens weniger Freiraum zum Manövrieren bleibt und weil die kleineren Anlagen in aller Regel niedrigere Nabenhöhen aufweisen als größere Anlagen. Dafür nimmt das Gesamtgebilde eine kleinere Fläche ein als bei den sechs größeren Anlagen. Der Windpark hat aber eine geringere Gesamtleistung (eigene Darstellung)..... - 42 -

Abbildung 10: Schematische Darstellung von drei Windparklayouts mit unterschiedlichen Anlagentypen. In der rechten oberen Ecke ist Zahl der Anlagen notiert, die jeweils nötig ist, um ein Leistungsequivalent von 30 MW zu erreichen. Selbst bei gleichbleibender Nabenhöhe (Skala am linken Rand) erlauben die größeren Lücken zwischen den Anlagen sicherere Durchflüge von Vögeln zwischen den Anlagen. Entnommen und verändert nach (A. Johnston et al., 2014). - 43 -

Abbildung 11: Auswahl an anthropogenen Flächenrestriktionen für die Windkraftnutzung in Deutschland. Abgebildet sind Schutzbereiche von Radaren und Funkfeuern der zivilen Flugsicherung und des Deutschen Wetterdienstes sowie Schutzbereiche Geologischer Messstationen des German Regional Seismic Network (eigene Darstellung)..... - 45 -

Abbildung 12: Nächtlicher Transport eines Rotorblatts zum Windpark Bad Saulgau mit drei Anlagen Vestas V136 im Jahr 2019. Durch die Kulisse werden die Dimensionen des Spezialtransports deutlich. Das Blatt hat eine Länge von ca. 66 m. Bei aktuellen Anlagen

messen die Blätter an die 86 m (Quelle: eigene Aufnahme). - 48 -

Abbildung 13: Eine Plattenstraße als temporäre Ortsumgehung im Bau. In der Bildmitte ist ein Bachlauf zu erkennen, der für die Überfahrt zeitweise mit einer Verrohrung eingefasst wurde (Quelle: eigene Aufnahme)..... - 49 -

Abbildung 14: Die spezifischen Eigenschaften von Vogelarten (grün), die vorliegende Konfiguration von Windkraftanlagen (blau) und die Standortbedingungen (magenta) bilden ein multifaktorielles Bedingungsgefüge für Kollisionsrisiken an Windkraftanlagen. Entnommen und verändert aus (Marques et al., 2014). - 50 -

Abbildung 15: Gemessene Flughöhen von männlichen und weiblichen Rotmilanen. Aufgrund der Arbeitsteilung bei der Aufzucht von Jungen unternehmen weibliche Rotmilane in der Brutperiode im Schnitt weniger großräumige Flüge durch das Revier. Hohe Thermikflüge werden von Rotmilanen meist genutzt, um weite Strecken zu überwinden. Daher unterscheiden sich die Höhenverteilungen im Flugverhalten der beiden Geschlechter. Entnommen aus (Pfeiffer & Meyburg, 2022), S. 875. - 57 -

Abbildung 16: Karte des Untersuchungsgebiets für die Erfassung der Flugbewegungen. Links oben in der Nebenkarte ist die Lage im regionalen Kontext zu sehen. In der Hauptkarte sind die vier WEA Nordex N117 mit 140 m NH und IBN im Jahr 2017 eingetragen. Bei den Bestandsanlagen handelt es sich um vier Vestas V47 mit 76 m NH mit IBN 2001 und fünf Repower MD 77 mit 85 m NH drei davon mit IBN 2002 und zwei mit IBN im Jahr 2003. Außerdem sind die Positionen der beiden Beobachtungspunkte vermerkt. Durch das Gebiet verläuft auch eine Hochspannungsleitung, zu erkennen leicht westlich von BPo2 mit Verlauf in Richtung Nord-Nord-Ost (eigene Darstellung)..... - 59 -

Abbildung 17: Bildlicher Eindruck des Untersuchungsgebiets. Die Aufnahme wurde am Fuß von WEA 3 mit Blickrichtung Süden angefertigt. In der Bildmitte sind fast deckungsgleich hintereinander die beiden Anlagen Nordex N117 mit IBN 2017, WEA 2 und WEA 1 zu sehen. Am linken Bildrand stehen die vier Anlagen Vestas V47 mit IBN 2001. In der rechten Bildmitte sind zwei der fünf Repower MD77 mit IBN 2003 zu sehen. Am unteren rechten Bildrand ist der Feldweg zu erkennen auf dem sich der Beobachtungspunkt BPo1 befand. BPo2 lag hinter der südlichsten der vier Anlagen am linken Rand (eigene Aufnahme). ... - 60 -

