

Ergebnisbericht Pilotstudie Bioseco

Kamerabasiertes Antikollisionssystem


Artenschutzfachliche Bewertung

Esther Clausen
Dr. Jorg Welcker
Dr. Thilo Liesenjohann



Husum, Dezember 2023

**Im Auftrag der
PNE AG
Peter-Henlein-Str. 2-4
27472 Cuxhaven**

Projektname	Pilotstudie Bioseco – Artenschutzfachliche Bewertung	
Projektnummer	21_1176	
Auftragnehmer		BioConsult SH GmbH & Co.KG Schobüller Str. 36 D - 25813 Husum Tel.: +49 (0)4841 77937-10 www.bioconsult-sh.de
Projektleitung	Esther Clausen	- -
Stellvertretung Projektleitung	Dr. Thilo Liesenjohann	- -
Berichtserstellung	Esther Clausen	
Geprüft/Freigabe	Datum 04.07.2023	Version: 13.06.2023
	Jorg Wecker	-
Titelbild	Bioseco-System an der WEA (BioConsult SH 2021)	
Zitiervorschlag	<p>Ergebnisbericht Pilotstudie Bioseco - Kamerabasiertes Antikollisionssystem - Artenschutzfachliche Bewertung BioConsult SH (2023): Ergebnisbericht Pilotstudie Bioseco - Kamerabasiertes Antikollisionssystem - Artenschutzfachliche Bewertung, BioConsult SH, Husum.</p> <p>Forschungsberichte: zitieren mit Autoren Clausen, E. (2023): Ergebnisbericht Pilotstudie Bioseco - Kamerabasiertes Antikollisionssystem - Artenschutzfachliche Bewertung BioConsult SH, Husum.</p>	
Auftraggeber	PNE AG Peter Heinlein-Str. 2-4 27472 Cuxhaven	
Ansprechpartner bei dem Auftraggeber	Jannes Kreutzfeldt	-
		-

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG – ANLASS UND AUFGABENSTELLUNG	1
1.1	Untersuchungsgebiet.....	1
2	MATERIAL UND METHODEN.....	6
2.1	Bioseco-System „Long Range“ Funktionsweise	6
2.2	Bioseco-System Sichtbarkeit und Erfassungshöhe	11
2.3	Datengrundlage	11
2.4	Reaktionsbereich und Erfassungsbereich.....	15
2.4.1	Feldversuche.....	17
2.4.2	Statistische Auswertung	18
2.5	Größenklassifikation	19
2.5.1	Feldversuche.....	19
2.5.2	Statistische Auswertung	19
2.5.3	Korrektur der Erkennungsrate/Größenklassifikation	19
2.6	Positionsgenauigkeit.....	20
3	ERGEBNISSE	23
3.1	Sichtbarkeit und Erfassungshöhe	23
3.2	Erfassungsraten	26
3.2.1	Erfassungsraten im jeweiligen Reaktionsbereich:.....	27
3.3	Größenklassifikation	30
3.4	Positionsgenauigkeit.....	32
3.5	Fehlabschaltrate	34
4	FAZIT	35
4.1	Zusammenfassende Beurteilung und Anmerkungen	35

5	LITERATUR.....	37
A	ANHANG.....	39
A.1	Erfassungsrate	39
A.1.1	Rotmilan.....	39
A.1.2	Seeadler	40
A.1.3	Weißstorch.....	41
A.2	Erkennungsrate.....	42
A.2.1	Rotmilan.....	42
A.2.2	Seeadler	43
A.2.3	Weißstorch.....	44
A.3	Erfassungsraten außerhalb des jeweiligen Reaktionsbereiches (700 m)	45

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Landnutzung im Bereich der WEA aus dem Jahr 2017.	3
Abb. 1.2:	Blickrichtung Nordwesten von der WEA mit den installierten AKS (Foto: BioConsult SH 2022).	4
Abb. 1.3:	Blickrichtung Westen von der WEA mit den installierten AKS (Foto: BioConsult SH 2022).	4
Abb. 1.4:	Blickrichtung Südwesten von der WEA mit den installierten AKS (Foto: BioConsult SH 2022).	5
Abb. 2.1:	Schematische Darstellung der Kameraeigenschaften mit Angabe der Installationshöhe und dem vertikalen Öffnungswinkel und der leichten Neigung nach oben (Darstellung unverändert PNE 2023).	7
Abb. 2.2:	Schematische 3D-Darstellung der Sichtbereiche der acht installierten Kameramodule (Darstellung unverändert Bioseco).	7
Abb. 2.3:	Die Vestas WEA in Lentföhrden mit acht installierten Bioseco-Systemen in 7 m Höhe (Foto: BioConsult SH 2022).	8
Abb. 2.4:	Detailansicht der einzelnen Detektionsmodule von Bioseco (Foto: BioConsult SH 2022).	9
Abb. 2.5:	Erfassungsbereich um die Vestas WEA mit den acht Bioseco-Systemen (Karte erstellt BioConsult SH 2021).	10
Abb. 2.6:	LRF vom Modell Vectronix Vector 21 Aero.	11
Abb. 2.7:	Parallele Erfassung mit dem LRF durch BioConsult SH (Foto: PNE 2022).	13

Abb. 2.8: Die verschiedenen Schritte vom Senden des Bioseco-Stopp-Signals bis zum Ankommen dieses Signals an der WEA.	16
Abb. 2.9: Verwendete Drohnen zur Positionsgenauigkeitsbestimmung, Spannweite von 1,5 m und 2 m (Foto: PNE 2023).	21
Abb. 3.1: Durch PNE untersuchte Sichtbarkeit und Erfassungshöhe des Bioseco-Systems an der Vestas V150 WEA in Lentföhrden.....	23
Abb. 3.2: Durch PNE durchgeführte Sichtbarkeitsanalyse, Gesamtübersicht der drei Entfernungen von 378 m, 530 m und 700 m (Karte unverändert PNE erstellt am 12.05.2023).	24
Abb. 3.3: Durch PNE durchgeführte Sichtbarkeitsanalyse, Sichtbarer Bereich in 20 m Höhe (Karte unverändert PNE erstellt am 12.05.2023).	24
Abb. 3.4: Durch PNE durchgeführte Sichtbarkeitsanalyse, Sichtbarer Bereich in 26 m Höhe (Karte unverändert PNE erstellt am 12.05.2023).	25
Abb. 3.5: Durch PNE durchgeführte Sichtbarkeitsanalyse, Sichtbarer Bereich in 32 m Höhe (Karte unverändert PNE erstellt am 12.05.2023).	25
Abb. 3.6: Statistische Ergebnisse zur Erfassungsrate bzgl. des Rotmilans. GLMM-Analysen (links) vs. dem „simplen“ Ansatz (rechts) basierend auf einem Erfassungsradius von 378 m (\leq dem Reaktionsradius – s. o.). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95 %ige Konfidenzintervalle. N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.....	28
Abb. 3.7: Statistische Ergebnisse zur Erfassungsrate bzgl. des Seeadlers. GLMM-Analysen (links) vs. dem „simplen“ Ansatz (rechts) basierend auf einem Erfassungsradius von 530 m (\leq dem Reaktionsradius – s. o.). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95%ige Konfidenzintervalle. N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.....	29
Abb. 3.8: Statistische Ergebnisse zur Erfassungsrate bzgl. des Weißstorchs. GLMM-Analysen (links) vs. dem „simplen“ Ansatz (rechts) basierend auf einem Erfassungsradius von 530 m (\leq dem Reaktionsradius – s. o.). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95 %ige Konfidenzintervalle. N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.....	29
Abb. 3.9: Statistische Ergebnisse zur Erkennungsrate des Rotmilans. GLMM-Analysen (links) vs. dem „simplen“ Ansatz (rechts) basierend auf einem Erfassungsradius von 378 m (\geq dem Reaktionsradius – s. o.). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95 %ige Konfidenzintervalle. Letztere beinhalten nicht die Unsicherheiten des Korrekturschrittes (siehe Haupttext). N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.....	30
Abb. 3.10: Statistische Ergebnisse zur Erkennungsrate des Seeadlers. GLMM-Analysen (links) vs. dem „simplen“ Ansatz (rechts) basierend auf einem Erfassungsradius von 530 m (\geq dem Reaktionsradius – s. o.). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95 %ige Konfidenzintervalle. Letztere beinhalten nicht die Unsicherheiten des Korrekturschrittes (siehe Haupttext). N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.....	31
Abb. 3.11: Statistische Ergebnisse zur Erkennungsrate des Weißstorchs. GLMM-Analysen (links) vs. dem „simplen“ Ansatz (rechts) basierend auf einem Erfassungsradius von 530 m (\geq dem Reaktionsradius – s. o.). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95%ige Konfidenzintervalle. Letztere beinhalten nicht die Unsicherheiten des Korrekturschrittes (siehe Haupttext). N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.....	31

- Abb. 3.12: Mitte/Oben: GPS-Punkte von drei unterschiedlichen Drohnenflügen (rote Punkte) vs. zugeordneter AKS-Punkte (blaue Punkte) im 500-Meter-Umfeld der WEA (grüner Punkt). Mitte/ Unten: der relative örtliche Fehler (Mittelwert) für die drei unterschiedlichen Flüge in Abhängigkeit von der Distanz zwischen WEA und Ziel. Schattierte Bereiche: 95%-Konfidenzintervalle. 33
- Abb. A. .1 Statistische Ergebnisse zur Erfassungsrate bzgl. des Rotmilans. Oben links: Erfassungsrate in (u.U. nichtlinearer) Abhängigkeit von der Distanz zwischen LRF-Punkt und AKS basierend auf GAMM-Analysen. Schwarze Linie: Erfassungsrate, lila-schattierter Bereich: 95%ige Konfidenzintervalle. Semi-transparente Punkte kurz über der X-Achse zeigen die Existenz einzelner Messpunkte an. Restliche Abbildungen: GLMM-Analysen (jeweils links) vs. dem „simplen“ Ansatz (jeweils rechts) basierend auf unterschiedlichen Erfassungsradien (siehe jeweilige Bildüberschrift). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95%ige Konfidenzintervalle. N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an. 39
- Abb. A.A.2 Statistische Ergebnisse zur Erfassungsrate bzgl. des Seeadlers. Oben links: Erfassungsrate in (u.U. nichtlinearer) Abhängigkeit von der Distanz zwischen LRF-Punkt und AKS basierend auf GAMM-Analysen. Schwarze Linie: Erfassungsrate, lila-schattierter Bereich: 95%ige Konfidenzintervalle. Semi-transparente Punkte kurz über der X-Achse zeigen die Existenz einzelner Messpunkte an. Restliche Abbildungen: GLMM-Analysen (jeweils links) vs. dem „simplen“ Ansatz (jeweils rechts) basierend auf unterschiedlichen Erfassungsradien (siehe jeweilige Bildüberschrift). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95%ige Konfidenzintervalle. N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an. 40
- Abb. A.A.3 Statistische Ergebnisse zur Erfassungsrate bzgl. des Weißstorchs. Oben links: Erfassungsrate in (u.U. nichtlinearer) Abhängigkeit von der Distanz zwischen LRF-Punkt und AKS basierend auf GAMM-Analysen. Schwarze Linie: Erfassungsrate, lila-schattierter Bereich: 95%ige Konfidenzintervalle. Semi-transparente Punkte kurz über der X-Achse zeigen die Existenz einzelner Messpunkte an. Restliche Abbildungen: GLMM-Analysen (jeweils links) vs. dem „simplen“ Ansatz (jeweils rechts) basierend auf unterschiedlichen Erfassungsradien (siehe jeweilige Bildüberschrift). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95%ige Konfidenzintervalle. N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an. 41
- Abb. A.A.4 Statistische Ergebnisse zur Erkennungsrate bzgl. des Rotmilans. Oben links: Erkennungsrate in (u.U. nichtlinearer) Abhängigkeit von der Distanz zwischen LRF-Punkt und AKS basierend auf GAMM-Analysen. Schwarze Linie: unkorrigierte Erkennungsrate, rote Linie: korrigierte Erkennungsrate, lila-schattierter Bereich: 95%ige Konfidenzintervalle zur unkorrigierten Rate. Semi-transparente Punkte kurz über der X-Achse zeigen die Existenz einzelner Messpunkte an. Restliche Abbildungen: GLMM-Analysen (jeweils links) vs. dem „simplen“ Ansatz (jeweils rechts) basierend auf unterschiedlichen Erfassungsradien (siehe jeweilige Bildüberschrift). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95%ige Konfidenzintervalle. Letztere beinhalten nicht die Unsicherheiten des Korrekturschrittes (siehe Haupttext). N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an. 42

- Abb. A.A.5 Statistische Ergebnisse zur Erkennungsrate bzgl. des Seeadlers. Oben links: Erkennungsrate in (u.U. nichtlinearer) Abhängigkeit von der Distanz zwischen LRF-Punkt und AKS basierend auf GAMM-Analysen. Schwarze Linie: unkorrigierte Erkennungsrate, rote Linie: korrigierte Erkennungsrate, lila-schattierter Bereich: 95%ige Konfidenzintervalle zur unkorrigierten Rate. Semi-transparente Punkte kurz über der X-Achse zeigen die Existenz einzelner Messpunkte an. Restliche Abbildungen: GLMM-Analysen (jeweils links) vs. dem „simplen“ Ansatz (jeweils rechts) basierend auf unterschiedlichen Erfassungsradien (siehe jeweilige Bildüberschrift). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95%ige Konfidenzintervalle. Letztere beinhalten nicht die Unsicherheiten des Korrekturschrittes (siehe Haupttext). N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an. 43
- Abb. A. .6 Statistische Ergebnisse zur Erkennungsrate bzgl. des Weißstorchs. Oben links: Erkennungsrate in (u.U. nichtlinearer) Abhängigkeit von der Distanz zwischen LRF-Punkt und AKS basierend auf GAMM-Analysen. Schwarze Linie: unkorrigierte Erkennungsrate, rote Linie: korrigierte Erkennungsrate, lila-schattierter Bereich: 95%ige Konfidenzintervalle zur unkorrigierten Rate. Semi-transparente Punkte kurz über der X-Achse zeigen die Existenz einzelner Messpunkte an. Restliche Abbildungen: GLMM-Analysen (jeweils links) vs. dem „simplen“ Ansatz (jeweils rechts) basierend auf unterschiedlichen Erfassungsradien (siehe jeweilige Bildüberschrift). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95%ige Konfidenzintervalle. Letztere beinhalten nicht die Unsicherheiten des Korrekturschrittes (siehe Haupttext). N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an. 44
- Abb. A.7: Statistische Ergebnisse zur Erfassungsrate bzgl. Des Rotmilans. GLMM-Analysen (links) vs. Dem „simplen“ Ansatz (rechts) basierend auf einem Erfassungsradius von 700 m (> dem Reaktionsradius bis max. 700 m). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95 %ige Konfidenzintervalle. N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an. 45
- Abb. A.8: Statistische Ergebnisse zur Erfassungsrate bzgl. Des Seeadlers. GLMM-Analysen (links) vs. Dem „simplen“ Ansatz (rechts) basierend auf einem Erfassungsradius von 700 m (> dem Reaktionsradius bis max. 700 m). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95 %ige Konfidenzintervalle. N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an. 46
- Abb. A.9: Statistische Ergebnisse zur Erfassungsrate bzgl. Des Weißstorches. GLMM-Analysen (links) vs. Dem „simplen“ Ansatz (rechts) basierend auf einem Erfassungsradius von 700 m (> dem Reaktionsradius bis max. 700 m). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95 %ige Konfidenzintervalle. N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an. 46

Tabellenverzeichnis

<i>Tab. 2.1</i>	<i>Erfassungstermine im Zeitraum 09.03.2022 bis 22.09.2022 mit Angabe der Beobachtungsdauer und der Anzahl der Erfasser.</i>	<i>14</i>
<i>Tab. 3.1</i>	<i>Erprobungskriterien vom KNE (gemäß BRUNS et al. 2021).</i>	<i>27</i>

Abkürzungsverzeichnis und Fachwortverzeichnis

AKS	Antikollisionssystem
Azimut	Verwendung bei dem Umgang mit dem Laser-Rangefinder, ein nach einer Himmelsrichtung orientierter Horizontalwinkel
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BVerwG	Bundesverwaltungsgericht
Erfassungsrate	Rate, mit der Zielvogelarten tatsächlich als Ziel vom AKS erkannt werden
Erkennungsrate	Rate, mit der erfasste Zielarten hinsichtlich ihrer Größe korrekt vom AKS klassifiziert werden
Flug	Flugbewegung eines Individuums
Flugkorridor	Bereich der von einer Art/ einem Brutpaar regelmäßig zwischen Brutplatz und Nahrungsgebiet durchflogen/überflogen wird; ggf. Ergebnis der Habitatpotenzialanalyse
Flugsequenz	(bis zu) fünfminütiges Intervall eines Flugs
KNE	Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende
LRF	Laser-Rangefinder; Gerät zur elektrooptischen Entfernungsmessung, hier: Modell Vectronix Vector 21 Aero
Reaktionsbereich	Artspezifischer Abstand zur WEA ab welcher eine Abschaltung eingeleitet werden muss, hier: Rotmilan 378 m, Weißstorch 512 m und Seeadler 529 m.
Rotorfläche	von Rotoren überstrichene Kreisfläche
Rotorradius	Hälfte des Rotordurchmessers des geplanten WEA-Typs
Signifikanzschwelle	Im Artenschutz: Verfahren zur Bewertung des Tötungsrisikos hier für windkraftsensible Vogelarten
Trudelbetrieb	Verlangsamung der Rotordrehzahl der WEA
WEA	Windenergieanlage(n)
WP	Windpark
Zielart	Rotmilan, Seeadler, Weißstorch

1 EINLEITUNG – ANLASS UND AUFGABENSTELLUNG

Der Ausbau von Windenergieanlagen steht zunehmend in Konflikt mit gesetzlichen Bestimmungen zum Schutz gefährdeter Vogelarten. Im Rahmen einer Pilotstudie zur automatischen Vogelerfassung und damit zur bedarfsgerechten Abschaltung von Windenergieanlagen (WEA) wurde ein kamerabasiertes System vom Hersteller BIOSECO an einer Vestas V150 4.2MW (Gesamthöhe 200 m, Nabenhöhe 125 m, unterer Rotordurchgang 50 m) untersucht. Das Antikollisionssystem (AKS) von BIOSECO soll dem Schutz der Vögel dienen, indem das signifikant erhöhte Tötungsrisiko von windkraftsensiblen Vogelarten (hier: Rotmilan, Seeadler und Weißstorch) gesenkt wird und somit das Eintreten von artenschutzrechtlichen Verbotstatbeständen verhindert wird. Der Einsatz von funktionsfähigen AKS zielt darauf ab, die vom Anlagenbetrieb (Rotordrehung) ausgehenden Kollisionsrisiken zu senken. Die kollisionsmindernde Wirkung wird durch das Versetzen der Anlage in den Trudelbetrieb erreicht.

Dieser Ergebnisbericht zeigt eine artenschutzfachliche Bewertung dieses Systems auf. Die Schwerpunkte dieser Studie liegen bei der Erfüllung des Artenschutzes anhand von Vorgaben des KNE (siehe KNE Checkliste 2021: BRUNS et al. 2021).

Die Leistungsmerkmale des Bioseco Systems wie Erfassungsrate, Erkennungsrate und Reichweite wurden anhand einer fachlichen Erprobung (Feldversuch) im Jahr 2022 durchgeführt und ausgewertet. Diese systemspezifischen Leistungsfähigkeitskennwerte gelten für Standorte mit vergleichbarer Einsehbarkeit.

BIOCONSULT SH GMBH & Co. KG, Husum, wurde durch die PNE AG, Cuxhaven, beauftragt, Daten zu erheben und eine artenschutzfachliche Bewertung des Vogelerkennungssystems vorzunehmen. Für den Teil der Datenanalyse wurde BIONUM GMBH – Büro für Biostatistik und Ökologische Statistik mit Sitz in Hamburg, als Subkontraktor beauftragt.

1.1 Untersuchungsgebiet

Die Vestas V150 4.2 MW WEA mit dem installierten Bioseco-System liegt im Windvorranggebiet Nr. PR3_SEG_056 im Kreis Segeberg und berührt Gebiete der Gemeinden Lentförden und Nützen. Östlich verläuft die Bundesstraße B4 in Nord-Süd-Richtung, die Hamburg mit Bad Bramstedt verbindet. Das Gebiet um die WEA ist zudem von kleineren Wirtschaftswegen durchzogen (s. Abb. 1.1).

Grünlandflächen dominieren im Bereich westlich der Bundesstraße und nehmen einen Großteil der Fläche ein. Ackerflächen mit Getreide und Maisanbau sind im zentralen Bereich zu finden, aber auch über das gesamte Gebiet verteilt. Im näheren Umfeld der WEA befinden sich neben den landwirtschaftlich genutzten Flächen auch Grünländer mit z. T. Pferdebeweidung (s. Abb. 1.3). Östlich der Bundesstraße befinden sich Sukzessionsflächen unterschiedlicher Stadien infolge von Sand- und Kiesabbau. Nördlich befinden sich Siedlungsflächen der Ortschaft Lentförden.