Abbildung 18: Beispiel der Datenaufzeichnung im Feld. Hier die eingescannte Tageskarte 1 des Termins vom 05.08.2020. Die Raumnutzung konzentrierte sich an diesem Morgen auf den Bereich südlich der WEA 1. Dort wurde ein durch Rotmilane besetztes Revierzentrum vermutet (Stauss, 2021)..... - 63 -

Abbildung 19: Beispiel der Datenaufzeichnung im Feld. Hier das Protokoll 1 zur Tageskarte 1 des Termins vom 05.08.2020. In diesem Fall sind Beobachtung zum gezeigten Verhalten, den Wetterbedingungen und eine grobe Einschätzung der Flughöhe notiert worden. Auch Flugbewegungen von anderen Greifvögeln wie Schwarzmilanen (Nr. 12) oder Wanderfalken (Nr. 09) wurden in diesem Zeitausschnitt beobachtet (Stauss, 2021). In die weitere Verarbeitung flossen jedoch nur Flugbewegungen von Rotmilanen ein. - 64 -

Abbildung 20: Histogramm ausgewählter statistischer Kennzahlen der Flugbewegungen für das Erfassungsjahr 2013. Auf der X-Achse ist die Länge der Flugbewegungen und auf der Y-Achse die Anzahl abgetragen. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie = Normalverteilung..... - 67 -

Abbildung 21: Histogramm ausgewählter statistischer Kennzahlen der Flugbewegungen für das Erfassungsjahr 2019. Auf der X-Achse ist die Länge der Flugbewegungen und auf der Y-Achse die Anzahl abgetragen. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie = Normalverteilung..... - 68 -

Abbildung 22: Histogramm ausgewählter statistischer Kennzahlen der Flugbewegungen für das Erfassungsjahr 2020. Auf der X-Achse ist die Länge der Flugbewegungen und auf der Y-Achse die Anzahl abgetragen. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie = Normalverteilung..... - 69 -

Abbildung 23: Synoptische Ergebniskarte aller erfassten Flugbewegungen von Rotmilanen im Untersuchungsgebiet für das Jahr 2013. Zu diesem Zeitpunkt waren die WEA 1 bis 4 noch nicht errichtet (Stauss, 2021)..... - 70 -

Abbildung 24: Synoptische Ergebniskarte aller erfassten Flugbewegungen von Rotmilanen im Untersuchungsgebiet für das Jahr 2019 (eigene Darstellung)..... - 71 -

Abbildung 25: Synoptische Ergebniskarte aller erfassten Flugbewegungen von Rotmilanen

im Untersuchungsgebiet für das Jahr 2020 (eigene Darstellung)..... - 72 -

Abbildung 26: Beispiel einer Rasteranalyse von Flugbewegungen. Hier das Erfassungsjahr 2013. Die Summe der angeschnittenen Flugbewegungen pro Rasterzelle wird gezählt und das Ergebnis sowohl farblich dargestellt, als auch die genauen Zellwerte angegeben (eigene Darstellung). - 74 -

Abbildung 27: Einstellungsparameter bei der Ausführung der Extrahierung von Punktdaten für die Standardisierung der Flugbewegungen des Erfassungsjahres 2020. - 78 -

Abbildung 28: Ausschnitt der Vertices aus der Digitalisierung der Flugbewegungen des Jahres 2013. Die Kurvenbereiche weisen eine hohe Punktdichte auf. Auf Geraden sind die Punktabstände wesentlich größer, bis zu 180 m. - 80 -

Abbildung 29: Ausschnitt der auf 10 m Abstände standardisierten Punkte der Flugbewegungen des Jahres 2013. - 80 -

Abbildung 30: Ausschnitt der Vertices aus der Digitalisierung der Flugbewegungen des Jahres 2019. Die Kurvenbereiche weisen eine sehr hohe Punktdichte auf. - 81 -

Abbildung 31: Ausschnitt der auf 10 m Abstände standardisierten Punkte der Flugbewegungen des Jahres 2019. - 81 -

Abbildung 32: Ausschnitt der Vertices aus der Digitalisierung der Flugbewegungen des Jahres 2020.....82 -

Abbildung 33: Ausschnitt der auf 10 m Abstände standardisierten Punkte der Flugbewegungen des Jahres 2020..... - 82 -

Abbildung 34: Das Python Skript für die Erstellung der Liste mit Werten die der empirisch beobachteten Flughöhenverteilung des Rotmilans entsprechen. Dabei wurden die Prozentwerte der 26 Höhenstufen aus..... - 83 -