Nordöstlich des Vorranggebietes und östlich der Bundesstraße befinden sich größere Gewässer (z. T. Angel-Seen). Die Krumbek verläuft in nord-südlicher Richtung durch das Untersuchungsgebiet. Im südlichen Bereich befinden sich größere, teilweise strukturreiche Waldflächen mit verschiedenen Baumarten unterschiedlichen Alters. Westlich und östlich liegen kleinere, teilweise künstlich bewaldete Waldflächen und kleinere Gehölzflächen.

Westlich des Vorranggebietes befindet sich in einem Abstand von > 3 km das Grotmoor sowie südlich die Nützener und die Kaltenkirchener Heide (FFH-Gebiet). Der Umgebungsbereich der WEA wird insbesondere westlich der Bundesstraße von linearen Strukturen wie Knicks und Knickresten, Feldgrenzen mit und ohne Gehölze, sowie Gehölzstrukturen mit und ohne Überhänger durchzogen. Größere Baumstrukturen oder andere Sichtbarrieren befinden sich nicht im näheren Umfeld der WEA, so dass sehr gute Sichtverhältnisse für das Bioseco-System bestehen (vgl. Abb. 1.2 bis Abb. 1.4; s. auch Kapitel 2.2 und 3.1).

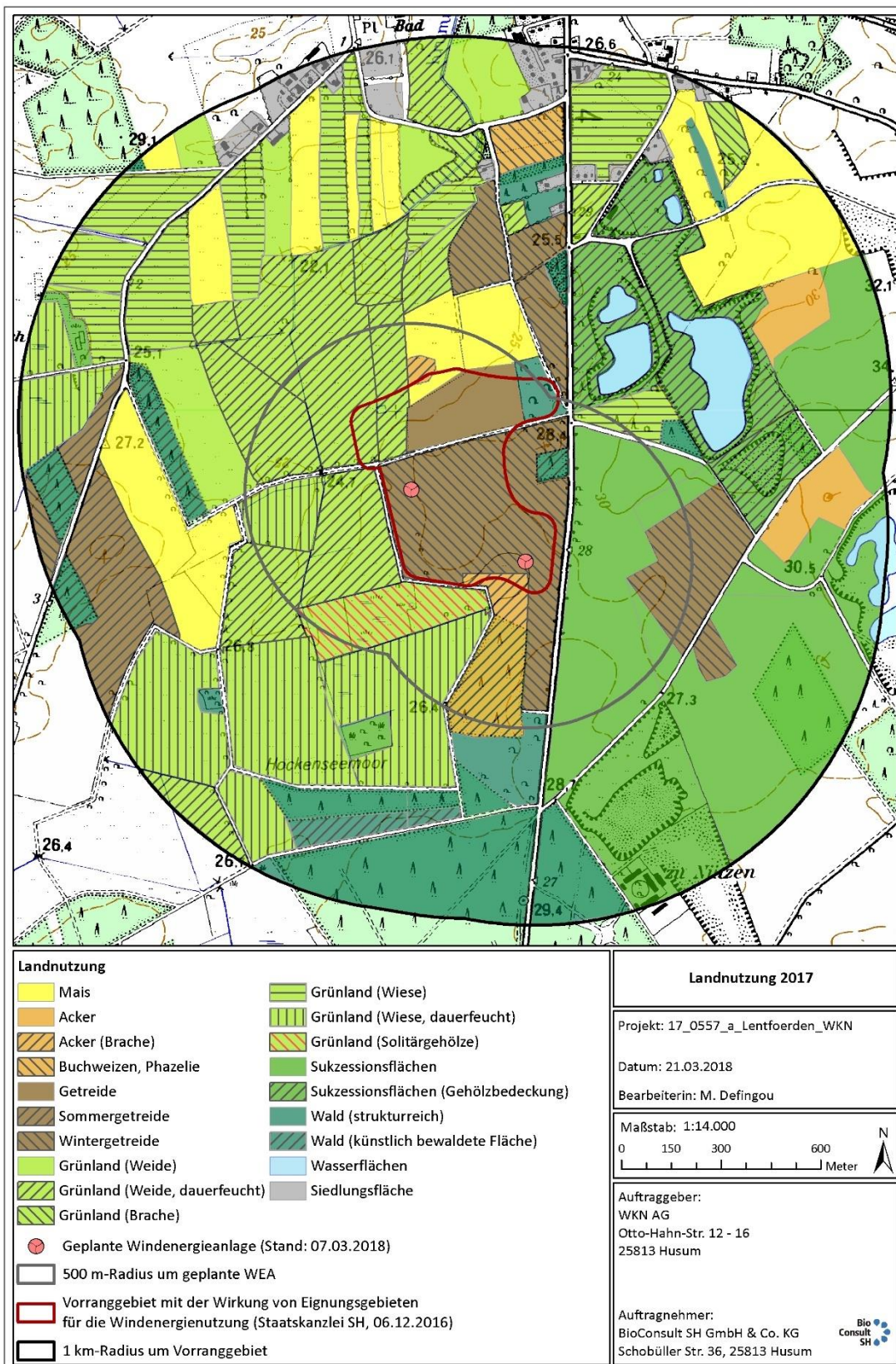


Abb. 1.1: Landnutzung im Bereich der WEA aus dem Jahr 2017.



Abb. 1.2: Blickrichtung Nordwesten von der WEA mit den installierten AKS (Foto: BioConsult SH 2022).



Abb. 1.3: Blickrichtung Westen von der WEA mit den installierten AKS (Foto: BioConsult SH 2022).



Abb. 1.4: Blickrichtung Südwesten von der WEA mit den installierten AKS (Foto: BioConsult SH 2022).

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Bioseco-System „Long Range“ Funktionsweise

Ein Bioseco-Detektionsmodul vom Modell „Long Range“ besteht aus insgesamt vier Kamerasensoren (13 Mpx), welche auf einem Modul jeweils im oberen und unteren Bereich installiert, sind. Die Module werden direkt an den Turm der WEA in einer variablen Höhe zwischen 5 bis 10 m und wenn projektspezifisch erforderlich auch > 20 m, installiert, im vorliegenden Fall in einer Höhe von 7 m. Um einen 360 Grad Überwachungsbereich zu erzielen (s. Abb. 2.2), werden insgesamt acht Module an einer WEA installiert, also insgesamt 32 Kameras pro WEA (s. Abb. 2.3 und Abb. 2.4). Die acht installierten Detektionsmodule von Bioseco überwachen jeweils einen Abschnitt von 45° horizontaler Öffnungswinkel insgesamt 360° (8 x 45°); s. Abb. 2.5). Durch diese sogenannte Stereoanordnung der Kameras ist eine Positionsbestimmung (s. Kapitel 2.6 und Kapitel 3.4) möglich.

Alle Kameras zusammengefasst weisen einen vertikalen Öffnungswinkel von 65° auf. Der Höhenwinkel der unteren Erfassungskante (leichte Neigung nach oben) beträgt 2° (s. Abb. 2.1).

Die relevanten Vögel werden aus einer Entfernung von ca. 500 m erfasst und nach ihrer Größe analysiert, es ist keine Identifikation auf Artebene möglich. Bioseco unterscheidet in fünf Klassengrößen: extra-small, small, medium, large und extra-large. Ein Signal an die WEA, um diese in den Trudelmodus zu versetzen, erfolgt im vorliegenden Projekt für die Zielarten ab einer Größe \geq medium. In diese Kategorie fallen u. a. die Arten Rotmilan, Seeadler und Weißstorch. Fliegt ein Vogel der Kategorie \geq medium in den Gefahrenbereich (s. Kapitel 2.4 und Kapitel 2.5) erfolgt in Zukunft die Abgabe des Signals an die WEA, im vorliegenden Testverfahren wurde eine WEA-Abschaltung nur simuliert. Allerdings wurde bei der Ermittlung der zeitgerechten Reaktion der WEA, die Signalkette in Echtzeit getestet. Das Bioseco-System arbeitet zusätzlich mit Vergrämung (Licht und Ton), welches aber nicht Bestandteil dieser Studie ist.

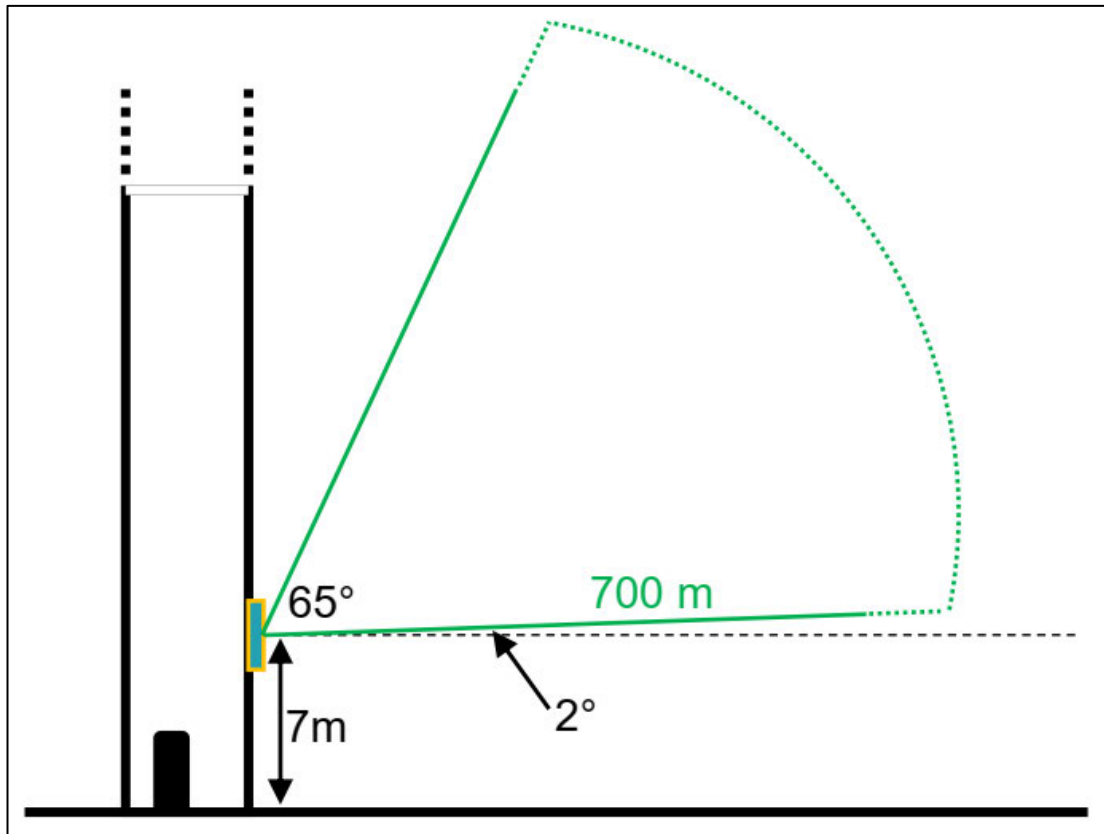


Abb. 2.1: Schematische Darstellung der Kameraeigenschaften mit Angabe der Installationshöhe und dem vertikalen Öffnungswinkel und der leichten Neigung nach oben (Darstellung unverändert PNE 2023).

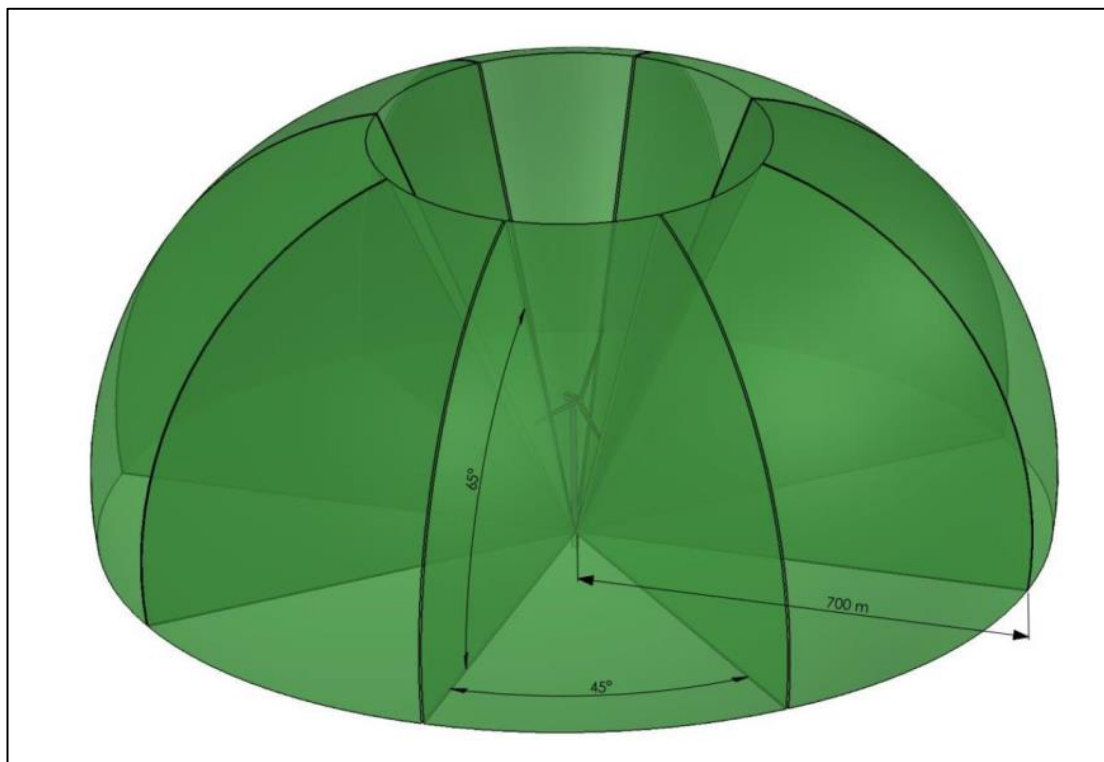


Abb. 2.2: Schematische 3D-Darstellung der Sichtbereiche der acht installierten Kameramodule (Darstellung unverändert Bioseco).



Abb. 2.3: Die Vestas WEA in Lentföhrden mit acht installierten Bioseco-Systemen in 7 m Höhe (Foto: BioConsult SH 2022).



Abb. 2.4: Detailansicht der einzelnen Detektionsmodule von Bioseco (Foto: BioConsult SH 2022).

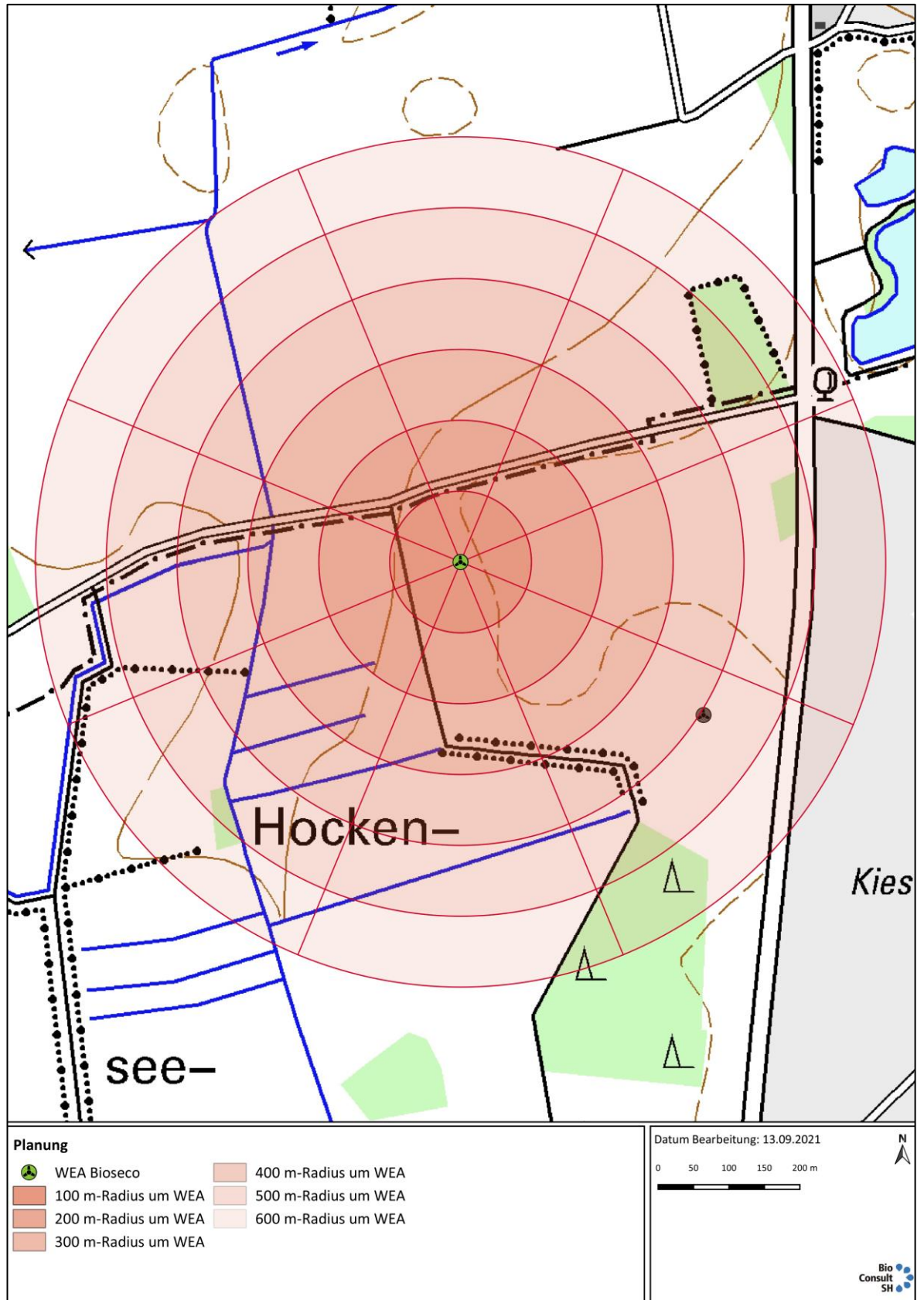


Abb. 2.5: Erfassungsbereich um die Vestas WEA mit den acht Bioseco-Systemen (Karte erstellt BioConsult SH 2021).

2.2 Bioseco-System Sichtbarkeit und Erfassungshöhe

Für die drei Zielarten (Rotmilan, Seeadler und Weißstorch) sind die Reaktionsbereiche zwischen 378 m bis 530 m entscheidend (s. dazu Kapitel 2.4), zusätzlich wurde noch Entfernungen bis maximal 700 m (Erfassungsbereich) ausgewertet.

Für den vorliegenden Kameraneigungswinkel von 2° und der Installationshöhe von 7 m wurde die minimale Erfassungshöhe bei den oben genannten drei Entfernungen (378 m, 530 m und 700 m) durch PNE berechnet. (s. Kapitel 3.1; J. KREUTZFELDT 2023). Die Auswertung der Sichtbarkeit und der Erfassungshöhe des Bioseco-Systems wurde durch die PNE GmbH durchgeführt (J. KREUTZFELDT 2023). Als Berechnungsrundlage dienten digitale Oberflächenmodelle vom Landesamt für Vermessung und Geoinformation SH mit einer Auflösung geringer als 1 m in allen drei Dimensionen, welche mit den Kameraöffnungswinkeln auf der min. Erfassungshöhe mithilfe von GIS-Software verschnitten wurden.

2.3 Datengrundlage

Um das Bioseco-System validieren zu können, sind Referenzdaten, durch ein vom KNE so genanntes Zweitsystem, erforderlich. Dafür wurde bei der vorliegenden Untersuchung mit einem Laser-Range-Finder (LRF) vom Modell *Vectronix Vector 21 Aero* (s. Abb. 2.6) gearbeitet. Die Eignung dieses Geräts für diese Art der Untersuchung hat sich in verschiedenen Projekten bewährt und BioConsult SH hat langjährige Erfahrungen mit der Erfassung und Einmessung unterschiedlicher Vogelarten und Fragestellungen. Das Gerät wurde in verschiedenen Ländern erfolgreich zur Entfernungs- und Flughöhenbestimmung von Vögeln verwendet (PENNYCUICK et al. 2013; ASCHWANDEN et al. 2015; SKOV et al. 2015, 2018; JENSEN et al. 2016). Die hier untersuchten Zielarten (Rotmilan, Seeadler und Weißstorch) können aufgrund ihrer Größe und ihres relativ ruhigen Flugverhaltens gut mit dem LRF verfolgt und eingemessen werden.



Abb. 2.6: LRF vom Modell *Vectronix Vector 21 Aero*.

Technische Daten des LRF *Vectronix Vector 21 Aero*:

- 42 mm Binokular mit 7-facher Vergrößerung, verstellbare Augenweite, Distanzmessung bis 12.000 m mit einer Genauigkeit von weniger als 5 m.

- es wird ein Klasse 1 Laser verwendet (DIN EN 60825-1: die zugängliche Laserstrahlung ist ungefährlich oder der Laser ist in einem geschlossenen Gehäuse).
- Abmessungen: 205 mm x 178 mm x 82 mm, Gewicht: 1,7 kg.
- Stromversorgung mit einer 6 V Lithium Batterie oder externer Stromquelle von 7 VDC bis 14 VDC.
- Bluetooth- oder RS-232 Schnittstelle zu PC, Smartphone, Tablet oder Garmin GPS der Serie 60/72/76.

Ideale Voraussetzungen:

- klare Atmosphäre, bewölkter Himmel, Dämmerung.
- gute Reflexionsfähigkeit des Zielobjektes.
- raue Oberfläche des Zielobjektes senkrecht zum Laserstrahl.
- stabiler Standpunkt (um sicher zu stellen, dass der Laserstrahl nicht das Zielobjekt verliert) – dafür wurde mit einem Stativ gearbeitet.

Ungünstige Voraussetzungen:

- Schneefall, Nebel, Regen, Dunst, hohe Luftfeuchtigkeit, Hitze.
- kleine Zielobjekte, die nicht den gesamten Laserstrahl „halten“ und reflektieren.
- „schwierige“ Zielobjekte (dunkel, uneben).

Da im LRF ein magnetischer Kompass verbaut ist, kann es zu Problemen in der Nähe von Metallgegenständen kommen (so genannte Missweisung). Um potenziell auftretende Missweisungen auszugleichen, wurde vor jedem Termin der LRF kalibriert und auf die WEA eingemessen.

Der Ornithologe bedient den LRF und achtet auf die konkrete Zieldatenerfassung der vorbeifliegenden Vögel (Schwerpunkt Rotmilan, Seeadler, Weißstorch; aber es werden alle großen Groß- und Greifvögel eingemessen) und dokumentiert alle Erfassungen, zusätzlich handschriftlich mit der jeweiligen Artidentifikation. Da Bioseco keine Arterkennung anwendet, wird eine Artidentifikation anhand der Größenklasse anhand dieser Daten ausgewertet. Wenn möglich, sollte die Zielart so häufig wie möglich eingemessen werden. Dabei fallen alle drei Zielarten unter die Kategorie \geq medium.

Generell ist die Handhabung des LRF vergleichbar mit der eines Fernglases. Der LRF ist jedoch zusätzlich mit einem batteriebetriebenen Lasersystem ausgestattet, mit dessen Hilfe Entfernung, Höhe und gegebenenfalls Richtung eines Objektes ermittelt werden können. Bei bekannter geografischer Position und Höhe des Beobachters kann der Einsatz des LRF dreidimensionale Daten von den eingemessenen Vögeln liefern. Der LRF wird hierbei in der Regel mit einer Frequenz von etwa 10 Sekunden-Intervallen betrieben und die Positions- und Höhendaten automatisch über GPS/

Smartphone/ Laptop etc. gespeichert (Skov et al. 2015). Auf diese Weise können längere Serien von Datenaufzeichnungen einzelner Vögel oder Vogeltrupps angelegt werden.

Zur elektronischen Speicherung und Darstellung der Messdaten lässt sich der LRF mit verschiedenen Endgeräten koppeln, im vorliegenden Versuchsaufbau wurde der LRF mit einem GARMIN GPS gekoppelt und betrieben.

Das Bioseco-System erzeugt ungefähr alle 100 ms Positionsdaten von den erfassten Objekten. Zur Validierung des Bioseco-Systems wurden mittels eines LRF von mindestens einem Ornithologen (BioConsult SH, s. Abb. 2.7) an 34 Erfassungstagen Vögel parallel zu dem Bioseco-System eingemessen (s. Kapitel 2.4.1.). Jeder dieser so genannten Tracks besteht aus LRF-Samples, welche ca. alle 5 bis 10 Sekunden aufgezeichnet werden. Basierend auf diesen Daten wird die Erfassungsrate des AKS durch das Büro Bionum ermittelt (s. Kapitel 3.1). Es erfolgt ein Vergleich der LRF-Daten mit den generierten Logfiles der Bioseco-Kameras. Der Ornithologe misst mit dem LRF die radiale Distanz, den Steigungswinkel und den Azimut mittels eines Laserstrahls auf das eingemessene Zielobjekt. Aus diesen Parametern misst der LRF die Höhe des Zielobjektes ein. Die Position des Ornithologen erfolgt mit einem GPS-Smartphone, durch mehrfache Einmessungen des Zielobjektes entsteht ein dreidimensionaler Flugtrack. Zu jedem LRF-Track wurde zusätzlich durch den Ornithologen die Art bestimmt und protokolliert und mit den Logfiles der Kameras verglichen.



Abb. 2.7: Parallele Erfassung mit dem LRF durch BioConsult SH (Foto: PNE 2022).

Im Rahmen der Studie wurden vielfältige Daten im Bereich der WEA erhoben, die eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Systems möglich machen. Bei den erhobenen Daten handelt es sich u. a. um:

- örtlich-zeitliche LRF-Daten von anfliegenden Zielarten (erhoben durch BioConsult SH im Jahr 2022)
- örtlich-zeitliche Kamera-basierte Daten von anfliegenden Zielarten aus dem AKS.
- örtlich-zeitliche GPS-Daten von gezielt durchgeführten Drohnen-Flügen.
- Signalübertragungszeiten und Stoppzeiten vom AKS und WEA (PNE 2023).

Im Rahmen dieses Berichtes werden diese Daten dafür genutzt, die Leistungsfähigkeit des Systems vor dem Hintergrund der KNE-Checkliste (BRUNS et al. 2021) zu prüfen. Hierbei werden u. a. die folgenden Punkte analysiert:

- die Definition von sinnvollen zielart-spezifischen Erfassungs- und Reaktionsbereichen;
- die zielart-spezifische Erfassungsrate (d. h., die Rate, mit der Zielvogelarten tatsächlich als Ziel vom AKS erkannt werden);
- die zielart-spezifische Erkennungsrate (d. h., die Rate mit der erfasste Zielarten hinsichtlich ihrer Größe korrekt vom AKS klassifiziert werden);
- die Positionsgenauigkeit der AKS-basierten Messungen;
- die zeitgerechte Reaktion der WEA-Abschaltung inkl. Stoppzeit der WEA.

Datenmanipulationen wurden ausgeschlossen indem zuerst die AKS-Daten von Bioseco an BioConsult SH geschickt wurden und im Anschluss die LRF-Daten durch BioConsult SH zur Verfügung gestellt wurden.

Tab. 2.1 Erfassungstermine im Zeitraum 09.03.2022 bis 22.09.2022 mit Angabe der Beobachtungsdauer und der Anzahl der Erfasser.

Nr.	Datum	Anzahl Erfasser	Zeitraum	Dauer [hh:mm]
1	09.03.2022	1	09:00 – 17:00	08:00
2	12.04.2022	1	09:30 – 17:30	08:00
3	16.04.2022	1	09:00 – 17:00	08:00
4	22.04.2022	2	10:00 – 18:00	16:00
5	26.04.2022	1	07:00 – 15:00	08:00
6	28.04.2022	1	07:30 – 15:30	08:00
7	29.04.2022	1	06:30 – 14:30	08:00
8	03.05.2022	2	07:00 – 15:00	16:00
9	05.05.2022	2	07:30 – 15:30	16:00
10	23.05.2022	1	08:00 – 16:00	08:00
11	24.05.2022	2	08:00 – 18:00	16:00
12	15.06.2022	1	06:00 – 14:00	08:00
13	22.06.2022	2	08:00 – 16:00	16:00
14	23.06.2022	2	07:00 – 15:00	16:00
15	29.06.2022	2	07:00 – 15:00	16:00
16	05.07.2022	2	07:00 – 15:00	16:00
17	12.07.2022	2	07:00 – 15:00	16:00
18	13.07.2022	2	07:30 – 15:00	16:00
19	28.07.2022	2	08:00 – 16:00	16:00
20	19.08.2022	2	07:00 – 15:00	16:00
21	23.08.2022	2	07:30 – 15:30	16:00
22	25.08.2022	1	07:00 – 15:00	08:00
23	26.08.2022	1	08:00 – 16:00	08:00
24	29.08.2022	1	08:00 – 16:00	08:00
25	30.08.2022	1	09:00 – 17:00	08:00
26	31.08.2022	1	04:30 – 12:30	08:00

Nr.	Datum	Anzahl Erfasser	Zeitraum	Dauer [hh:mm]
27	02.09.2022	1	08:00 – 16:00	08:00
28	04.09.2022	1	10:00 – 18:00	08:00
29	05.09.2022	1	04:30 – 12:30	08:00
30	07.09.2022	1	08:30 – 16:30	08:00
31	08.09.2022	1	04:30 – 12:30	08:00
32	12.09.2022	1	08:00 – 16:00	08:00
33	21.09.2022	1	06:30 – 14:30	08:00
34	22.09.2022	1	05:00 – 13:00	08:00

2.4 Reaktionsbereich und Erfassungsbereich

Die Angaben der Erfassungsreichweite und Reaktionsdistanz beruht auf den im Folgenden präsentierten Messungen/Validierungen von Fallstudien. Zuvor sollten diese Werte aber plausibel hergeleitet werden. Die Berechnungen bzw. die Auswertungen zu den Erfassungsraten wurden durch das Büro Bionum durchgeführt.

Der **Reaktionsbereich** ergibt sich hier aus der Distanz, die eine spezifische Vogelart innerhalb der Zeit zurücklegt, die dafür benötigt wird, ein Abschaltsignal einzuleiten und die WEA in den Trudelbetrieb zu überführen. Die Zeit, welche benötigt wird, um die WEA in den Trudelbetrieb zu versetzen wird im Mittel mit 26 s angegeben. Zusätzlich ist der Zuschlag der zeitlichen Verzögerung durch die WEA ($t_{\text{latenz}} = 7$ Sekunden) zu addieren. Diese Betrachtungsweise stellt in vielerlei Hinsicht eine Abschätzung im Sinne der Vorsorge dar, denn

- es wird davon ausgegangen, dass der Vogel direkt auf den Risikobereich zufliegt (und nicht den Reaktionsbereich tangential schneidet);
- es wurden reale Fluggeschwindigkeiten verwendet, d.h. es wurde bei der Berechnung der Reaktionsdistanz davon ausgegangen, dass der Vogel geradlinig fliegt (was oft nicht der Fall ist – z. B. beim Suchflug oder bei thermischem Kreisen, was die effektive Geschwindigkeit u. U. deutlich verringert);
- es wurden Unsicherheiten aus der Positionsgenauigkeit dem Reaktionsbereich zugeschlagen; ergo davon ausgegangen, dass der Fehler immer zugunsten einer überschätzten Distanz ausfällt; und
- es wurde dem Reaktionsbereich die Rotorblattlänge addiert, was vom ungünstigsten (und unwahrscheinlichsten) Szenario ausgeht, dass der Vogel genau in der Flucht der Rotorblattscheibe fliegt.

Bezüglich der mittleren Fluggeschwindigkeiten wurden uns alle verfügbaren Werte aus der Literatur gemittelt und verwendet, um einen maximal objektiven Weg zu gehen. Bzgl. des Rotmilans gibt es hier die Angaben von 7,9 m/s (Spröttge/planungsgruppe grün GmbH, S. 31 in (BRUNS, E. ET AL 2019); 9,2 m/s (TENNEKES 1997); 10,1 m/s (BRUDERER & BOLDT 2001); 7,9 m/s bzw. 10,9 m/s (PENNYCUICK 2001); 5,1 m/s (FRÜH & STARK 2020); 8,5 m/s (SPAAR 1997); sowie 8,3 (MERCKER et al. 2023). Es ergab sich ein Mittelwert von 8,14 m/s, der im Folgenden für den Rotmilan angenommen wurde. Bzgl. des Weißstorks gab es drei verschiedene Berechnungen in BRUDERER & BOLDT 2001, welche

sich auf unterschiedliche Verhaltensweisen und Messmethoden beziehen, nämlich 13,5 m/s; 9,1 m/s sowie 12,9 m/s. Im Mittelwert ergibt sich **11,83 m/s**. Für den **Seeadler** schlussendlich wurden 13,1 m/s in (BRUDERER & BOLDT 2001) berechnet, sowie 11,2 m/s bzw. 12,6 m/s in (PENNYCUICK 2001). Hier liegt der Mittelwert somit bei **12,3 m/s**.

Die Zeit, die dafür benötigt wird, ein Abschaltsignal einzuleiten und die WEA in den Trudelbetrieb zu überführen, wurde separat für die spezifische beprobte WEA (Vestas V150 4,2 MW) im Rahmen des zu beurteilenden Projektes von PNE untersucht. Hierfür wurden 92 Stopps aktiv mit einer Drohne durchgeführt und anschließend ermittelt, wie lange die unterschiedlichen Schritte bis zum Trudelbetrieb dauerten. Eine Übersicht der Schritte bis zu dem Punkt, an dem das Stopp-Signal an die WEA gegeben wurde, findet sich in Abb. 2.8. Hierbei zeigte sich, dass die durchschnittliche Verzögerung 7 Sekunden betrug (minimal: 1 Sekunde, maximal: 11 Sekunden) was maßgeblich der Tatsache geschuldet war, dass andere Signale im Kontext der Parksteuerung eine höhere Priorität haben. Zu diesen 7 Sekunden Latenzzeit muss noch die Zeit hinzuaddiert werden, die eine Anlage im Durchschnitt benötigt, um vom Betrieb in den Trudelmodus zu kommen. Dieser Wert wurde ebenfalls empirisch basierend auf 11 eingeleiteten Stopps bestimmt und liegt im Mittel bei 26 Sekunden (minimal: 22 Sekunden, maximal: 32 Sekunden).

Der Reaktionsradius, $r_{Reaktion}$, ergibt sich final über die Formel

$$r_{Reaktion} = (v_{Vogel} \cdot (t_{Stopp} + t_{Latenz}) + r_{Rotor}) \cdot f_{RDE},$$

wobei v_{Vogel} die artspezifische Fluggeschwindigkeit bezeichnet (s.o.), $t_{Stopp} = 26$ sec die Zeit, um vom Betrieb in den Trudelmodus zu kommen, $t_{Latenz} = 7$ sec die Latenzzeit, $r_{Rotor} = 75$ m die Rotorblattlänge, sowie f_{RDE} der relative örtliche Messfehler.

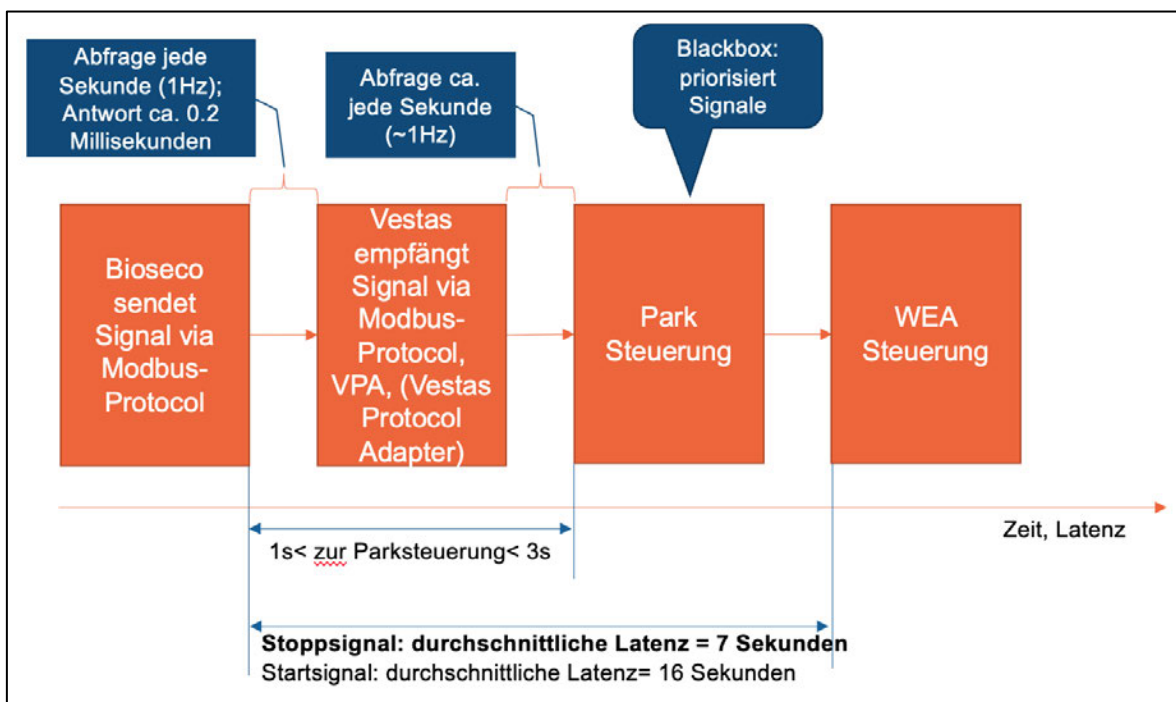


Abb. 2.8: Die verschiedenen Schritte vom Senden des Bioseco-Stopp-Signals bis zum Ankommen dieses Signals an der WEA.

Zusammengenommen ergeben sich also die folgenden **Reaktionsbereiche** für die betrachteten Vogelarten:

Zudem sei angemerkt, dass die oben berechneten Reaktionsradien auch durch die AKS-unabhängige Tatsache unnötig vergrößert sind, dass die Signal-Priorisierung im Kontext der Windparksteuerung zu einem hohen Wert von t_{Latenz} führt.

Die **Erfassungsreichweite** sollte nach KNE-Checkliste mindestens dem Reaktionsradius entsprechen, als Orientierungswert für die Mindestreichweite wird eine Entfernung von 500 m empfohlen. Im Zuge der vorliegenden Analysen werden daher die drei unterschiedlichen Distanzen von **378 m**, **530 m** sowie **700 m** hinsichtlich der Erfassungs- und Erkennungsrate analysiert. Zudem wird die kontinuierliche Änderung beider Raten von 0 - 700 m präsentiert, was eine noch differenziertere Betrachtung erlaubt.

Es ist entscheidend, dass der Erfassungsbereich größer als der Reaktionsbereich ist, deshalb wird im vorliegenden Fall für den Weißstorch und den Seeadler die Auswertungen mit einem Radius von **530 m** betrachtet, statt 512 m und 529 m.

Rotmilan: $r_{\text{Reaktion}} = 377,98 \text{ m}$

Weißstorch: $r_{\text{Reaktion}} = 511,93 \text{ m}$

Seeadler: $r_{\text{Reaktion}} = 528,99 \text{ m}$

2.4.1 Feldversuche

Das Konzept zur Untersuchung der Erfassungsrate beruht auf dem Vergleich von Vögeln, die im Feld (örtlich und zeitlich verortet) durch Ornithologen (BioConsult SH, 2021, s. Kapitel 2.3) erfasst wurden mit dem, was durch das AKS erfasst wurde. Insbesondere wurden von den beobachtenden Personen Laser-Rangefinder (LRF)-Geräte eingesetzt, die eine relativ präzise Verortung der Vögel vornehmen können (RANSOM, D., & PINCHAK, W. E. 2003). Aus diesem Grund wird im Folgenden (vereinfacht) davon ausgegangen, dass die LRF-Daten prinzipiell mit keinem nennenswerten örtlichen und/oder zeitlichen Fehler behaftet sind (s. dazu auch Kapitel 2.3).

Insgesamt wurden LRF-Daten von 34 Untersuchungstagen (09.03.2022-22.09.2022, s. Tab. 2.1) verwendet. Aufgrund von Problemen mit dem LRF-Zeitstempel wurden zuvor 2 Tage aus den Analysen entfernt. Jeder LRF-Track besteht oft aus mehreren erfassten Punkten, die einem individuellen Vogel zuzuordnen sind. Eine Vorselektion der LRF-Punkte erfolgte dahingehend, dass LRF-Punkte a priori aus den Analysen ausgeschlossen wurden, die entweder die jeweils betrachtete Erfassungsreichweite überschritten, oder die Mindest-Erfassungshöhe unterschritten. Letzteres findet sich im Kapitel „Räumliche Abdeckung am Standort“ reflektiert (s. Kapitel 1.1 und 3.1).

Die Zuordnung zwischen LRF-Punkten und AKS-Punkten (wobei letztere eine zeitliche Auflösung von etwa 0,1 Sekunden haben) erfolgte über ein Zweischritt-Verfahren: in einem ersten Schritt wurden die AKS-Daten örtlich-zeitlich auf den Bereich des LRF-Punktes eingeschränkt. Dafür wurden diejenigen AKS-Daten selektiert, die zeitlich gesehen +/- 10 Sekunden um den jeweils betrachteten LRF-Zeitstempel lagen, sowie in einem Radius der dem 0,4-fachen der Distanz zwischen WEA und LRF-

Punkt entspricht. Wird bspw. ein LRF-Punkt 100 m von der WEA entfernt verortet, so werden alle AKS-Punkte berücksichtigt die dichter als 40 m an dem LRF-Punkt liegen. Beide Grenzwerte (+/- 10 Sekunden und $R=0,4$) wurden empirisch bestimmt und anhand vielfältiger Überprüfungen einzelner Tracks plausibilisiert. In einem zweiten Schritt wurde aus der Menge aller verbliebenen AKS-Punkte derjenige ausgewählt, der die kürzeste 3D-Distanz zum AKS-Punkt zeigte. Befand sich kein AKS-Punkt innerhalb des o. g. örtlich-zeitlichen Puffers, wurde der LRF-Punkt als „nicht erfasst“ gewertet.