Abbildung 35: Die Höhenverteilung der für das Jahr 2013 erstellten Liste im Histogramm. Die Verteilung ahmt die Daten aus der Telemetriestudie gut nach. Ausnahme: am rechten Rand ist die Häufung der Werte zu erkennen, die durch die Kappung der Flughöhe auf 260 m entstanden ist. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie = Normalverteilung. - 84 -

Abbildung 36: Das Python Skript für die rein zufällige Zuordnung von Flughöhen aus der erstellten Liste am Beispiel des Datensatzes für das Jahr 2013. - 85 -

Abbildung 37: Das Skript für die Zuordnung von Flughöhen mit Autokorrelation zum letzten verarbeiteten Punkt am Beispiel des Jahres 2013. Die maximale Abweichung betrug fünf Meter. - 86 -

Abbildung 38: Beispiel einer Flugbewegung aus dem Jahr 2013 aus dem Süden des Untersuchungsgebietes mit zufällig zugeordneten Höhen zu jedem Wegpunkt. Die Variation der Flughöhe ist extrem und füllt den ganzen Wertebereich aus. - 88 -

Abbildung 39: Bei einer rein zufälligen Zuordnung von Flughöhen zum Datensatz des Jahres 2013 ohne Berücksichtigung von Autokorrelation resultierte diese Verteilung. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie = Normalverteilung..... - 89 -

Abbildung 40: Bei einer rein zufälligen Zuordnung von Flughöhen zum Datensatz des Jahres 2019 ohne Berücksichtigung von Autokorrelation resultierte diese Verteilung. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie=Normalverteilung..... - 90 -

Abbildung 41: Bei einer rein zufälligen Zuordnung von Flughöhen zum Datensatz des Jahres 2020 ohne Berücksichtigung von Autokorrelation resultierte diese Verteilung. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie = Normalverteilung..... - 91 -

Abbildung 42: Beispiel einer Flugbewegung aus dem Jahr 2013 aus dem Süden des Untersuchungsgebietes mit anfangs zufällig zugeordneter Höhe und maximaler Abweichung von fünf Metern zwischen jedem Wegpunkt. Die Variation der Flughöhe ist geglätteter und füllt nicht den ganzen Wertebereich aus. - 92 -

Abbildung 43: Die resultierende Verteilung bei einer Zuordnung mit max. 5 m Abweichung für das Jahr 2013 im Histogramm. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, graue Linien = Normalverteilung. - 93 -

Abbildung 44: Die resultierende Verteilung bei einer Zuordnung mit max. 5 m Abweichung für das Jahr 2019 im Histogramm. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, graue Linien = Normalverteilung. - 94 -

Abbildung 45: Die resultierende Verteilung bei einer Zuordnung mit max. 5 m Abweichung für das Jahr 2020 im Histogramm. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, graue Linien = Normalverteilung. - 95 -

Abbildung 46: Beispiel einer Flugbewegung aus dem Jahr 2013 aus dem Süden des Untersuchungsgebietes mit anfangs zufällig zugeordneter Höhe und maximaler Abweichung von 15 Metern zwischen jedem Wegpunkt. Die Variation der Flughöhe ist weniger geglättet und füllt nahezu den ganzen Wertebereich aus. In diesem Fall verlief ein langer Abschnitt der Bewegung bei nahezu maximaler Höhe. Es treten aber auch einige Höhen von null Metern ü.G. auf..... - 97 -

Abbildung 47: Graphik der resultierenden Verteilung mit maximal 15 m Abweichung für das Jahr 2013 im Histogramm. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie = Normalverteilung..... - 98 -

Abbildung 48: Graphik der resultierenden Verteilung mit maximal 15 m Abweichung für das Jahr 2019 im Histogramm. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie = Normalverteilung..... - 99 -

Abbildung 49: Graphik der resultierenden Verteilung mit maximal 15 m Abweichung für das Jahr 2020 im Histogramm. blaue Linie = Durchschnitt, magentafarbene Linie = Median, schwarze Linie = Standardabweichung, rote Linie = Normalverteilung..... - 100 -

Abbildung 50: Beispielhafter Verlauf einer durch Telemetrie erfassten Flugbewegung eines Rotmilans. Oben als 3D- Darstellung und unten als graphische Darstellung mit abgetragenem Höhenverlauf über die Tageszeit. Entnommen aus (Pfeiffer & Meyburg, 2022). - 104 -

Abbildung 51: Höhen der Rotorunterkanten von bestehenden Windkraftanlagen in m ü.G. für Baden-Württemberg Stand 07/2023 im Histogramm. Etwa 53,8 % aller Anlagen weisen eine Rotorunterkante auf, die kleiner als 78 m ist. Deren Anteil an der installierten Leistung beträgt aber nur 39 % (eigene Darstellung, Datengrundlage: <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de>, abgerufen am 25.07.2023). - 106 -