2.4.2 Statistische Auswertung

Bei den zu analysierenden Daten handelt es sich um eine binäre Variable, die zwischen „erfasst“ und „nicht erfasst“ klassifiziert. Im einfachsten Fall können hier einfach Mittelwerte der entsprechenden Raten ermittelt werden. Die Variable ist allerdings nicht normalverteilt, sodass für die Berechnung der Varianz (z. B. um Konfidenzintervalle zu erhalten) Techniken eingesetzt werden müssen, die keine Normalverteilung voraussetzen (FIELD, A., MILES, J., & FIELD, Z. 2012). Für die vorliegenden Analysen haben wir hierfür sog. Bootstrapp-Methoden (CARPENTER, J., & BITHELL, J. 2000; CANTY, A. J., DAVIDSON, A. C., HINKLEY, D. V., & VENTURA, V. 2006) eingesetzt, die auf jeweils $N=2000$ Resamples beruhen. Diesen Ansatz haben wir im Folgenden mit „simpl“ bezeichnet.

Tatsächlich ist die statistische Situation aber etwas komplexer, denn es werden Zeitreihen untersucht, wobei zusätzlich die LRF-Punkte einzelnen Individuen zuzuordnen sind, sodass in mehrfacher Hinsicht ein Problem von „Pseudo-Replikation“ besteht (HURLBERT, S. H. 1984), was zu einer (u. U. deutlichen) Unterschätzung von Konfidenzintervallen sowie zu verzerrten ermittelten Raten führen kann. Aus diesem Grund haben wir eine zweite Analyse-Strategie angewendet, die diese Datensituation adäquat berücksichtigt. Insbesondere erfolgte hier die Analyse mit geeigneten Regressionsmethoden, den „logistischen Regressionsmethoden“, die zu den „generalized linear models“ (GLMs) (ZUUR, A., IENO, E., & SMITH, G. M. 2007; BOLKER et al. 2009; FIELD, A., MILES, J., & FIELD, Z. 2012) gehören. Die Zugehörigkeit zu verschiedenen Individuen wurde hier inkludiert, indem die Track-ID als „random intercept“ im Kontext von „mixed modelling“ verwendet wurde, was zu der Klasse der „generalised linear mixed models“ (GLMMs) (PINHEIRO, J. C., & BATES, D. M. 2000; BOLKER et al. 2009; ZUUR et al. 2009) führte. Zudem wurde die zeitliche Autokorrelation mittels pACF-Plots analysiert und als geeignete Autoregressionsstruktur (AR1) integriert (ZUUR, A., IENO, E., & SMITH, G. M. 2007; ZUUR et al. 2009; KORNER-NIEVERGELT, F., ROTH, T., VON FELTEN, S., GUELAT, J., ALMASI, B., & KORNER-NIEVERGELT, P. 2015). Diesen Ansatz haben wir im Folgenden mit „GLMM“ bezeichnet.

Naturgemäß führt die komplexe Methode zu einem zu realistischeren (und größeren) Konfidenzintervallen, da zeitliche Autokorrelation mitberücksichtigt wird, zum anderen zu etwas niedrigeren geschätzten Raten. Letzteres hängt damit zusammen, dass bei einer Auswertung auf LRF-Punkt-Niveau diejenigen Tracks besonders stark in die Analyse mit einfließen, zu denen es besonders viele gemessene LRF-Punkte gibt. Dies sind dann u.U. wiederum die Flüge, die besonders gut von den beobachteten Personen aber auch vom AKS erfasst werden konnten. Die Nutzung der Track-ID als „random intercept“ jedoch (s.o.) führt dazu, dass die Daten nicht Punkt- sondern vielmehr Individuen-spezifisch ausgewertet werden, was den o.g. verzerrenden Effekt korrigiert.

Für die Analyse der Raten in Abhängigkeit von der Distanz zwischen LRF-Ziel und AKS wurde schlussendlich die Distanz als potenziell nichtlinearer Prediktor verwendet (unter der Verwendung von

Regressions-Splines), was dann zu „generalised additive mixed models“ (GAMMs) führte (HASTIE, T., & TIBSHIRANI, R. J. 1990; ZUUR, A. F. 2012; WOOD 2017). Ansonsten entsprachen diese Modelle strukturell den o.g. GLMMs.

2.5 Größenklassifikation

Die Berechnungen und Auswertungen zu der Größenklassifikation wurden durch das Büro Bionum durchgeführt.

2.5.1 Feldversuche

Das Bioseco-System arbeitet nicht mit einer Artidentifizierung, sondern mit einer Größenklassifikation der Vögel. Die Größe der Vögel wird anhand der Flügelspannweite erfasst und in fünf unterschiedliche Klassen: *extra-small*, *small*, *medium*, *large* und *extra-large*, eingeteilt. Alle als *extra-small* definierten Vögel werden von Bioseco im Vorfeld rausgefiltert. Die als *small* deklarierten Vögel weisen eine Spannweite von 0,7 m bis 1,2 m auf.

Abschaltungen durch das Bioseco-System würden nur dann erfolgen, wenn eine Klassifizierung \geq „medium“ stattgefunden hätte, also alle Vögel die eine Flügelspannweite von mehr als 1,2 m aufweisen. Im vorliegenden Testdurchlauf wurde die WEA nicht in echt abgeschaltet, es wurde lediglich auf der Web-Oberfläche von Bioseco darauf hingewiesen zu welchem Zeitpunkt die WEA in den Trudelbetrieb gegangen wäre. Dementsprechend wurde jede der drei behandelten Zielarten dann als „richtig klassifiziert“ eingestuft, wenn die vom AKS ermittelte Vogelgröße „medium“, „large“ oder „extralarge“ war. Den Analysen zugrunde lagen alle LRF-Punkte, die als „erfasst“ gewertet wurden (vgl. vorheriger Abschnitt).

2.5.2 Statistische Auswertung

Auch hier handelt es sich um eine binomiale zu untersuchende Variable (analog zur Situation im Kontext der Erfassungsrate) mit den Leveln „richtig klassifiziert“ vs. „falsch klassifiziert“ (im Folgenden als Erkennungsrate bezeichnet); entsprechend kann die statistische Analyse ganz analog zu der im Kontext der Erfassungsrate durchgeführt werden.

2.5.3 Korrektur der Erkennungsrate/Größenklassifikation

Die AKS-Daten zur Analyse der Erkennungsrate beinhalteten ein grundsätzliches Problem: jedes Track-Segment, welches eine eigene Track-ID vom AKS zugewiesen bekommen hatte, wurde vor der Speicherung und Weitergabe der Daten mit derjenigen Klassifizierung überschrieben, die für den letzten Datenpunkt (also mit größter Sicherheit) vom AKS bestimmt wurde. Nach Absprache mit PNE war es nicht möglich, die originalen/punktspezifischen Klassifikationen, die eigentlich für die Analyse der Erkennungsrate notwendig waren, zu akquirieren. Damit würden die analysierten Raten zur Erkennung zu optimistisch geschätzt werden, da die Klassifikationen unsicher bestimmter Punkte durch sicherere Klassifikationen überschrieben werden würden.

Um trotzdem eine Abschätzung der Erkennungsrate möglich zu machen, wurde der folgende zusätzliche Korrekturschritt durchgeführt, der gemeinsam mit PNE diskutiert und entwickelt wurde:

In einem ersten Schritt wurde von PNE eine manuelle Nachbestimmung der LRF-Tracks zu den AKS-Daten vorgenommen. Insbesondere wurde zu jedem LRF-Track das Stoppsignal des AKS und die aktuelle Entfernung zwischen AKS und Ziel in der Bioseco Webapplikation ermittelt. So konnte rekonstruiert werden, zu welchem Prozentsatz die LRF-Tracks beim Überschreiten des Reaktionsradius final klassifiziert waren. Hier lag der Reaktionsradius in einem Teil der Daten bei 283 m, später wurde er auf 407 m geändert. Über eine Gerade durch die beiden Prozentpunkte konnte dann in einem zweiten Schritt für jeden Artkomplex (Rotmilan vs. Seeadler + Weißstorch) extra-/interpoliert werden, zu welchem Prozentsatz die LRF-Tracks bei welcher Entfernung richtig klassifiziert waren. Für Entfernungen unterhalb des Wertes, bei dem die Gerade die 0 % schnitt wurde angenommen, dass keine Korrektur notwendig war. Für den Rotmilan ergab sich dadurch ein Korrekturfaktor der Erkennungsrate von $y\%=0,0007 \cdot \text{Distanz}-0,0977$ (N=42 LRF-Tracks), für Seeadler + Weißstorch (die wegen der ähnlichen Größe gemeinsam ausgewertet wurden) ergab sich ein Korrekturfaktor von $y\%=0,0012 \cdot \text{Distanz}-0,326$ (N=47 LRF-Tracks).

Die Differenz der unkorrigierten vs. korrigierten Erkennungsrate in Abhängigkeit von der Distanz zwischen Ziel und AKS ist in Anhang 2 für die verschiedenen Arten grafisch dargestellt. Die Korrektur der ermittelten Erkennungsraten für verschiedene Reaktionsradien (siehe Abschnitt 3.3 sowie Anhang A2) ist jedoch etwas komplexer, da jede Kreisfläche Punkte verschiedenen Abstandes zum AKS enthält. Die entsprechenden Korrekturwerte wurden numerisch bestimmt, indem zu jedem betrachteten Reaktionsradius R eine entsprechende virtuelle Kreisfläche in 10.000 Elemente aufgeteilt, für jedes dieser Elemente die Distanz zum Mittelpunkt berechnet und der Korrekturfaktor bestimmt wurde. Der finale Korrekturfaktor ergab sich dann aus dem Mittelwert der 10.000 Werte.

Die in diesem Abschnitt beschriebene Korrektur ist aus statistischer Sicht nicht optimal, u.a. da sich die durch die Korrektur in das System eingetragenen Unsicherheiten nicht in den berechneten Konfidenzintervallen reflektieren und letztere dadurch (u. U. deutlich) unterschätzt sein können. Dies ist aber aus unserer Sicht der derzeit einzig mögliche Weg überhaupt eine Abschätzung der Erkennungsraten zu ermöglichen und wir halten die geschätzten Größenordnungen prinzipiell für realistisch. Für zukünftige Analysen wäre es jedoch unbedingt erforderlich mit Daten zu arbeiten, die zu jedem AKS-Datenpunkt diejenige Klassifikation angeben, die zu diesem spezifischen Zeitpunkt vorlag.

2.6 Positionsgenauigkeit

Die Berechnungen und Auswertungen zur Positionsgenauigkeit wurden durch das Büro Bionum durchgeführt (BIONUM GMBH 2023). Die Positionsgenauigkeit des AKS wurde mithilfe von drei Drohnenflügen ausgewertet. Als GPS-Referenz wird die GPS Standard Positioning Service (GPS GENAUIGKEIT n.d.) verwendet, welcher eine horizontale Genauigkeit von 7 m in 95 % der Messungen erreicht.

Aus den Messpunkten des Drohnen GPS mit einer Auflösung von 1 Hz werden jene Punkte nach der Referenzobjektmethode ermittelt, die vom AKS erkannt werden ($\Delta t = \pm 1 \text{ s}$, $\alpha = 0,4$). Unter Referenzobjektmethode wird folgendes verstanden, das AKS erzeugt ca. alle 100 ms Positionsdaten

von den erfassten Objekten. Für die Verifizierung des Bioseco-Systems wurden Referenzobjekte zum Abgleich verwendet. Diese Referenzobjekte sind Vögel, die von Ornithologen mittels LRF ca. alle 5 bis 10 Sekunden lokalisiert wurden. Die Herausforderung besteht darin, die Referenzobjekte in der Vielzahl der automatisch erfassten Objekte vom AKS herauszufiltern, da die LRF jeweils Abweichungen in Position und Zeit gegenüber dem AKS und umgekehrt besitzen.

Anschließend wird der räumlich dichteste AKS-Messpunkt aus dem obigen Datensatz zum jeweiligen Drohnenmesspunkt ausgewählt. Es wird ein relativer Distanzerror (RDE) von dem ausgewählten AKS-Messpunkt berechnet. RDE beschreibt das Verhältnis der Distanz von der Drohne und des AKS-Messpunktes zur WEA $RDE = \frac{|Distanz_{AKS} - Distanz_{Drohne}|}{Distanz_{Drohne}}$ z. B. $RDE = |80\text{ m} - 100\text{ m}| / 100\text{ m} = 0,2 \rightarrow$ RDE von 20 %. Die einzelnen Messpunkte werden in Entfernungsklassen von 0 – 800 m in 50 m Schritten sortiert und jeweils der Median und Mittelwert RDE pro Entfernungsklasse bestimmt.



Abb. 2.9: Verwendete Drohnen zur Positionsgenauigkeitsbestimmung, Spannweite von 1,5 m und 2 m (Foto: PNE 2023).

Letzterer wurde ebenfalls in separaten Experimenten quantifiziert, in denen gezielt drei verschiedene Drohnen-Flüge (mit zwei verschiedenen Maximaldurchmessern: 1,5 m und 2,0 m) durchgeführt wurden, und dann die GPS-Positionen der Drohne mit den AKS-ermittelten Positionen abgeglichen wurden (vgl. Abb. 3.12 - Mitte/Oben). Insbesondere wurde hierfür zu jedem Drohnen-GPS-Punkt der zeitlich-örtlich nächstgelegene AKS-Punkt zugeordnet – analog zur Vorgehensweise bei der Bestimmung der Erkennungs- und Erfassungsraten (s.o.). Drohnen-GPS-Punkte ohne zuordbare AKS-Punkte wurden aus der Analyse entfernt, da sich dieser Sachverhalt bereits in der Erfassungsratenrate reflektiert findet. Die finale Anzahl der verwendeten Datenpunkte waren $N=2.317$, $N= 1.295$ sowie $N=1.599$.

3 ERGEBNISSE

3.1 Sichtbarkeit und Erfassungshöhe

Es wurden, wie im Kapitel 2.2 dargestellt, die Sichtbarkeit für die Reaktionsbereiche 378 m, 530 m und 700 m errechnet. Es wurde die minimale Erfassungshöhe bei den genannten drei Entfernungen, bei einer Installationshöhe von 7 m und einem Kameraneigungswinkel von 2 Grad, berechnet. Bei einer Entfernung von 700 m lag die minimale Erfassungshöhe bei 32 m. Bei einer Entfernung von 530 m erreichten die Kameras eine minimale Erfassungshöhe von 26 m; bei einer Entfernung von 378 m lag diese bei 20 m. Alle Höhen beziehen sich auf die Höhe des Bodens bzw. des Fundamentes vom WEA-Turm (s. Abb. 3.1 und Abb. 3.2).

Die unterste Erfassungshöhe bei verschiedenen Entfernungen:

Radius von 378 m (s. Abb. 3.3):

- $\tan(2^\circ) \cdot 378 \text{ m} + 7 \text{ m} = 20,2 \text{ m}$ (gerundet 20 m)

Radius von 530 m (s. Abb. 3.4):

- $\tan(2^\circ) \cdot 530 \text{ m} + 7 \text{ m} = 25,5 \text{ m}$ (gerundet 26 m)

Radius von 700 m (s. Abb. 3.5):

- $\tan(2^\circ) \cdot 700 \text{ m} + 7 \text{ m} = 31,4 \text{ m}$ (gerundet 32 m)

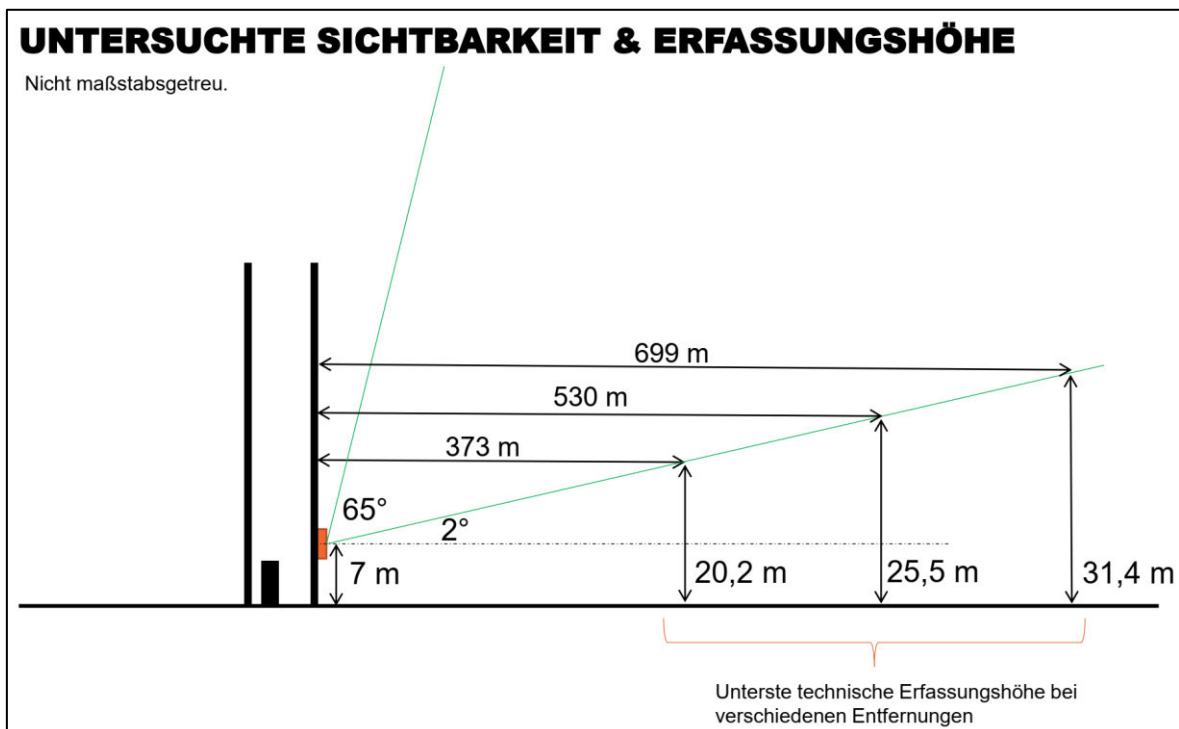


Abb. 3.1: Durch PNE untersuchte Sichtbarkeit und Erfassungshöhe des Bioseco-Systems an der Vestas V150 WEA in Lentförden.

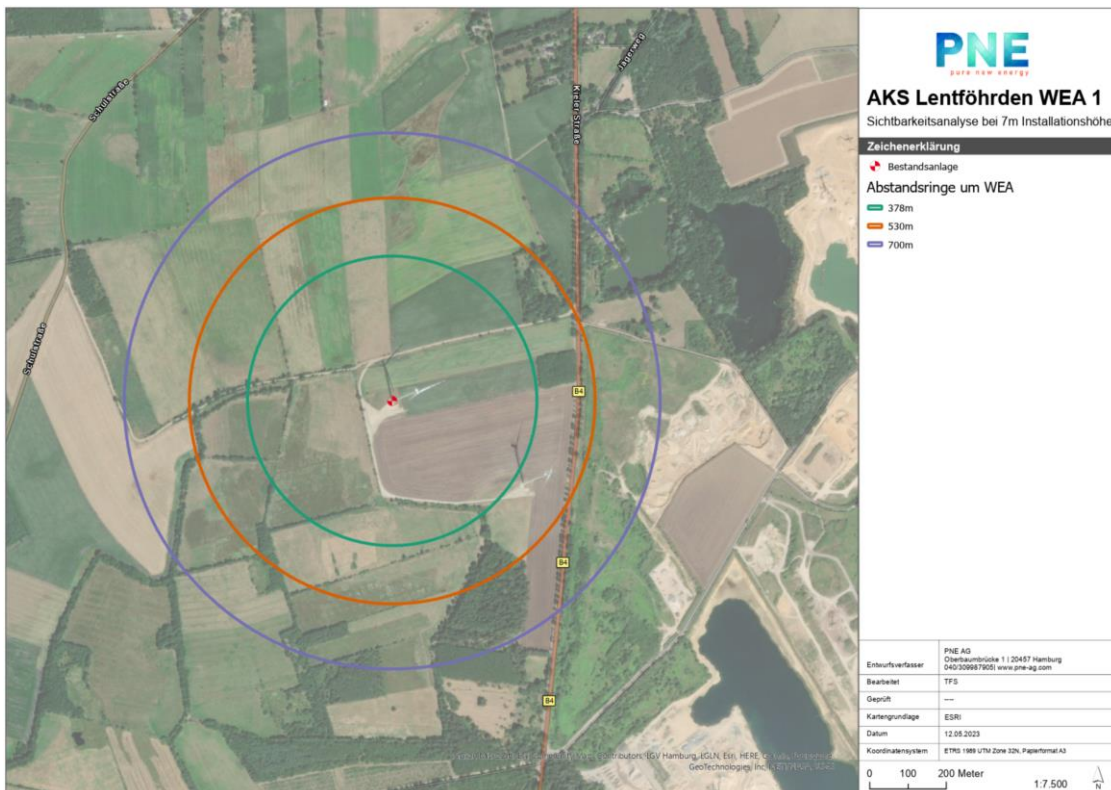


Abb. 3.2: Durch PNE durchgeführte Sichtbarkeitsanalyse, Gesamtübersicht der drei Entfernungen von 378 m, 530 m und 700 m (Karte unverändert PNE erstellt am 12.05.2023).