Abbildung 52: Höhen der Rotorunterkanten in m ü.G. von Windkraftanlagen in Baden-Württemberg nach dem Jahr ihrer Inbetriebnahme (eigene Darstellung, Datengrundlage: <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de>, abgerufen am 25.07.2023). - 106 -

Abbildung 53: Analyse von Landnutzungen im Rahmen einer HPA für den Rotmilan. Diese soll dazu dienen, die zu erwartende Raumnutzung zwischen Fortpflanzungsstätten und Nahrungshabitaten abzuschätzen. Auch Landschaftselemente wie sonnenexponierte Südhänge mit überdurchschnittlicher Raumnutzung werden dabei berücksichtigt (Quelle: eigene Darstellung, Datengrundlage: Open Streetmap). - 110 -

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewählte statistische Kennzahlen der Flugbewegungen der drei verfügbaren Erfassungsjahre. Es findet eine Zunahme der Flugbewegungen über alle drei Jahre hinweg statt. Die Gründe dafür sind letztlich nicht zu benennen und daher soll Stelle nicht weiter darüber spekuliert werden. Jedenfalls scheint der Zubau von vier Windkraftanlagen keine Abnahme von Flugbewegungen verursacht zu haben. - 66 -

Tabelle 2: Die Anzahl an Vertices in den Ursprungsdaten und die Menge an Punkten nach der Extrahierung. Durch die Standardisierung auf Punktabstände von 10 m verdoppelte sich die Punktzahl des Datensatzes von 2013. Dagegen sank die Punktzahl im Jahr 2019 auf ca. ein Fünftel des Ursprungsdatensatzes. Die geringsten Auswirkungen auf die Punktdichte hatte die gewählte Anpassung im Jahr 2020. - 78 -

Tabelle 3: gemessene Höhenverteilung aus der Telemetriestudie (Pfeiffer & Meyburg, 2022).
..... - 78 -

Tabelle 4: Die erzeugten Tabellen zeigten alle die beabsichtigte Verteilung von Flughöhen.
..... -84 -

Tabelle 5: Die Durchschnitts- und Medianwerte der zufällig zugeordneten Flughöhen stimmen mit der jeweiligen Tabellengrundlage überein. Auch die Standardabweichungen sind nahezu identisch. - 87 -

Tabelle 6: Resultierende statistische Kennzahlen der Zuordnung mit Einschränkung der Abweichung auf maximal 5 m. Die Verteilung unterscheidet sich von der rein zufälligen Ziehung aus der Liste. - 92 -

Tabelle 7: Statistische Kennzahlen der Zuordnungen mit maximal 15 m Abweichung. Die Höhenverteilung tendiert mit steigender Punktzahl immer weiter in Richtung einer Normalverteilung. - 96 -

10. Abkürzungsverzeichnis

ACC	accelerometer
AVV	Allgemeine Verwaltungsvorschrift
BImSchG	Bundesimmissionschutzgesetz
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BNK	Bedarfsgesteuerte Nachtkennzeichnung
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
BW	Baden-Württemberg
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cm	Zentimeter
CO ²	Kohlenstoffdioxid
DEM	Digital Elevation Model
EIA	environmental impact assessment
engl.	englisch
Fa.	Firma
GIS	Geographisches Informationssystem
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HPA	Habitatpotentialanalyse
IBN	Inbetriebnahme
IMU	Inertial Measurement Unit
km	Kilometer
km ²	Quadratkilometer
kV	Kilovolt
lat.	lateinisch
LUBW	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
m	Meter
m/s	Meter Pro Sekunde
max.	maximal
min.	mindestens
NDVI	normalized difference vegetation index
NH	Nabenhöhe
p.a.	per annum
PTT	Plattform Transmitter Terminal
RD	Rotordurchmesser
Rm	Rotmilan
RNA	Raumnutzungsanalyse
RV	Regionalverband
Sm	Schwarzmilan
TÖB	Träger öffentlicher Belange
ü.G.	über Grund
UHF	Ultra-High Frequency
VHF	Very-High Frequency
W/m ²	Windleistungsdichte in Watt pro Quadratmeter
WEA	Windenergieanlage