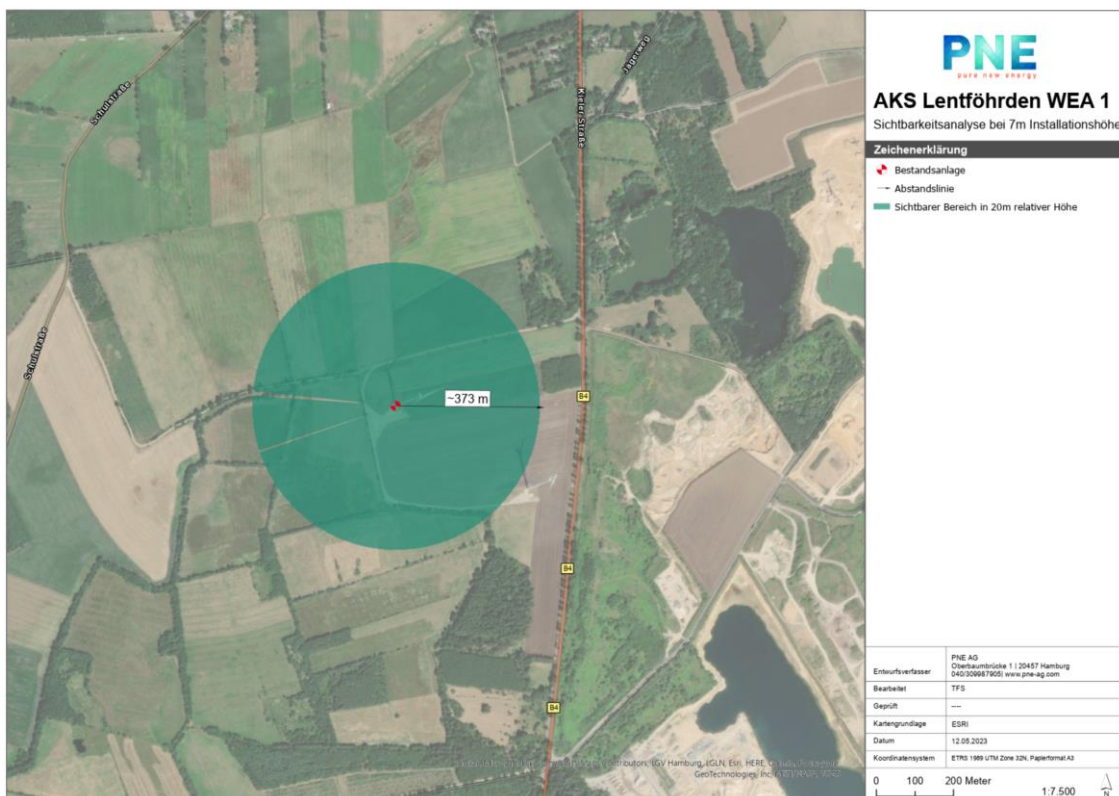


Abb. 3.3: Durch PNE durchgeführte Sichtbarkeitsanalyse, Sichtbarer Bereich in 20 m Höhe (Karte unverändert PNE erstellt am 12.05.2023).

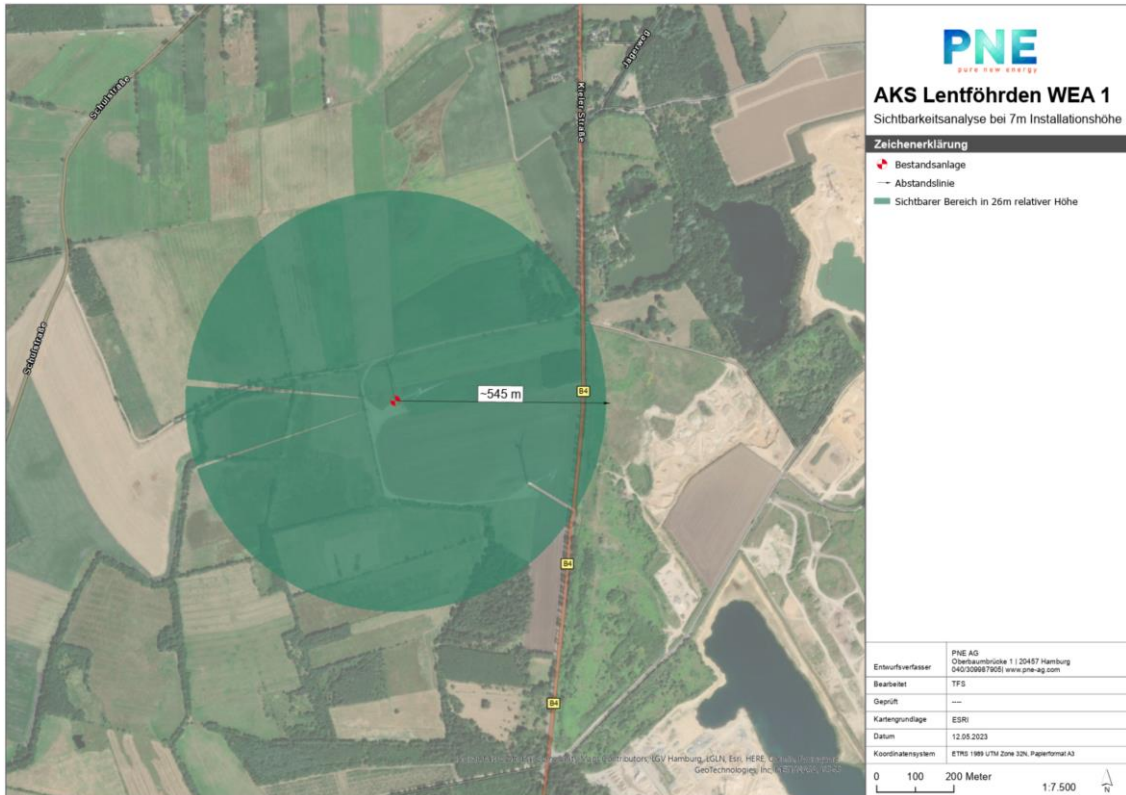


Abb. 3.4: Durch PNE durchgeführte Sichtbarkeitsanalyse, Sichtbarer Bereich in 26 m Höhe (Karte unverändert PNE erstellt am 12.05.2023).

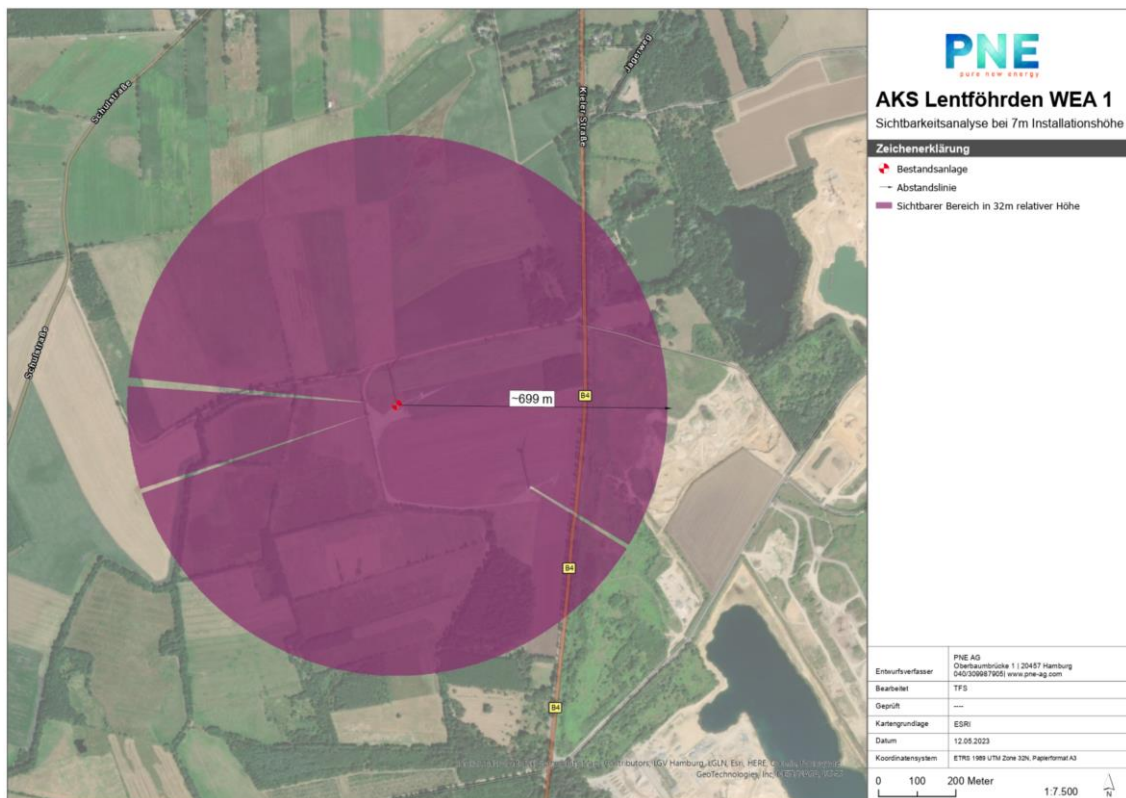


Abb. 3.5: Durch PNE durchgeführte Sichtbarkeitsanalyse, Sichtbarer Bereich in 32 m Höhe (Karte unverändert PNE erstellt am 12.05.2023).

Die räumliche Abdeckung des Untersuchungsstandortes ist durch keine gravierenden Sichtverschattungen beeinträchtigt, das Bioseco-System hat somit von der topographischen Lage her, eine sehr gute Ausgangssituation und es liegen keine Elemente vor, welche die Abdeckungsrate beeinträchtigen könnten (s. Kapitel 1.1). Die geforderten Abdeckungsraten (s. Tab. 3.1) im Erfassungsbereich von > 75 % und im Reaktionsbereich von > 90 % sind am Standort Lentförden erfüllt.

Die Sichtbarkeitsanalyse (s. Abb. 3.1) zeigt auf, dass anfliegende tieffliegende Vögel mit einer Flughöhe von $\leq 20,2$ m bei einer Entfernung von 373 m, bei einer Höhe von 25,5 m bei 530 m Entfernung und bei einer Flughöhe von 31,4 m bei einer Entfernung von 699 m vom System nicht erfasst werden. Bei der vorliegenden Planung hat die WEA einen unteren Rotordurchgang von 50 m und die anfliegenden tieffliegenden Vögel, welche ggf. übersehen oder zu spät erfasst werden könnten, befinden sich nicht in der Gefahrenzone der drehenden Rotoren. In der Realität ist es äußerst unwahrscheinlich, dass ein niedrigfliegender Vogel plötzlich hochfliegt in den Rotorbereich.

3.2 Erfassungsraten

Im Hinblick auf die Anforderungen an ein AKS in Bezug auf die Gesamtwirksamkeit ist kein „Nullrisiko“ gefordert (BVerwG Urteil 9 A9.15 vom 28.04.2016, Rn. 141, 2016). Das Schutzniveau des AKS muss ausreichend sein, um das signifikant erhöhte Tötungsrisiko am jeweiligen Standort für die entsprechende Zielart unter die Signifikanzschwelle zu senken. Ein gewisses Maß an ungeschützter Flugaktivität ist somit zulässig. Eine vom KNE vorgelegte Checkliste soll, solange keine landesweiten Regelungen vorliegen, Behörden dabei unterstützen, zu beurteilen, ob ein AKS zur Senkung des signifikant erhöhten Tötungsrisikos an einem bestimmten Standort für eine bestimmte Zielart als fachlich anerkannte Maßnahme in Frage kommt. (BRUNS et al. 2021). Anhand dieser Mindestanforderungen findet eine Beurteilung des Bioseco-Systems statt (s. Tab. 3.1).

Laut dem KNE (BRUNS et al. 2021) muss die Erfassungsreichweite mindestens die artspezifische Reaktionsdistanz einer Zielart abdecken. Hinzu kommt der für die Erkennungs- bzw. Klassifizierungszeit zusätzlich benötigte Abstand. Die Erfassungsreichweite muss somit zwingend größer als die Reaktionsdistanz sein. Es wird vom KNE keine feste Größe formuliert, zentrale Anforderung ist, dass sie mindestens der artspezifischen Reaktionsdistanz der jeweiligen Zielart entspricht. Als systemspezifische Detektionsparameter wurden vom KNE ein Mindestwert für den Reaktionsbereich 350 m, ein Orientierungswert von 500 m und ein optimaler Wert von 700 m angegeben. (KNE GGM 2022) Je mehr sie den Reaktionsdistanz überschreitet, desto höher ist der Puffer für eine rechtzeitige Reaktion, um die WEA in den Trudelmodus zu versetzen.

Die berechneten **artspezifischen Reaktionsbereiche** von **378 m** beim **Rotmilan**, **511 m** beim **Weißstorch** und **529 m** beim **Seeadler** (die beiden Letzt genannten zusammengefasst als **530 m**, s. Kapitel 2.4) liegen somit genau in den Erfassungsreichweiten für die Mindestanforderungen des KNE.

Je höher die Erfassungsrate ist, desto höher ist das Schutzniveau für die jeweilige Art. Eine Erfassungsrate von 75 % könnte laut dem KNE eine Untergrenze bilden. Bei einer geringeren Distanz von der WEA zum Brutstandort oder wenn es sich um sehr seltene kollisionsgefährdete Arten handelt, können höhere Erfassungsraten von bis zu 90 % erforderlich werden, um das erforderliche Schutzniveau zu erreichen (s. Tab. 3.1).

Tab. 3.1 Erprobungskriterien vom KNE (gemäß BRUNS et al. 2021).

Erprobungskriterien vom KNE	
Abdeckungsrate am Standort	
• Erfassungsbereich	> 75 %
• Reaktionsbereich	> 80 %
• Hauptflugkorridore	> 90 %
Erfassungsreichweite	
• Erfassungsrate im Reaktionsbereich	> 75 %
Erkennungsrate	
• im gesamten Erfassungsbereich (Untergrenze)	> 75 %
• im Reaktionsbereich (Idealwert)	> 90 %

3.2.1 Erfassungsraten im jeweiligen Reaktionsbereich:

Die Erfassungsrate sollte im Reaktionsbereich bzw. an dessen äußerer Grenze 75 % deutlich überschreiten und idealerweise als Orientierungswert bei mindestens 90 % liegen (BRUNS et al. 2021, s. Tab. 3.1).

Die Ergebnisse zur Erfassungsrate im jeweiligen Reaktionsbereich sind für den Rotmilan in Abb. 3.6 gezeigt, für den Seeadler in Abb. 3.7 und für den Weißstorch in Abb. 3.8 dargestellt. In allen drei Fällen zeigt sich, wie erwartet, eine Abnahme der Erfassungsrate mit zunehmender Distanz zwischen LRF-Ziel und AKS. Die detaillierten Analysen finden sich im Anhang (s. Abb. A. .1 bis Abb. A. .6).

Entscheidend sind die Erfassungsraten im jeweiligen Reaktionsbereich der untersuchten Arten. Nur wenn die windkraftsensible Vogelart bzw. die Zielart rechtzeitig vom AKS erkannt wird, kann eine zeitgerechte Abschaltung der WEA erfolgen bzw. diese in den Trudelmodus versetzt werden und somit, das signifikant erhöhte Tötungsrisiko der jeweiligen Art reduziert werden.

Alle drei untersuchten Vogelarten Rotmilan, Seeadler und Weißstorch wurden von dem Bioseco-System im jeweiligen Reaktionsbereich erkannt. Dabei zeigte der Seeadler mit 100 % Erfassungsrate das eindeutigste Ergebnis auf, gefolgt vom Weißstorch mit 92,3 % (simple) und 92,2 % (GLMM). Der Rotmilan, mit der kleinsten Flügelspannweite (1,4 m bis 1,65 m) der drei untersuchten Arten, zeigt den geringsten Wert mit 87,2 % (simple) und 86,7 % (GLMM) auf. Die Ergebnisse zeigen, dass nicht nur alle mittleren Erfassungsraten über den von der KNE geforderten 75 % (bzgl. des jeweiligen artspezifischen Erfassungsbereichs – s. o.) lagen, sondern auch die unteren Grenzen der jeweiligen 95 %-Konfidenzintervalle – unabhängig davon, ob die simple oder die GLMM-basierte Methode eingesetzt wurde.

Aus artenschutzrechtlicher Sicht werden alle drei Zielarten anhand der Größenklassifikation ausreichend im Reaktionsbereich erkannt. Um das signifikant erhöhte Tötungsrisiko zu reduzieren, ist es erforderlich bei Anflug der Zielart (\geq medium) in den Reaktionsbereich der WEA, diese rechtzeitig in den Trudelmodus zu versetzen.

Rotmilan: $r_{Reaktion}$ = 378 m: Erfassungsrate simpel: **87,2 %**, Erfassungsrate-GLMM: **86,7 %**

Weißstorch: $r_{Reaktion}$ = 530 m: Erfassungsrate simpel: **92,3 %**, Erfassungsrate-GLMM: **92,2 %**

Seeadler: $r_{Reaktion}$ = 530 m: Erfassungsrate simpel: **100 %**, Erfassungsrate-GLMM: **100 %**

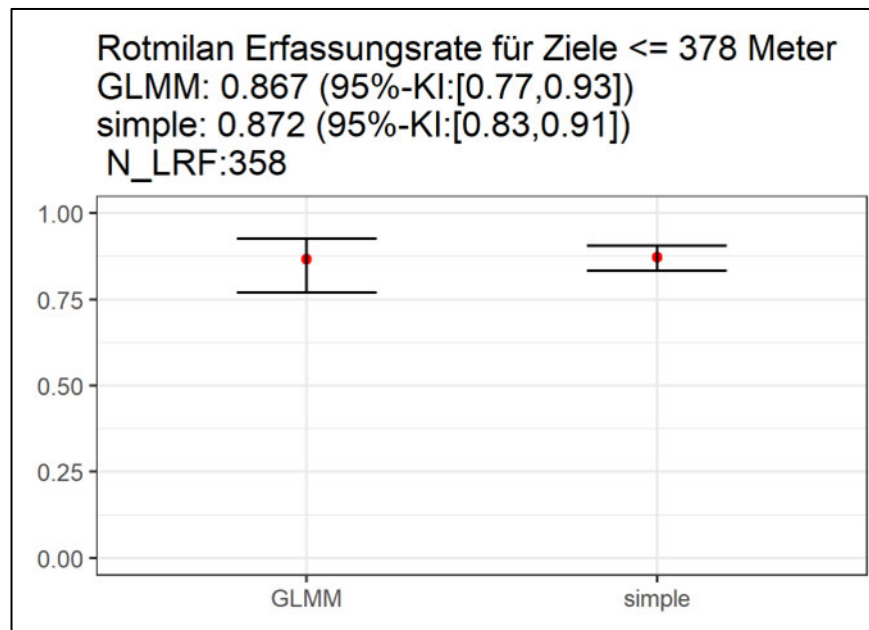


Abb. 3.6: Statistische Ergebnisse zur Erfassungsrate bzgl. des Rotmilans. GLMM-Analysen (links) vs. dem „simplen“ Ansatz (rechts) basierend auf einem Erfassungsradius von 378 m (\leq dem Reaktionsradius – s. o.). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95 %ige Konfidenzintervalle. N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.

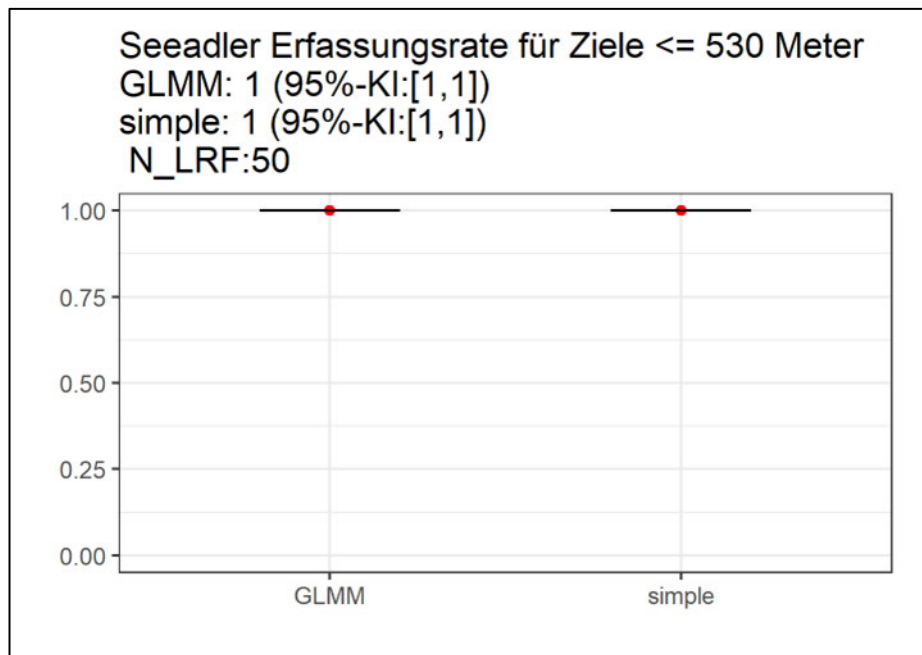


Abb. 3.7: Statistische Ergebnisse zur Erfassungsrate bzgl. des Seeadlers. GLMM-Analysen (links) vs. dem „simplen“ Ansatz (rechts) basierend auf einem Erfassungsradius von 530 m (\leq dem Reaktionsradius – s. o.). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95%ige Konfidenzintervalle. N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.