11. Literaturverzeichnis

- Aebischer, A. (2009). *Der Rotmilan: Ein faszinierender Greifvogel*. Haupt.
- Albrecht, C., Pauen, R., Bloch, C. & Kemmerich, T. (2019). *Endbericht Windatlas BW*. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg.
- Anderson, C. (Hrsg.). (2020). *Wind Turbines*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781108478328>
- Aydin, N. Y., Kentel, E. & Duzgun, S. (2010). GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: A case study from Western Turkey. *Renewable & sustainable energy reviews*, 14(DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.023), 373.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.023>
- Bairlein, F., Exo, K.-M. & Schmaljohann, H. (2012). Geolokation. *Biologie in unserer Zeit*, 42 27–33. <https://doi.org/10.1002/biuz.201110467>
- Barclay, R. M., Baerwald, E. F. & Gruver, J. C. (2007). Variation in bat and bird fatalities at wind energy facilities: assessing the effects of rotor size and tower height. *Canadian Journal of Zoology*, 85(3), 381–387. <https://doi.org/10.1139/Z07-011>
- Bellebaum, J., Korner-Nievergelt, F., Dürr, T [T.] & Mammen, U. (2013). Wind turbine fatalities approach a level of concern in a raptor population. *Journal for Nature Conservation*, 21(6), 394–400. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2013.06.001>
- Bird, J. P., Martin, R., Akçakaya, H. R., Gilroy, J., Burfield, I. J., Garnett, S. T., Symes, A., Taylor, J., Şekercioğlu, Ç. H. & Butchart, S. H. M. (2020). Generation lengths of the world's birds and their implications for extinction risk. *Conservation biology : the journal of the Society for Conservation Biology*, 34(5), 1252–1261.
<https://doi.org/10.1111/cobi.13486>
- BirdLife International. *Milvus milvus*. The IUCN Red List of Threatened Species. (2020).
<https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-3.RLTS.T22695072A181651010.en>
 (e.T22695072A181651010).
- Bose, A., Dürr, T [Tobias], Klenke, R. A. & Henle, K. (2020). Predicting strike susceptibility and collision patterns of the common buzzard at wind turbine structures in the federal state of Brandenburg, Germany. *PloS one*, 15(1), e0227698.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227698>

- Anderson, C. (Hrsg.). (2020). *Wind Turbines*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781108478328>
- Aydin, N. Y., Kentel, E. & Duzgun, S. (2010). GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: A case study from Western Turkey. *Renewable & sustainable energy reviews*, 14(DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.023), 373.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.023>
- Bairlein, F., Exo, K.-M. & Schmaljohann, H. (2012). Geolokation. *Biologie in unserer Zeit*, 42(1), 27–33. <https://doi.org/10.1002/biuz.201110467>
- Barclay, R. M., Baerwald, E. F. & Gruver, J. C. (2007). Variation in bat and bird fatalities at wind energy facilities: assessing the effects of rotor size and tower height. *Canadian Journal of Zoology*, 85(3), 381–387. <https://doi.org/10.1139/Z07-011>
- Bellebaum, J., Korner-Nievergelt, F., Dürr, T [T.] & Mammen, U. (2013). Wind turbine fatalities approach a level of concern in a raptor population. *Journal for Nature Conservation*, 21(6), 394–400. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2013.06.001>
- Bird, J. P., Martin, R., Akçakaya, H. R., Gilroy, J., Burfield, I. J., Garnett, S. T., Symes, A., Taylor, J., Şekercioğlu, Ç. H. & Butchart, S. H. M. (2020). Generation lengths of the world's birds and their implications for extinction risk. *Conservation biology : the journal of the Society for Conservation Biology*, 34(5), 1252–1261.
<https://doi.org/10.1111/cobi.13486>
- BirdLife International. *Milvus milvus*. The IUCN Red List of Threatened Species. (2020).
<https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-3.RLTS.T22695072A181651010.en>
(e.T22695072A181651010).
- Bose, A., Dürr, T [Tobias], Klenke, R. A. & Henle, K. (2020). Predicting strike susceptibility and collision patterns of the common buzzard at wind turbine structures in the federal state of Brandenburg, Germany. *PloS one*, 15(1), e0227698.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227698>
- Cabrera-Cruz, S. A. & Villegas-Patraca, R. (2016). Response of migrating raptors to an increasing number of wind farms. *Journal of Applied Ecology*, 53(6), 1667–1675.