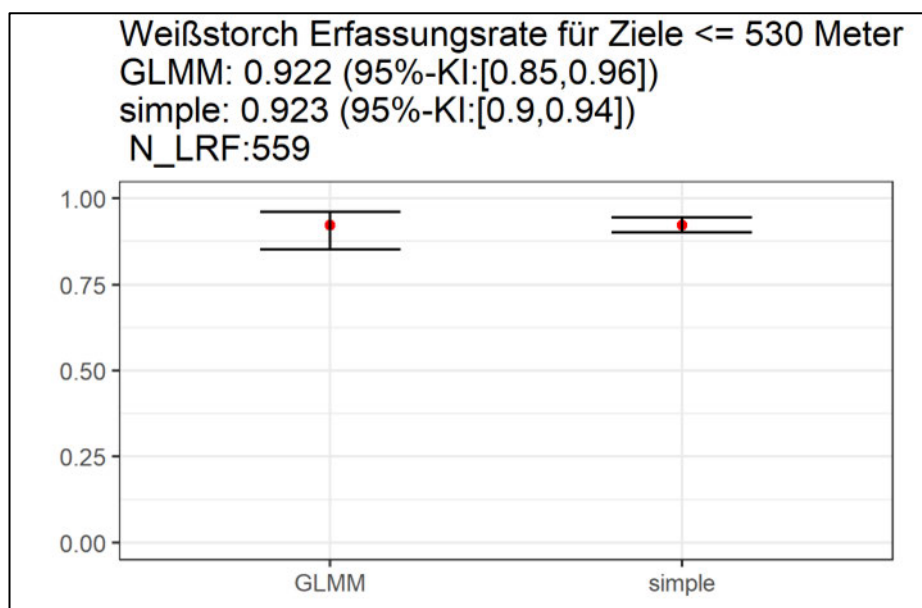


Abb. 3.8: Statistische Ergebnisse zur Erfassungsrate bzgl. des Weißstorchs. GLMM-Analysen (links) vs. dem „simplen“ Ansatz (rechts) basierend auf einem Erfassungsradius von 530 m (\leq dem Reaktionsradius – s. o.). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95 %ige Konfidenzintervalle. N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.

Die Erfassungsrate geht weit über den Reaktionsbereich hinaus und entspricht somit den KNE-Kriterien (s. Anhang A.3).

3.3 Größenklassifikation

Für die Analyse der Klassifizierung werden die Daten vom LRF mit der Artidentifizierung z.B. Rotmilan mit den Daten des AKS \geq medium abgeglichen und ausgewertet.

Die Ergebnisse zur Erkennungsrate sind vom Rotmilan in Abb. 3.9 gezeigt, vom Seeadler in Abb. 3.10 und vom Weißstorch in Abb. 3.11. Detaillierte Analysen finden sich im Anhang (Abb. A. .1 bis Abb. A. .6). In allen Fällen war keine oder kaum eine Abnahme der Erkennungsrate mit zunehmender Distanz zwischen LRF-Ziel und AKS zu beobachten, da die Erkennungsraten insgesamt sehr hoch lagen. Die Erkennungsrate sollte laut KNE-Checkliste im Reaktionsbereich bzw. an dessen äußeren Rand deutlich über 75 % liegen und idealerweise bei 90 % liegen. Das Bioseco-System erkennt die drei Arten \geq medium deutlich über den geforderten 75 %, unabhängig von der gewählten Methode simple oder GLMM. Für alle Arten lagen die Raten unabhängig von der angewandten Methode bei \geq 85 %, somit wurde die Untergrenze deutlich überschritten. Mit der GLMM-Methode werden sogar die 90 % beim Rotmilan erreicht.

Erkennungsraten im jeweiligen Reaktionsbereiches:

Rotmilan: $r_{\text{Reaktion}} = 378$ m: Erkennungsrate simpel: **84,6 %**, Erkennungsrate-GLMM: **90,0 %**

Weißstorch: $r_{\text{Reaktion}} = 530$ m: Erkennungsrate simpel: **86,8 %**, Erkennungsrate-GLMM: **87,4 %**

Seeadler: $r_{\text{Reaktion}} = 530$ m: Erkennungsrate simpel: **87,4 %**, Erkennungsrate-GLMM: **87,4 %**

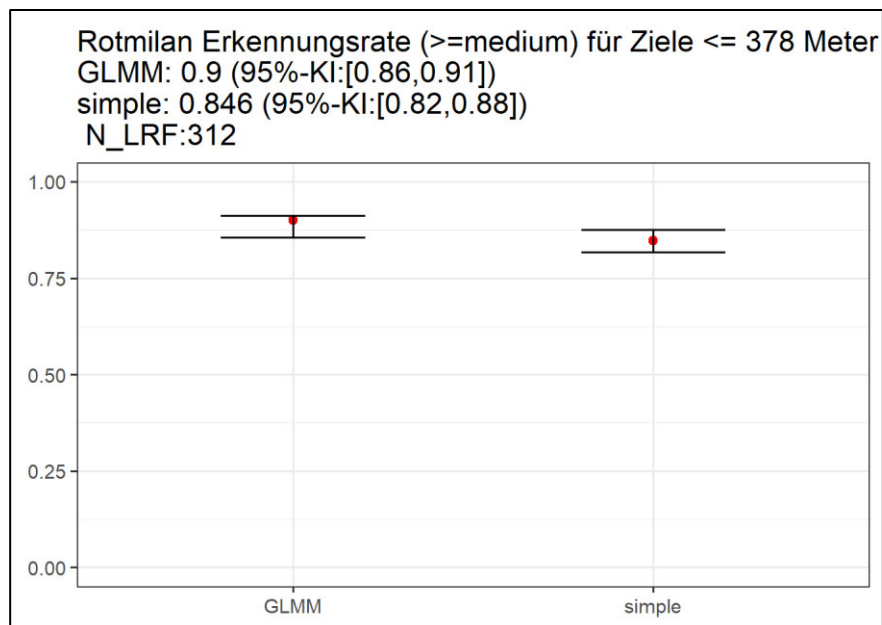


Abb. 3.9: Statistische Ergebnisse zur Erkennungsrate des Rotmilans. GLMM-Analysen (links) vs. dem „simplen“ Ansatz (rechts) basierend auf einem Erfassungsradius von 378 m (\geq dem Reaktionsradius – s. o.). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95%ige Konfidenzintervalle. Letztere beinhalten nicht die Unsicherheiten des Korrekturschrittes (siehe Haupttext). N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.

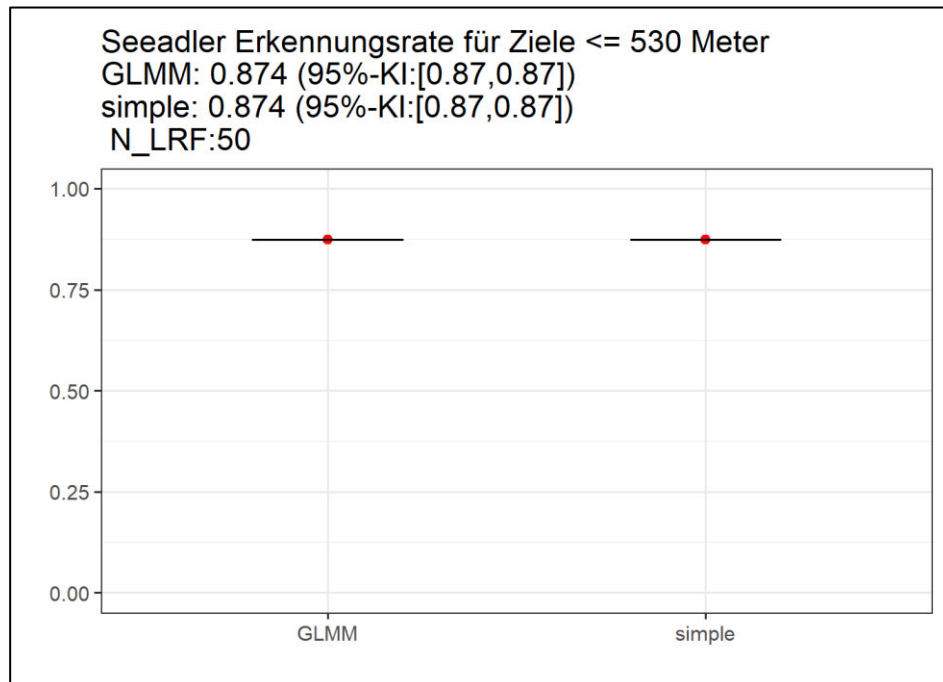


Abb. 3.10: Statistische Ergebnisse zur Erkennungsrate des Seeadlers. GLMM-Analysen (links) vs. dem „simple“ Ansatz (rechts) basierend auf einem Erfassungsradius von 530 m (\geq dem Reaktionsradius – s. o.). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95 %ige Konfidenzintervalle. Letztere beinhalten nicht die Unsicherheiten des Korrekturschrittes (siehe Haupttext). N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.

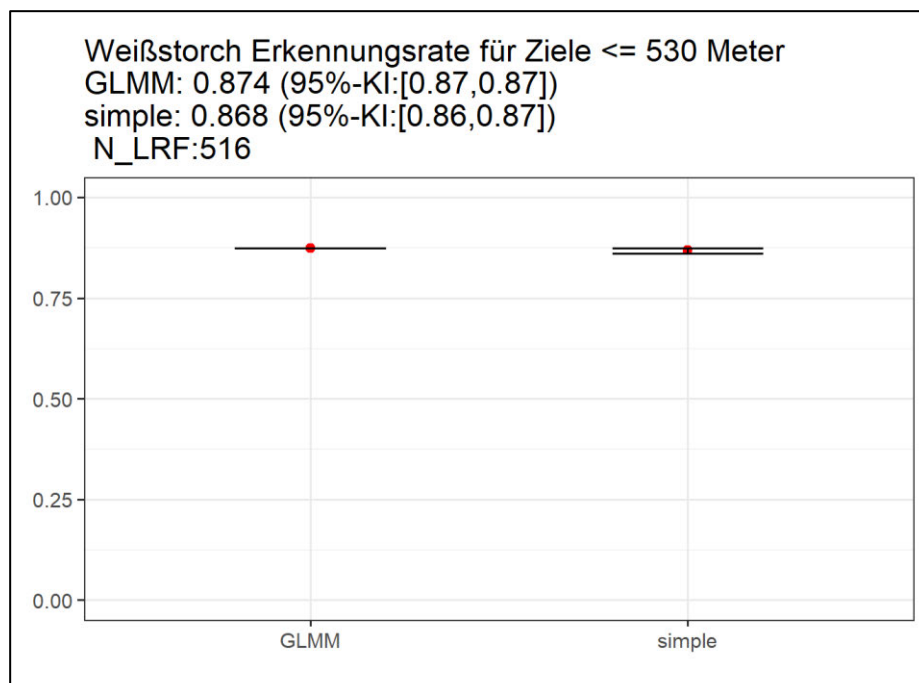


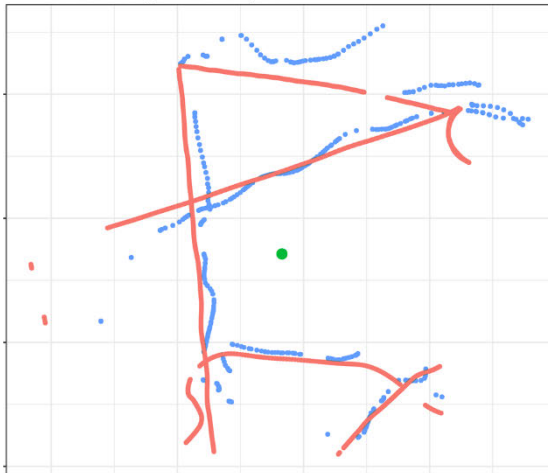
Abb. 3.11: Statistische Ergebnisse zur Erkennungsrate des Weißstorchs. GLMM-Analysen (links) vs. dem „simple“ Ansatz (rechts) basierend auf einem Erfassungsradius von 530 m (\geq dem Reaktionsradius – s. o.). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95%ige Konfidenzintervalle. Letztere beinhalten nicht die Unsicherheiten des Korrekturschrittes (siehe Haupttext). N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.

Die drei untersuchten Arten (\geq medium bzw. Rotmilan, Weißstorch und Seeadler) wurden mit einer Erkennungsrate von $\geq 85\%$ erkannt und überschreiten somit die Untergrenze des geforderten Kriteriums der KNE-Checkliste deutlich. Artenschutzrechtlich werden die drei Arten erfasst und als \geq medium ausreichend erkannt und die WEA kann in den Trudelmodus versetzt werden, umso das signifikant erhöhte Tötungsrisiko für die jeweilige Art zu reduzieren.

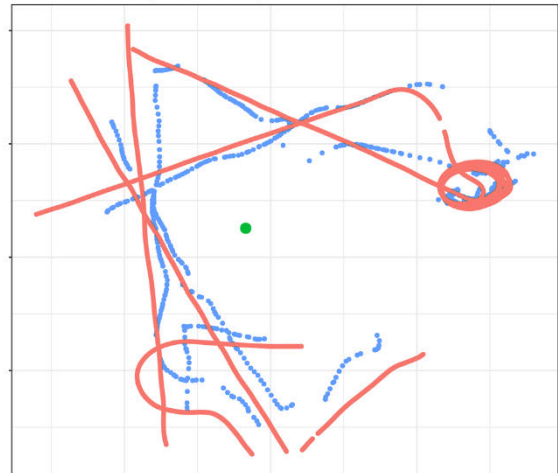
3.4 Positionsgenauigkeit

Die finale Anzahl der verwendeten Datenpunkte waren $N=2.317$, $N= 1.295$ sowie $N=1.599$. Die Mittelwerte und Mediane des relativen örtlichen Fehlers (d. h., des Betrages des Abstands geteilt durch die Entfernung zwischen Ziel und WEA) findet sich für die drei unterschiedlichen Flüge in Abb. 3.12 gegeben. Es zeigt sich, dass das Mittel bei etwa 0,1 liegt, ergo $f_{RDE} = 1,1$. Weiterführende Analysen zeigten, dass der relative örtliche Fehler nicht oder nur unerheblich mit der Distanz zunimmt, also auch am Rand des Reaktionsbereichs mit 0,1 angenommen werden kann (s. Abb. 2.8 Mitte/Unten).

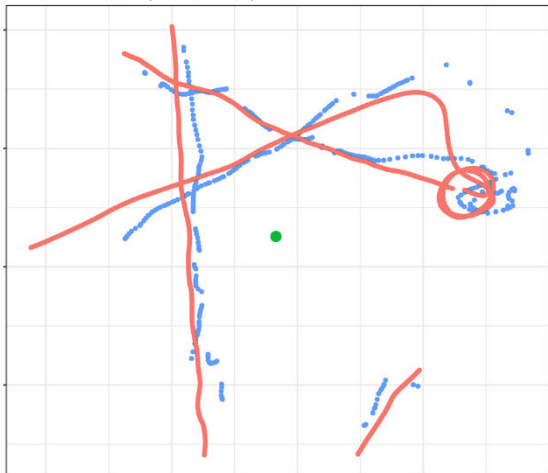
wing_150_2: Mittlere relative Differenz (Differenz/Abstand): 0.13
Median relative Differenz (Differenz/Abstand): 0.12



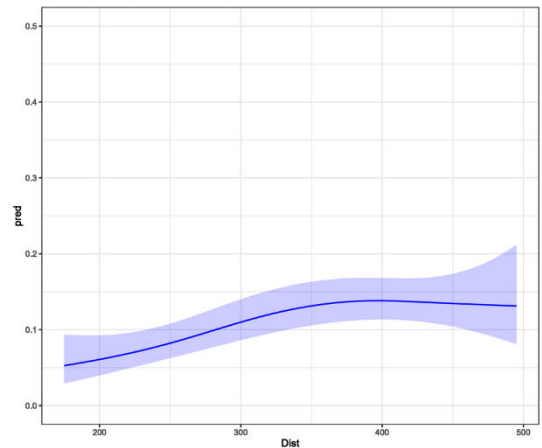
wing_150_1: Mittlere relative Differenz (Differenz/Abstand): 0.09
Median relative Differenz (Differenz/Abstand): 0.08



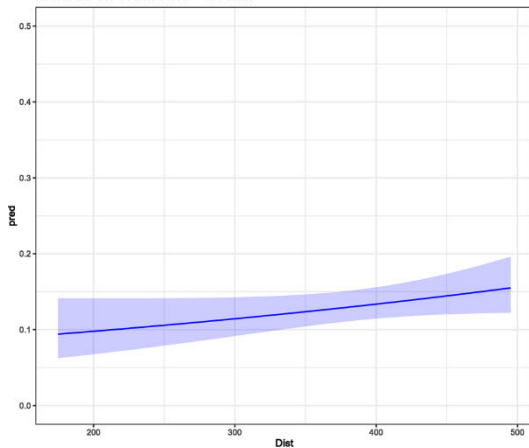
wing_200: Mittlere relative Differenz (Differenz/Abstand): 0.11
Median relative Differenz (Differenz/Abstand): 0.1



wing_200: Mittlere relativer Fehler (Differenz/Abstand) in Abh. von der Distanz.
Werte auf der Y-Achse*100 = % Fehler



wing_150_2: Mittlere relativer Fehler (Differenz/Abstand) in Abh. von der Distanz.
Werte auf der Y-Achse*100 = % Fehler



wing_150_1: Mittlere relativer Fehler (Differenz/Abstand) in Abh. von der Distanz.
Werte auf der Y-Achse*100 = % Fehler

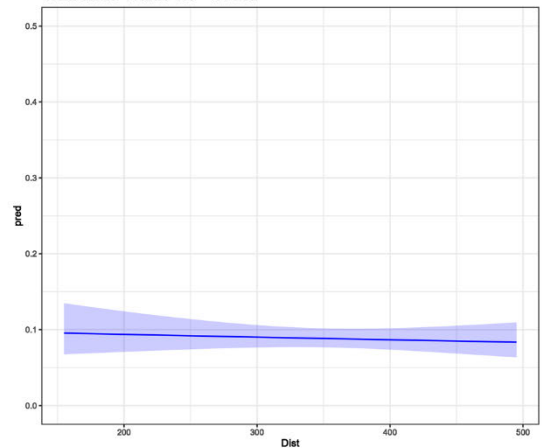


Abb. 3.12: Mitte/Oben: GPS-Punkte von drei unterschiedlichen Drohnenflügen (rote Punkte) vs. zugeordneter AKS-Punkte (blaue Punkte) im 500-Meter-Umfeld der WEA (grüner Punkt). Mitte/ Unten: der relative örtliche Fehler (Mittelwert) für die drei unterschiedlichen Flüge in Abhängigkeit von der Distanz zwischen WEA und Ziel. Schattierte Bereiche: 95%-Konfidenzintervalle.

Die jeweiligen Reaktionsbereiche der Zielarten liegen bis 530 m, es wurde in diesem Bereich ein RDE von ca. 10 % bestimmt (Drohnen-Flug 1 = 13 %, Drohnen Flug 2 = 9 % und Drohnen-Flug 3= 11 %).

3.5 Fehlabschaltrate

Die Fehlabschaltrate beeinflusst sehr stark die Wirtschaftlichkeit und nicht die artenschutzrechtlichen Anforderungen und ist somit nicht Bestandteil dieses Berichtes.

4 FAZIT

4.1 Zusammenfassende Beurteilung und Anmerkungen

Die statistischen Analysen der empirischen Daten zeigen, dass für alle drei Zielarten (Rotmilan, Seeadler und Weißstorch) die Vorgaben aus der KNE-Checkliste erfüllt sind. Es wurden die folgenden artspezifischen Reaktionsradien für die jeweilige Zielart berechnet:

Rotmilan: $r_{\text{Reaktion}} = 377,98$ m

Weißstorch: $r_{\text{Reaktion}} = 511,93$ m

Seeadler: $r_{\text{Reaktion}} = 528,99$ m,

basierend auf einem empirisch ermittelten relativen örtlichen Fehler von etwa 10 %, Mittelwerten zu in der Literatur verfügbaren artspezifischen Fluggeschwindigkeiten, sowie empirisch ermittelten Zeiten von Signalweiterleitung und des Versetzens in den Trudelbetrieb.

Erfassungs- und Erkennungsraten wurden mit zwei unterschiedlichen statistischen Techniken ermittelt („simpler“ vs. „GLMM“). Die Erfassungsraten liegen für die o.g. Reaktionsbereiche in allen drei Fällen deutlich über den geforderten 75 %:

Rotmilan: $r_{\text{Reaktion}} = 378$ m: Erfassungsrate-simpler: 87,2%, Erfassungsrate-GLMM: 86,7 %

Weißstorch: $r_{\text{Reaktion}} = 530$ m: Erfassungsrate-simpler: 92,3%, Erfassungsrate-GLMM: 92,2 %

Seeadler: $r_{\text{Reaktion}} = 530$ m: Erfassungsrate-simpler: 100%, Erfassungsrate-GLMM: 100 %,

und auch die Erkennungsraten liegen in allen drei Fällen deutlich über der geforderten Untergrenze von 75 %:

Rotmilan: $r_{\text{Reaktion}} = 378$ m: Erkennungsrate-simpler: 84,6 %, Erkennungsrate-GLMM: 90 %

Weißstorch: $r_{\text{Reaktion}} = 530$ m: Erkennungsrate-simpler: 86,8 %, Erkennungsrate-GLMM: 87,4 %

Seeadler: $r_{\text{Reaktion}} = 530$ m: Erkennungsrate-simpler: 87,4 %, Erkennungsrate-GLMM: 87,4 %.