- <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12673>
- de Lucas (2008). Collision Fatality of Raptors in Wind Farms Does Not Depend on Raptor Abundance. *Journal of Applied Ecology*, 45(6).
- Drewitt, A. L. & Langston, R. H. W. (2006). Assessing the impacts of wind farms on birds. *Ibis*, 148, 29–42. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2006.00516.x>
- Ferrer, M., Lucas, M. de, Janss, G. F. E., Casado, E., Muñoz, A. R., Bechard, M. J. & Calabuig, C. P. (2012). Weak relationship between risk assessment studies and recorded mortality in wind farms. *Journal of Applied Ecology*, 49(1), 38–46. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02054.x>
- Fotopoulos, G., Kotsakis, C. & Sideris, M. (2003). How Accurately Can We Determine Orthometric Height Differences from GPS and Geoid Data? *JOURNAL OF SURVEYING ENGINEERING*, 10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2003\)129:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2003)129:1(1))
- Frandsen & Sten (2007). Turbulence and turbulence-generated structural loading in wind turbine clusters.
- Fudickar, A. M., Wikelski, M. & Partecke, J. (2012). Tracking migratory songbirds: accuracy of light-level loggers (geolocators) in forest habitats. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(1), 47–52. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00136.x>
- Furness, R. W., Wade, H. M. & Masden, E. A. (2013). Assessing vulnerability of marine bird populations to offshore wind farms. *Journal of environmental management*, 119, 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.025>
- Graham, K., Beckerman, A. P. & Thirgood, S. (2005). Human–predator–prey conflicts: ecological correlates, prey losses and patterns of management. *Biological Conservation*, 122(2), 159–171. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2004.06.006>
- Grüneberg & Karthäuser (2019). Verbreitung und Bestand des Rotmilans *Milvus milvus* in Deutschland – Ergebnisse der bundesweiten Kartierung 2010–2014. *Vogelwelt* 139: 101–116.
- Hansen, K. S., Barthelmie, R. J., Jensen, L. E. & Sommer, A. (2012). The impact of turbulence intensity and atmospheric stability on power deficits due to wind turbine wakes at Horns Rev wind farm. *Wind Energy*, 15(1), 183–196. <https://doi.org/10.1002/we.512>
- Heuck, C., Brandl, R., Albrecht, J. & Gottschalk, T. K. (2013). The potential distribution of the Red Kite in Germany. *Journal of Ornithology*, 154(4), 911–921.

- <https://doi.org/10.1007/s10336-013-0955-2>
- Heuck, C., Sommerhage, M., Stelbrink, P., Höfs, C., Geisler, K. & Gelpke, C. (2019). Untersuchung des Flugverhaltens von Rotmilanen im Vogelsberg.
- Hovick, T. J., Elmore, R. D., Dahlgren, D. K., Fuhlendorf, S. D. & Engle, D. M. (2014). REVIEW: Evidence of negative effects of anthropogenic structures on wildlife: a review of grouse survival and behaviour. *Journal of Applied Ecology*, 51(6), 1680–1689. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12331>
- Hull, C. L. & Muir, S. C. (2013). Behavior and turbine avoidance rates of eagles at two wind farms in Tasmania, Australia. *Wildlife Society Bulletin*, 37(1), 49–58. <https://doi.org/10.1002/wsb.254>
- Hüppop, O., Dierschke, J., Exo, K.-M., Fredrich, E. & Hill, R. (2006). Bird migration studies and potential collision risk with offshore wind turbines. *Ibis*, 148, 90–109. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2006.00536.x>
- Jenkins, A. R., Reid, T., Du Plessis, J., Colyn, R., Benn, G. & Millikin, R. (2018). Combining radar and direct observation to estimate pelican collision risk at a proposed wind farm on the Cape west coast, South Africa. *PloS one*, 13(2), e0192515. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192515>
- Johnston, A., Cook, A. S. C. P., Wright, L. J., Humphreys, E. M. & Burton, N. H. K. (2014). Modelling flight heights of marine birds to more accurately assess collision risk with offshore wind turbines. *Journal of Applied Ecology*, 51(1), 31–41. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12191>
- Johnston, N., Bradley, J. E. & Otter, K. A. (2014). Increased flight altitudes among migrating golden eagles suggest turbine avoidance at a Rocky Mountain wind installation. *PloS one*, 9(3), e93030. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093030>
- Katzenberger, J., Gottschalk, E., Balkenhol, N. & Waltert, M. (2019). Long-term decline of juvenile survival in German Red Kites. *Journal of Ornithology*, 160(2), 337–349. <https://doi.org/10.1007/s10336-018-1619-z>
- Kist, R., Schmitt, E., Lang, C., Kammerer, A. & Weisser, S. (2023). *Teilfortschreibung Windenergie des Regionalplans Heilbronn Franken 2020: im Zuge der Regionalen Planungsoffensive Erneuerbare Energien*. Beschluss über die Unterrichtung nach § 9 Abs. 1 ROG.
- Kolar, P. S. & Bechard, M. J. (2016). Wind energy, nest success, and post-fledging survival of