Für eine noch differenziertere Betrachtung wurde zudem die kontinuierliche Änderung der o.g. Raten in Abhängigkeit von der Distanz zwischen Ziel und AKS dargestellt.

Datenmanipulation wurde ausgeschlossen indem zuerst die AKS-Daten von Bioseco an BioConsult SH geschickt wurden und anschließend die LRF-Daten durch BioConsult SH zur Verfügung gestellt wurden.

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass das Bioseco-System die Zielarten Rotmilan, Weißstorch und Seeadler hinsichtlich der KNE-Anforderungen ausreichend erfasst und anhand der Größe klassifiziert.

In diesem Kontext sei allerdings angemerkt, dass die o.g. Reaktions-Radien in vielerlei Hinsicht unter dem Aspekt der Vorsorge ermittelt wurden. Die dahingehend konservativen Annahmen sind:

- Es wird von dem worst-case Szenario ausgegangen, dass die Flugrichtung des Vogels vom Rand des Reaktionsbereichs aus gesehen nicht tangential, sondern direkt auf den Rotorbereich zeigt;
- Das Verwenden der realen Fluggeschwindigkeiten in der o.g. Formel impliziert, dass der Vogel geradlinig fliegt. Dies ist i.d.R. nicht der Fall; z.B. bei der Nahrungssuche und/oder beim Nutzen der Thermik fliegen Vögel i.d.R. in hohem Maße nichtlinear, sodass die effektive Annäherungsgeschwindigkeit deutlich niedriger sein kann;
- Das Hinzuzählen der Rotorblattlänge zum Reaktionsbereich (siehe Formel) impliziert, dass der Vogel in einer Flucht mit der Rotorblattscheibe fliegt, d.h., die Spitzen der Rotorblätter in Richtung des Vogels zeigen. Dies ist ein sehr unrealistisches Szenario;
- Das Hinzumultiplizieren des relativen örtlichen Fehlers in der o.g. Formel geht davon aus, dass die Fehleinschätzung der Position des Vogels durch das AKS zugunsten eines erhöhten Vogelschlagrisikos ausfällt. Es ist aber vielmehr davon auszugehen, dass sich der Fehler hälftig zugunsten und hälftig zuungunsten eines erhöhten Risikos auswirkt.

Zudem sei angemerkt, dass die oben berechneten Reaktionsradien auch durch die AKS-unabhängige Tatsache unnötig vergrößert sind, dass die Signal-Priorisierung im Kontext der Windparksteuerung zu einem relativ hohen Wert von ***tLatenz*** führt.

Bioseco zeigt für die Zielarten \geq medium eine Schutzwirkung durch ereignisbezogene Abschaltungen der WEA auf.

Die Erfüllung der Artenschutzanforderungen sind in Bezug auf die geforderten Mindestanforderungen vom KNE für das Bioseco-System erfüllt.

5 LITERATUR

- ASCHWANDEN, J., WANNER, S. & LIECHTI, F. (2015): Investigation on the effectivity of bat and bird detection at a wind turbine: Final Report Bird Detection. Schweizerische Vogelwarte/Sempach (SUI), S: 34.
- BIONUM GMBH (2023): Statistische Begutachtung des Antikollisionssystems „Bioseco“ vor dem Hintergrund der „KNE-Checkliste“ Dipl.-Math. Dipl.-Biol. Dr. Moritz Mercker Bionum GmbH – Büro für Biostatistik Finkenwerder Norderdeich 15A 21129 Hamburg.
- BOLKER, B. M., BROOKS, M. E., CLARK, C. J., GEANGE, S. W., POULSEN, J. R., STEVENS, M. H. H. & WHITE, J.-S. S. (2009): Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution. *Trends in Ecology and Evolution* 24/3, S: 127–135.
- BRUDERER, B. & BOLDT, A. (2001): Flight characteristics of birds: I. radar measurements of speeds. *Ibis* 143/2, Citation Key: brudererFlightCharacteristicsBirds2001, S: 178–204.
- BRUNS, E., ASCHWANDEN, J., MUSIOL, F., FRÜH, D., KLEYHEEG-HARTMAN, J., SPRÖTGE, M., REICHENBACH, M., REERS, H., MEHRGOTT, H., WEISS, A., & SCHUSTER, E. - BRUNS, E. ET AL (2019): KNE-Fachkonferenz Vogel-schutz an Windenergieanlagen – Detektionssysteme als Chance für einen naturverträglichen Windenergieausbau? Dokumentation zur KNE-Fachkonferenz am 15. Und 16. Mai 2019 in Kassel (Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende KNE gGmbH, Hrsg.; S. 58). X:\04_Literatur\01_Literatur_(NICHT_BEARBEITEN!)\KNE_2019_Dokumentation_vogelschutz_an_windenergieanlagen_detektionssysteme_als_chance_fuer_einen_naturvertraeglichen_windenergieausbau.pdf.
- BRUNS, E., SCHUSTER, E. & STREIFFELER, J. (2021): Anforderungen an technische Überwachungs- und Abschaltssysteme an Windenergieanlagen, BfN-Skripten. Nr. 610, Bundesamt für Naturschutz/Bonn - Bad Godesberg (DEU).
- CANTY, A. J., DAVIDSON, A. C., HINKLEY, D. V., & VENTURA, V. (2006): Bootstrap diagnostics and remedies. *The Canadian Journal of Statistics*, 34(1), 5–27. <https://doi.org/Added>.
- CARPENTER, J., & BITHELL, J. (2000): Bootstrap confidence intervals: When, which, what? A practical guide for medical statisticians. *Statistics in Medicine*, 19(9), 1141–1164. <https://doi.org/Added>.
- FIELD, A., MILES, J., & FIELD, Z. (2012): *Discovering statistics using R*. SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/Added>.
- FRÜH, D. & STARK, H. (2020): Endbericht Raumnutzungsanalyse Großvögel im Windpark Osterburg. *Sachsen-Anhalt, Landkreis Stendal*.
- GPS STANDARD POSITIONING SERVICE - **GPS GENAUIGKEIT** (n.d.). <https://www.gps.gov/technical/ps/2007-PPS-performance-standard.pdf>.
- HASTIE, T., & TIBSHIRANI, R. J. (1990): *Generalized Additive Models*. London, UK: Chapman and Hall. <https://doi.org/Added>.
- HURLBERT, S. H. (1984): Pseudoreplication and the Design of Ecological Field Experiments. *Ecological Monographs*, 54(2), 187–211. <https://doi.org/Added>.
- JANNES KREUTZFELDT, PNE - J. KREUTZFELD (2023): Sichtbarkeitsanalyse Bioseco Longe Range BPS- Ablauf und Berechnung.
- JENSEN, F. P., RINGGAARD, R., BLEW, J. & JACOBSEN, E. M. (2016): Anholt Offshore Wind Farm. Post-construction monitoring of bird migration. Report on raptor migration survey in 2014-2016., Final Report. Roskilde (DNK), S: 83.
- KNE gGMBH (2022): BWE-Fachkonferenz Windenergie und Artenschutz: Die Energiewende voranbringen - Klima- und Artenschutz zusammengedacht - 31.05.2022 Hannover. Anforderungen an Antikollisionssysteme für Vögel - Einsatzbereiche, Vermeidungswirksamkeit, Klärungsbedarf.
- KORNER-NIEVERGELT, F., ROTH, T., VON FELTEN, S., GUELAT, J., ALMASI, B., & KORNER-NIEVERGELT, P. (2015): *Bayesian Data Analysis in Ecology Using Linear Models with R, BUGS, and Stan*. Elsevier, London. <https://doi.org/Added>.

- MERCKER, M., LIEDKE, J., LIESENJOHANN, T. & BLEW, J. (2023): Pilotstudie „Erprobung Probabilistik“: Erprobung probabilistischer Methoden hinsichtlich ihrer fachlichen Voraussetzungen mit dem Ziel der Validierung der Methode zur Ermittlung des vorhabenbezogenen Tötungsrisikos von kollisionsgefährdeten Brutvogelarten an Windenergieanlagen. *Pilotstudie im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV)*.
- PENNYCUICK, C. J. (2001): Speeds and wingbeat frequencies of migrating birds compared with calculated benchmarks. *Journal of Experimental Biology* 204/19, S: 3283–3294.
- PENNYCUICK, C. J., ÅKESSON, S. & HEDENSTRÖM, A. (2013): Air speeds of migrating birds observed by ornithodolite and compared with predictions from flight theory. *Journal of The Royal Society Interface* 10/86.
- PINHEIRO, J. C., & BATES, D. M. (2000): Mixed-effect models in S and S-Plus. New York: Springer Verlag. <https://doi.org/Added>.
- PNE (2023): Pilotstudie Bioseco Antikollisionssystem - Zwischenbereich & Übertragbarkeit. PNE Abt. Technologien: Janne Brandt, Lukas Krohn, Jannes Kreutzfeld und Carsten Bühner.
- RANSOM, D., & PINCHAK, W. E. (2003): Ransom, D., & Pinchak, W. E. (2003). Assessing Accuracy of a Laser Rangefinder in Estimating Grassland Bird Density. *Wildlife Society Bulletin (1973-2006)*, 31(2), 460–463.
- SKOV, H., DESHOLM, M., HEINÄNEN, S., JOHANSEN, T. W. & THERKILDTSEN, O. R. (2015): Kriegers Flak Off-shore Wind Farm. Birds and Bats. EIA -Technical report. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy & DHI Group, S: 196.
- SKOV, H., HEINÄNEN, S., NORMAN, T., WARD, R., MÉNDEZ-ROLDÁN, S. & ELLIS, I. (2018): ORJIP Bird Collision and Avoidance Study, Final Report. The Carbon Trust/London (GBR), S: 247.
- SPAAR, R. (1997): Flight strategies of migrating raptors; a comparative study of interspecific variation in flight characteristics. *Ibis* 139/3, S: 523–535. DOI: 10.1111/j.1474-919X.1997.tb04669.x, ISSN: 1474-919X.
- TENNEKES, H. (1997): Anhang: Daten ausgewählter Vögel. In: *Kolibris und Jumbo-Jets: Die simple Kunst des Fliegens* Birkhäuser Verlag, S. 157–176.
- WOOD, S. R. (Hrsg.) (2017): Generalized additive models. An introduction with R. CRC Press/Boca Raton (USA).
- ZUUR, A. F. (2012): A beginner's guide to generalized additive models with R. Highland Statistics Ltd. <https://doi.org/Added>.
- ZUUR, A., IENO, E., & SMITH, G. M. (2007): Analysing Ecological Data. Springer Science+Business Media, LLC. <https://doi.org/Added>.
- ZUUR, A. F., IENO, E. N., WALKER, N. J., SAVELIEV, A. A. & SMITH, G. M. (2009): Mixed effects models and extensions in ecology with R. Reihe: Statistics for Biology and Health, Springer/New York, NY (USA), 574 Seiten.
- (2016): BVerwG, Urteil vom 28. April 2016 - 9 A9.15.

A ANHANG

A.1 Erfassungsrate

A.1.1 Rotmilan

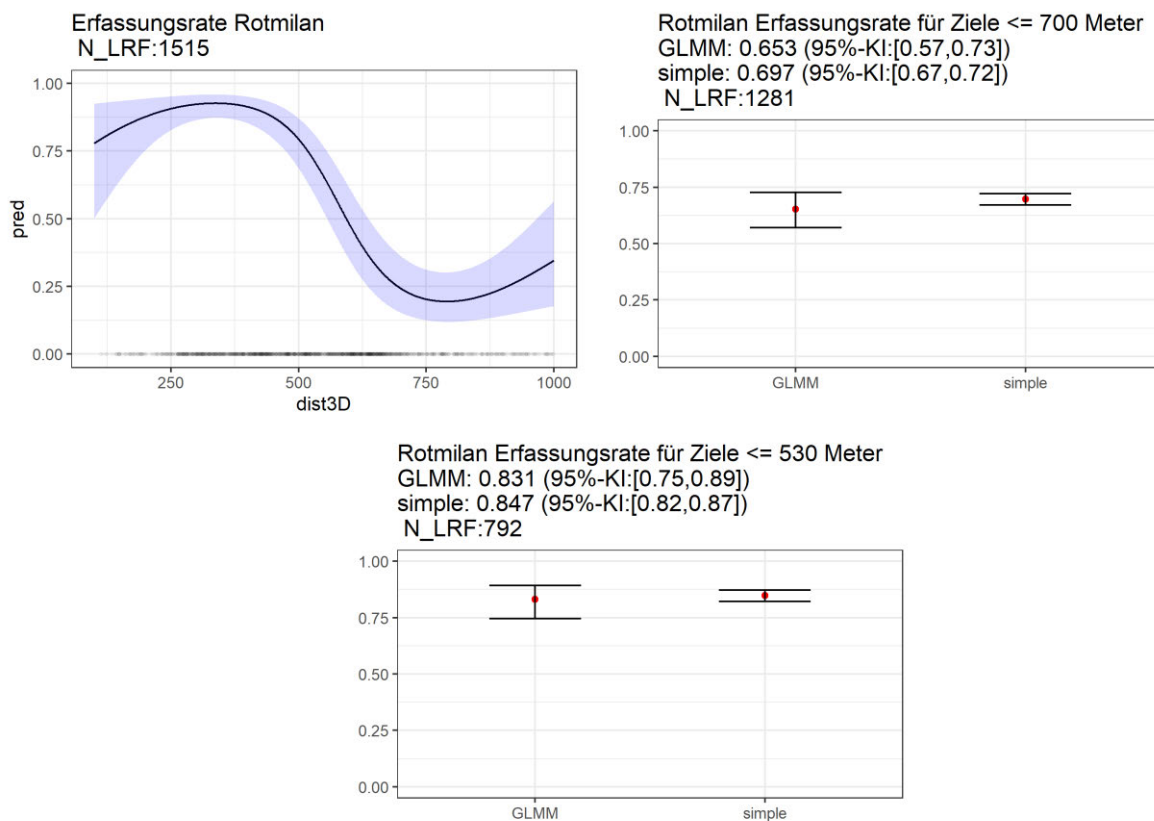


Abb. A. .1 Statistische Ergebnisse zur Erfassungsrate bzgl. des Rotmilans. Oben links: Erfassungsrate in (u.U. nichtlinearer) Abhängigkeit von der Distanz zwischen LRF-Punkt und AKS basierend auf GAMM-Analysen. Schwarze Linie: Erfassungsrate, lila-schattierter Bereich: 95%ige Konfidenzintervalle. Semi-transparente Punkte kurz über der X-Achse zeigen die Existenz einzelner Messpunkte an. Restliche Abbildungen: GLMM-Analysen (jeweils links) vs. dem „simplen“ Ansatz (jeweils rechts) basierend auf unterschiedlichen Erfassungsradien (siehe jeweilige Bildüberschrift). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95%ige Konfidenzintervalle. N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.

A.1.2 Seadler

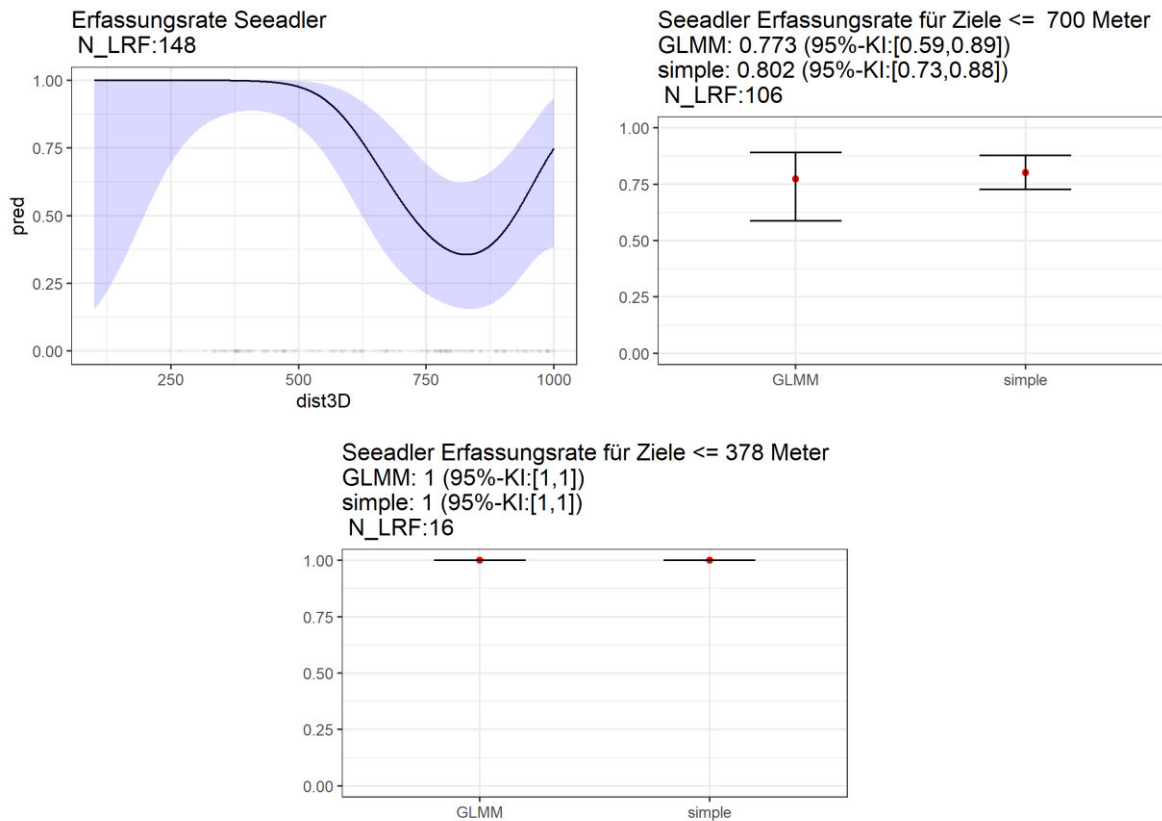


Abb. A.A.2 Statistische Ergebnisse zur Erfassungsrade bzgl. des Seadlers. Oben links: Erfassungsrade in (u.U. nichtlinearer) Abhängigkeit von der Distanz zwischen LRF-Punkt und AKS basierend auf GAMM-Analysen. Schwarze Linie: Erfassungsrade, lila-schattierter Bereich: 95%ige Konfidenzintervalle. Semi-transparente Punkte kurz über der X-Achse zeigen die Existenz einzelner Messpunkte an. Restliche Abbildungen: GLMM-Analysen (jeweils links) vs. dem „simplen“ Ansatz (jeweils rechts) basierend auf unterschiedlichen Erfassungsradien (siehe jeweilige Bildüberschrift). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95%ige Konfidenzintervalle. N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.

A.1.3 Weißstorch

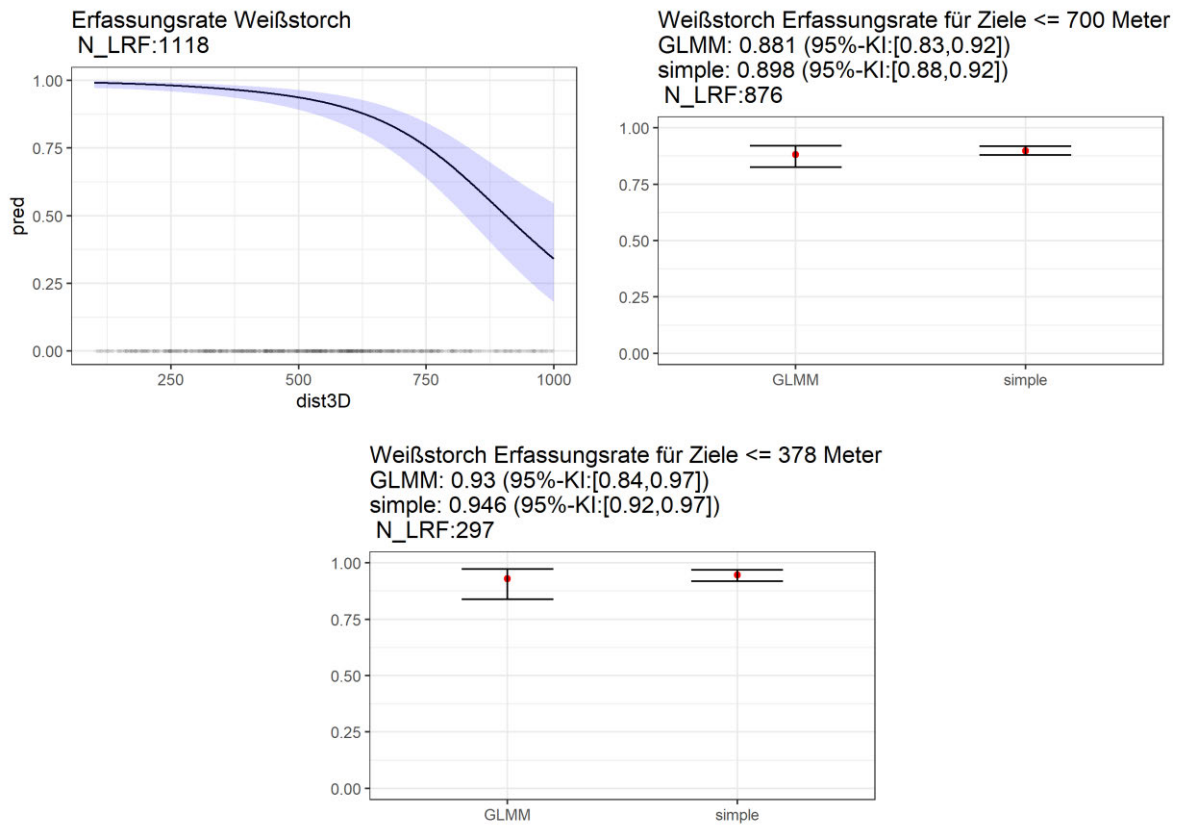


Abb. A.A.3 Statistische Ergebnisse zur Erfassungsrade bzgl. des Weißstorchs. Oben links: Erfassungsrade in (u.U. nichtlinearer) Abhängigkeit von der Distanz zwischen LRF-Punkt und AKS basierend auf GAMM-Analysen. Schwarze Linie: Erfassungsrade, lila-schattierter Bereich: 95%ige Konfidenzintervalle. Semi-transparente Punkte kurz über der X-Achse zeigen die Existenz einzelner Messpunkte an. Restliche Abbildungen: GLMM-Analysen (jeweils links) vs. dem „simplen“ Ansatz (jeweils rechts) basierend auf unterschiedlichen Erfassungsradien (siehe jeweilige Bildüberschrift). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95%ige Konfidenzintervalle. N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.