- Buteo hawks. *The Journal of Wildlife Management*, 80(7), 1242–1255.
<https://doi.org/10.1002/jwmg.21125>
- Köppel, J. (Hrsg.). (2017). *Wind Energy and Wildlife Interactions*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51272-3>
- LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2021). Hinweise zur Erfassung und Bewertung von Vogelvorkommen bei der Genehmigung von Windenergieanlagen.
- LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2015). Hinweise zur Bewertung und Vermeidung von Beeinträchtigungen von Vogelarten bei Bauleitplanung und Genehmigung für Windenergieanlagen.
- LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2020). Hinweise für den Untersuchungsumfang zur Erfassung von Vogelarten bei Bauleitplanung und Genehmigung für Windenergieanlagen.
- Madders, M. & Whitefield, D. P. (2006). Upland raptors and the assessment of wind farm impacts. *Ibis (London, England)*, 148(DOI: 10.1111/j.1474-919X.2006.00506.x), 56.
<https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2006.00506.x>
- Marques, A. T., Batalha, H., Rodrigues, S., Costa, H., Pereira, M. J. R., Fonseca, C., Mascarenhas, M. & Bernardino, J. (2014). Understanding bird collisions at wind farms: An updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biological conservation*, 179, 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.08.017>
- Martín, B., Perez-Bacalu, C., Onrubia, A., Lucas, M. de & Ferrer, M. (2018). Impact of wind farms on soaring bird populations at a migratory bottleneck. *European Journal of Wildlife Research*, 64(3). <https://doi.org/10.1007/s10344-018-1192-z>
- Meyburg, B. (2013). Telemetrie in der Greifvogelforschung. *Greifvögel und Falkneri*.
- Meyburg, B. & Meyburg C. (2009). Wanderung mit Rucksack:: Satellitentelemetrie bei Vögeln. *Der Falke*, 56, 256–263.
- Molenaar, F. M., Jaffe, J. E., Carter, I., Barnett, E. A., Shore, R. F., Marcus Rowcliffe, J. & Sainsbury, A. W. (2017). Poisoning of reintroduced red kites (*Milvus Milvus*) in England. *European Journal of Wildlife Research*, 63(6). <https://doi.org/10.1007/s10344-017-1152-z>
- Nachtigall, W., Stubbe, M. & Herrmann, S. (2003). Aktionsraum und Habitatnutzung des Rotmilans (*Milvus milvus*) im Winter — eine telemetrische Studie im Nordharzvorland. *Journal of Ornithology*, 144(3), 284–294.
<https://doi.org/10.1007/BF02465628>

- Pennycuik, C. J. (1989). *Bird flight performance: A practical calculation manual*. Oxford science publication. Oxford University Press.
<http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0635/88038249-d.html>
- Pfeiffer, T. & Meyburg, B.-U. (2015). GPS tracking of Red Kites (*Milvus milvus*) reveals fledgling number is negatively correlated with home range size. *Journal of Ornithology*, 156(4), 963–975. <https://doi.org/10.1007/s10336-015-1230-5>
- Pfeiffer, T. & Meyburg, B.-U. (2022). Flight altitudes and flight activities of adult Red Kites (*Milvus milvus*) in the breeding area as determined by GPS telemetry. *Journal of Ornithology*, 163(4), 867–879. <https://doi.org/10.1007/s10336-022-01994-1>
- Poessel, S. A., Duerr, A. E., Hall, J. C., Braham, M. A. & Katzner, T. E. (2018). Improving estimation of flight altitude in wildlife telemetry studies. *Journal of Applied Ecology*, 55(4), 2064–2070. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13135>
- Poot, H., Bruno J. Ens, Han de Vries, Maurice A. H. Donners, Marcel R. Wernand & Joop M. Marquenie (2013). Green Light for Nocturnally Migrating Birds. *Ecology and Society*, 13(2).
- Raab, R., Ivan Literak, Claudia Schütz & et.all (2017). GPS-basierte Telemetriestudien an mitteleuropäischen Rotmilanen *Milvus milvus*: - methodische Schwierigkeiten und analytische Möglichkeiten basierend auf ersten Ergebnissen. *Ornithologische Mitteilungen*, 69(7), Artikel 8, 245–260.
- Rafiee, A., van der Male, P., Dias, E. & Scholten, H. (2018). Interactive 3D geodesign tool for multidisciplinary wind turbine planning. *Journal of environmental management*, 205, 107–124. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.042>
- Santhanagopalan V. (2017). Performance Optimization of a Wind Turbine Column for Different Incoming Wind Turbulence.
- Schaub, M. (2012). Spatial distribution of wind turbines is crucial for the survival of red kite populations. *Biological Conservation*, 155, 111–118.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.06.021>
- Seidel, D. P., Dougherty, E., Carlson, C. & Getz, W. M. (2018). Ecological metrics and methods for GPS movement data. *Int J Geogr Inf Sci*, 32(PMID: 30631244), 2293.
<https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1498097>
- Sergio, F. (2003). From individual behaviour to population pattern: weather-dependent

- foraging and breeding performance in black kites. *Animal Behaviour*, 66(6), 1109–1117. <https://doi.org/10.1006/anbe.2003.2303>
- Silva, J. P., Palmeirim, J. M., Alcazar, R., Correia, R., Delgado, A. & Moreira, F. (2014). A spatially explicit approach to assess the collision risk between birds and overhead power lines: A case study with the little bustard. *Biological conservation*, 170(CODEN: BICOBK), 263. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.12.026>
- Smallwood, K. S., Neher, L. & Bell, D. A. (2009). Map-based repowering and reorganization of a wind resource area to minimize burrowing owl and other bird fatalities. *Energies (Basel)*, 2(DOI: 10.3390/en20400915), 943. <https://doi.org/10.3390/en20400915>
- Smallwood, K. S., Ruge, L. & Morrison, M. L. (2009). Influence of Behavior on Bird Mortality in Wind Energy Developments. *Journal of Wildlife Management*, 73(7), 1082–1098. <https://doi.org/10.2193/2008-555>
- Smeraldo, S., Bosso, L., Fraissinet, M., Bordignon, L., Brunelli, M., Ancillotto, L. & Russo, D. (2020). Modelling risks posed by wind turbines and power lines to soaring birds: the black stork (*Ciconia nigra*) in Italy as a case study. *Biodiversity and conservation*, 29(6), 1959–1976. <https://doi.org/10.1007/s10531-020-01961-3>
- Sokolov, L. V. (2011). Modern telemetry: New possibilities in ornithology. *Biology Bulletin*, 38(9), 885–904. <https://doi.org/10.1134/S1062359011090081>
- Spatz, T., Katzenberger, J., Friess, N., Gelpke, C., Gottschalk, E., Hormann, M., Koschkar, S., Pfeiffer, T., Stübing, S., Sudfeldt, C., Rösner, S., Schabo, D. G. & Farwig, N. (2022). Sex, landscape diversity and primary productivity shape the seasonal space use of a migratory European raptor. *Journal of Avian Biology*, 2022(10). <https://doi.org/10.1111/jav.02925>
- St. Martin, C. M., Lundquist, J. K., Clifton, A., Poulos, G. S. & Schreck, S. J. (2016). Wind turbine power production and annual energy production depend on atmospheric stability and turbulence. *Wind Energy Science*, 1(2), 221–236. <https://doi.org/10.5194/wes-1-221-2016>
- Stauss, M. (2021). Milan-Monitoring WP Gussenstadt Abschlussbericht mit Anlagen, 1–24.
- Stutchbury, B. J. M., Tarof, S. A., Done, T., Gow, E., Kramer, P. M., Tautin, J., Fox, J. W. & Afanasyev, V. (2009). Tracking long-distance songbird migration by using geolocators. *Science (New York, N.Y.)*, 323(5916), 896. <https://doi.org/10.1126/science.1166664>

- Tavecchia, G., Adrover, J., Navarro, A. M. & Pradel, R. (2012). Modelling mortality causes in longitudinal data in the presence of tag loss: application to raptor poisoning and electrocution. *Journal of Applied Ecology*, 49(1), 297–305.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02074.x>
- Tian, L., Song, Y., Xiao, P., Zhao, N., Shen, W. & Zhu, C. (2022). A new three-dimensional analytical model for wind turbine wake turbulence intensity predictions. *Renewable Energy*, 189, 762–776. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.115>
- Wasmund, N. (2013). *Der Rotmilan (Milvus milvus) im Unteren Eichsfeld. Brutbestand, Nahrungsökologie und Gefährdungsursachen*. Dissertation.
- Watson, R. T., Kolar, P. S., Ferrer, M., Nygård, T., Johnston, N., Hunt, W. G., Smit-Robinson, H. A., Farmer, C. J., Huso, M. & Katzner, T. E. (2018). Raptor Interactions With Wind Energy: Case Studies From Around the World. *Journal of Raptor Research*, 52(1), 1–18. <https://doi.org/10.3356/JRR-16-100.1>
- Wendel, J. (2011). *Integrierte Navigationssysteme: Sensordatenfusion, GPS und inertielle Navigation* (2., überarbeitete Auflage). Oldenbourg Verlag.