A.2 Erkennungsrate

A.2.1 Rotmilan

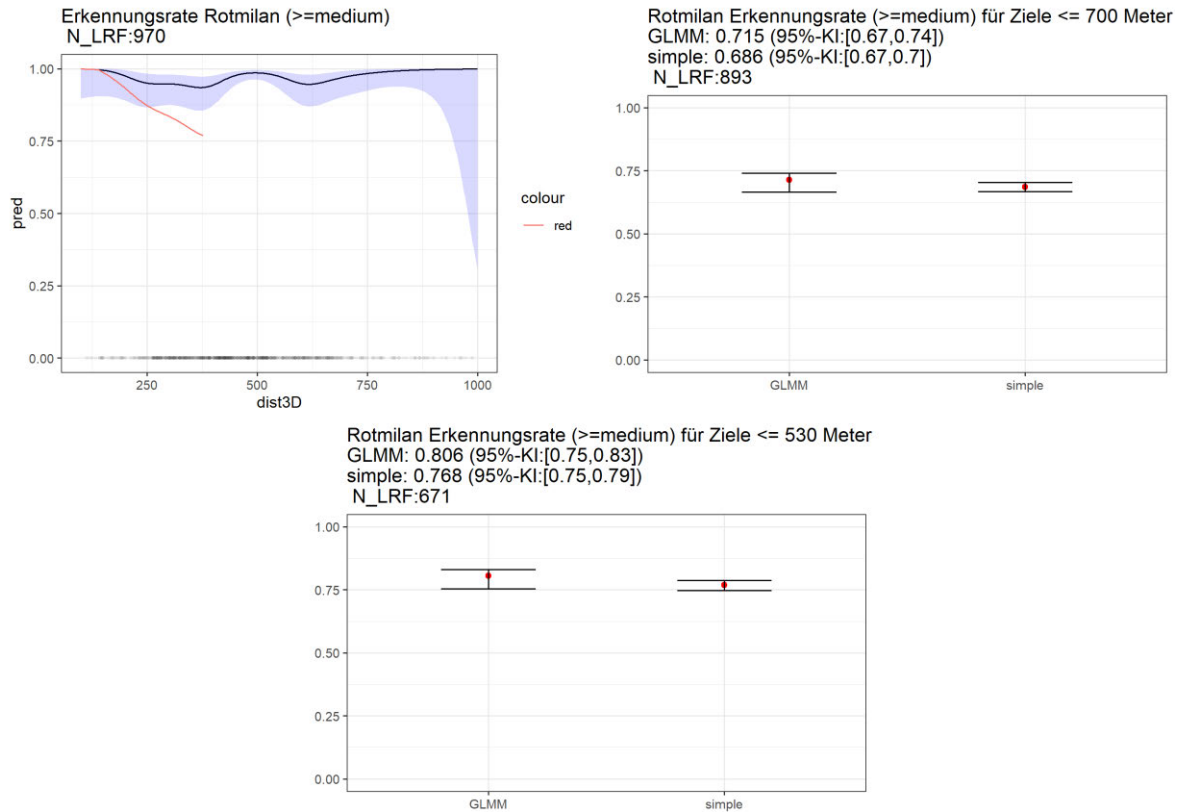


Abb. A.A.4 Statistische Ergebnisse zur Erkennungsrate bzgl. des Rotmilans. Oben links: Erkennungsrate in (u.U. nichtlinearer) Abhängigkeit von der Distanz zwischen LRF-Punkt und AKS basierend auf GAMM-Analysen. Schwarze Linie: unkorrigierte Erkennungsrate, rote Linie: korrigierte Erkennungsrate, lila-schattierter Bereich: 95%ige Konfidenzintervalle zur unkorrigierten Rate. Semi-transparente Punkte kurz über der X-Achse zeigen die Existenz einzelner Messpunkte an. Restliche Abbildungen: GLMM-Analysen (jeweils links) vs. dem „simple“ Ansatz (jeweils rechts) basierend auf unterschiedlichen Erfassungsradien (siehe jeweilige Bildüberschrift). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95%ige Konfidenzintervalle. Letztere beinhalten nicht die Unsicherheiten des Korrekturschrittes (siehe Haupttext). N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.

A.2.2 Seadler

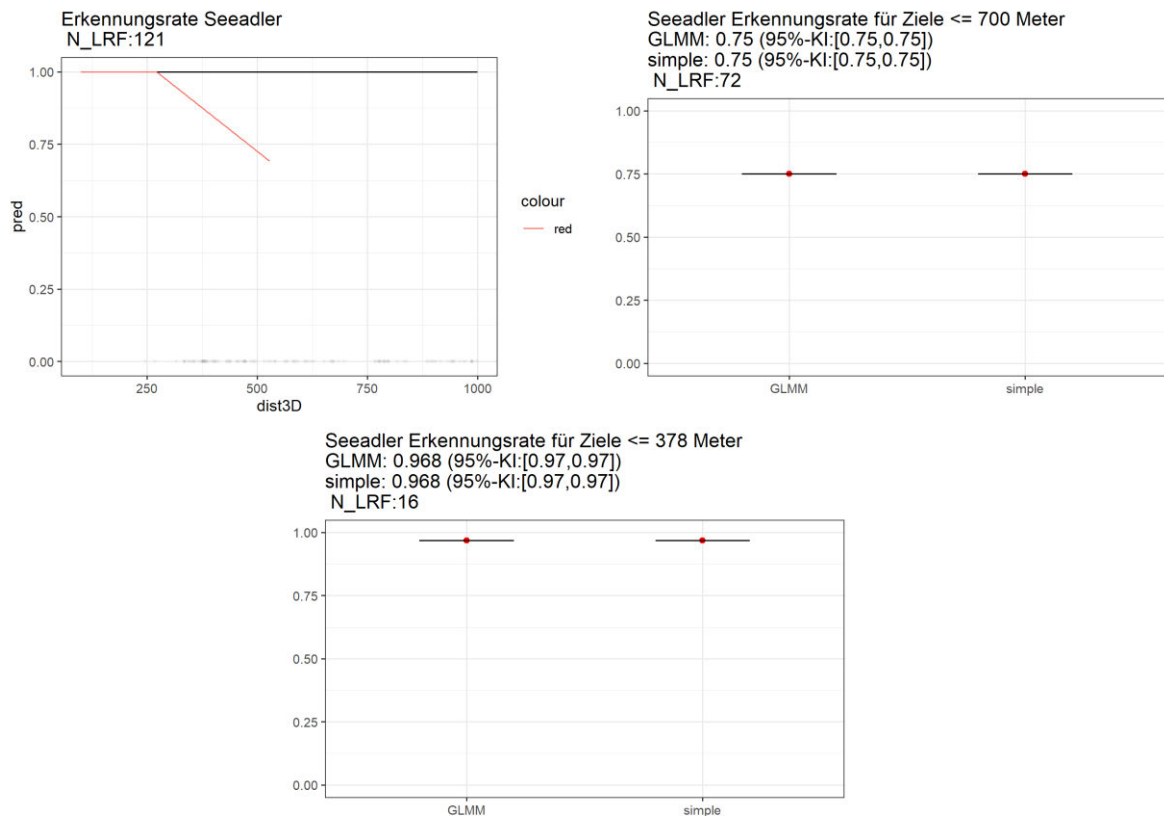


Abb. A.A.5 Statistische Ergebnisse zur Erkennungsrate bzgl. des Seadlers. Oben links: Erkennungsrate in (u.U. nichtlinearer) Abhängigkeit von der Distanz zwischen LRF-Punkt und AKS basierend auf GAMM-Analysen. Schwarze Linie: unkorrigierte Erkennungsrate, rote Linie: korrigierte Erkennungsrate, lila-schattierter Bereich: 95%ige Konfidenzintervalle zur unkorrigierten Rate. Semi-transparente Punkte kurz über der X-Achse zeigen die Existenz einzelner Messpunkte an. Restliche Abbildungen: GLMM-Analysen (jeweils links) vs. dem „simplen“ Ansatz (jeweils rechts) basierend auf unterschiedlichen Erfassungsradien (siehe jeweilige Bildüberschrift). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95%ige Konfidenzintervalle. Letztere beinhalten nicht die Unsicherheiten des Korrekturschrittes (siehe Haupttext). N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.

A.2.3 Weißstorch

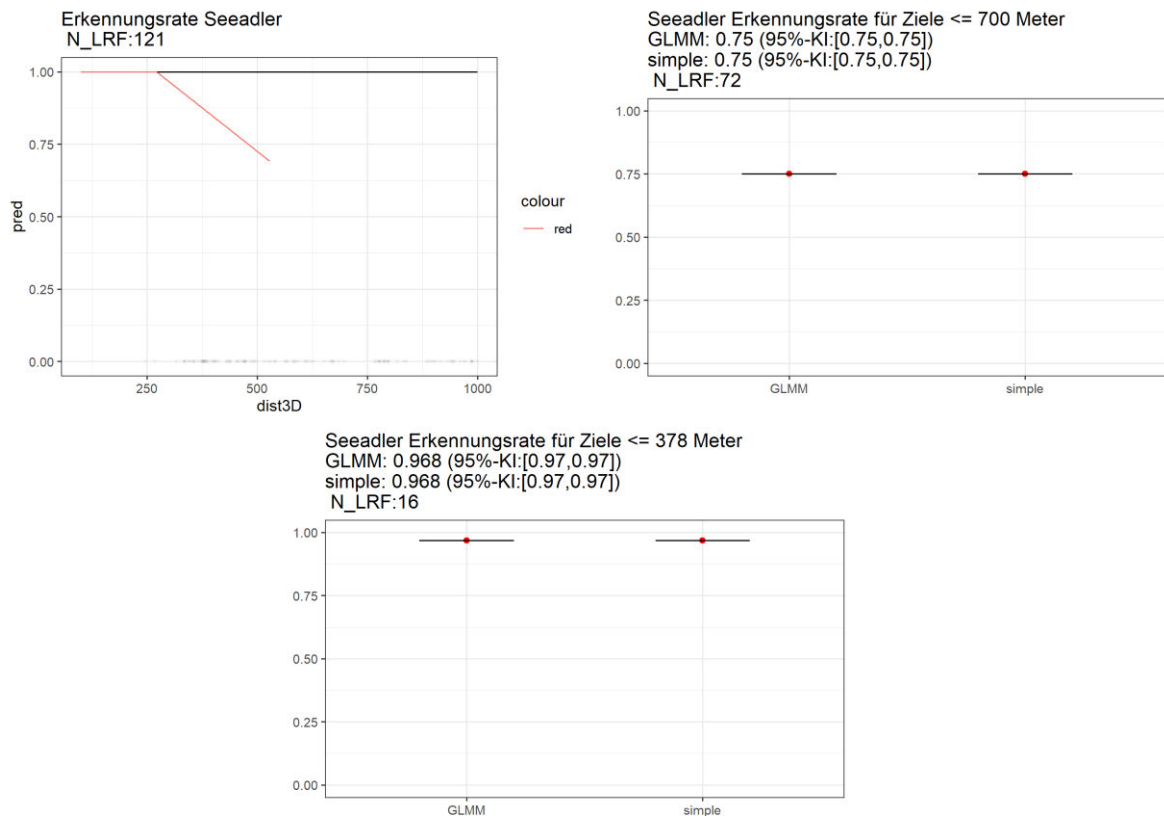


Abb. A. .6 Statistische Ergebnisse zur Erkennungsrate bzgl. des Weißstorchs. Oben links: Erkennungsrate in (u.U. nichtlinearer) Abhängigkeit von der Distanz zwischen LRF-Punkt und AKS basierend auf GAMM-Analysen. Schwarze Linie: unkorrigierte Erkennungsrate, rote Linie: korrigierte Erkennungsrate, lila-schattierter Bereich: 95%ige Konfidenzintervalle zur unkorrigierten Rate. Semi-transparente Punkte kurz über der X-Achse zeigen die Existenz einzelner Messpunkte an. Restliche Abbildungen: GLMM-Analysen (jeweils links) vs. dem „simplen“ Ansatz (jeweils rechts) basierend auf unterschiedlichen Erfassungsradien (siehe jeweilige Bildüberschrift). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95%ige Konfidenzintervalle. Letztere beinhalten nicht die Unsicherheiten des Korrekturschrittes (siehe Haupttext). N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.

A.3 Erfassungsraten außerhalb des jeweiligen Reaktionsbereiches (700 m)

Die Ergebnisse zur Erfassungsrate außerhalb des jeweiligen Reaktionsbereiches ≤ 700 m zeigten, wie erwartet, eine Abnahme der Rate auf. Auch hier zeigten die Werte ein ähnliches Ergebnis bei der jeweiligen Art, unabhängig von der Wahl der Methode ob simple oder GLMM-basiert. Die höchste Erfassungsrate zeigten hier allerdings die Weißstörche mit 89,8 % (simple, GLMM 88,1 %, s. Abb. A.9) auf, gefolgt vom Seeadler mit 77,3 % (simple, GLMM 80,2 %, s. Abb. A.8). Die kleinste der drei untersuchten Arten, der Rotmilan, zeigte wieder die niedrigste Erfassungsrate mit 69,7 % (simple, GLMM 65,3 %, s. Abb. A.7) auf. Die Erfassungswerte außerhalb des Reaktionsbereiches zeigten, trotz der größeren Entfernung, hohe Werte von mindestens knapp 70 % auf.

Rotmilan: $r_{\text{Reaktion}} = \leq 700$ m: Erfassungsrate simpel: **69,7 %**, Erfassungsrate-GLMM: **65,3 %**

Weißstorch: $r_{\text{Reaktion}} = \leq 700$ m: Erfassungsrate simpel: **89,8 %**, Erfassungsrate-GLMM: **88,1 %**

Seeadler: $r_{\text{Reaktion}} = \leq 700$ m: Erfassungsrate simpel: **77,3 %**, Erfassungsrate-GLMM: **80,2 %**

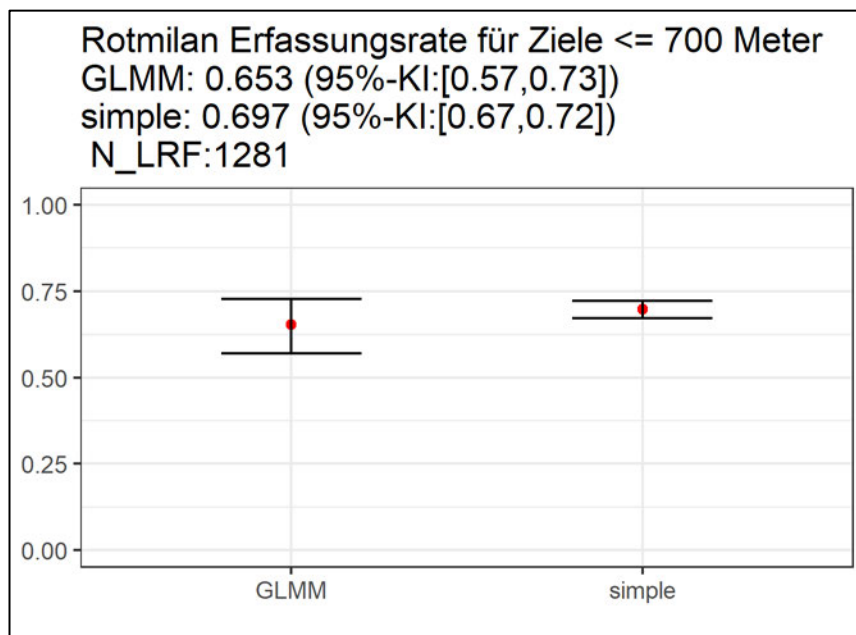


Abb. A.7: Statistische Ergebnisse zur Erfassungsrate bzgl. Des Rotmilans. GLMM-Analysen (links) vs. Dem „simplen“ Ansatz (rechts) basierend auf einem Erfassungsradius von 700 m ($>$ dem Reaktionsradius bis max. 700 m). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95 %ige Konfidenzintervalle. N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.

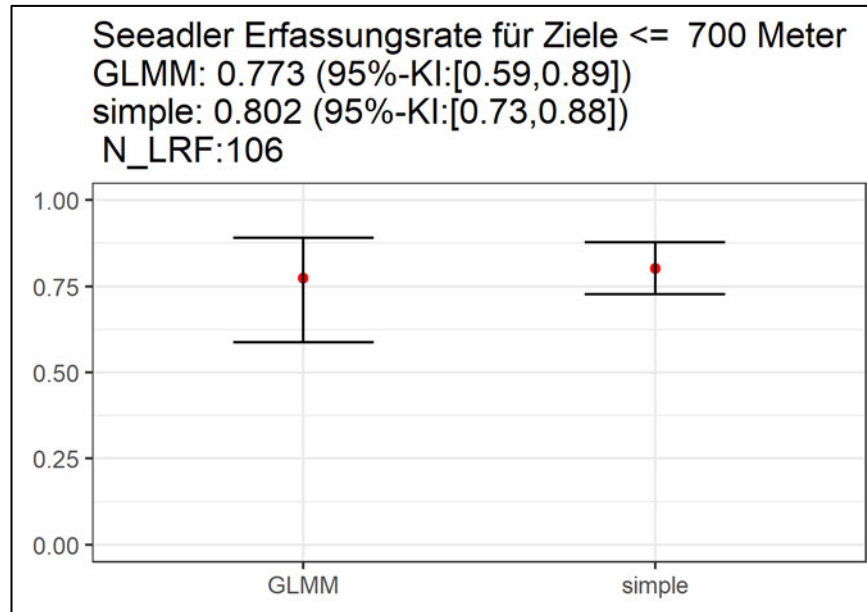


Abb. A.8: Statistische Ergebnisse zur Erfassungsrate bzgl. Des Seeadlers. GLMM-Analysen (links) vs. Dem „simplen“ Ansatz (rechts) basierend auf einem Erfassungsradius von 700 m (> dem Reaktionsradius bis max. 700 m). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95 %ige Konfidenzintervalle. N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.

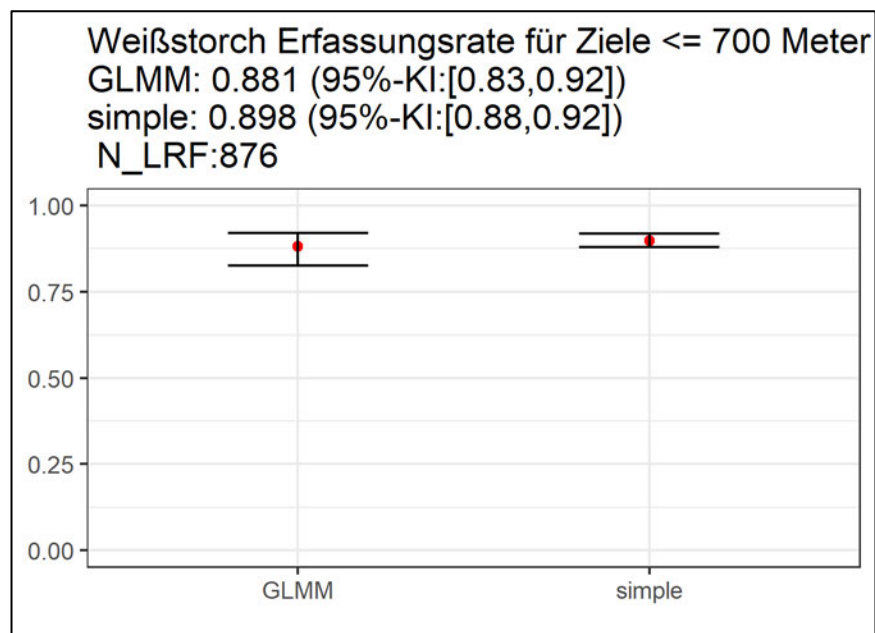


Abb. A.9: Statistische Ergebnisse zur Erfassungsrate bzgl. Des Weißstorches. GLMM-Analysen (links) vs. Dem „simplen“ Ansatz (rechts) basierend auf einem Erfassungsradius von 700 m (> dem Reaktionsradius bis max. 700 m). Rote Punkte geben Mittelwerte an, schwarze Balken 95 %ige Konfidenzintervalle. N_LRF gibt die Anzahl der zugrundeliegenden LRF-Punkte an.