

ABSCHLIEßENDER PRÜFBERICHT

**zur digitalen Validierung des AVES-AKS für die Vogelart Weißstorch
gemäß Prüfrahen für Antikollisionssysteme (Schleswig-Holstein)**



TÜV NORD Referenznr.: 2025-WND-RB-387-R0

Datum: 09.06.2026

Gegenstand der Prüfung	Abschließender Prüfbericht zur digitalen Validierung des AVES-AKS für die Vogelart Weißstorch gemäß Prüfrahmen für Antikollisionssysteme (Schleswig-Holstein)
Kunde	ProTecBird GmbH Brinckmannstraße 31 25813 Husum

Die Ausarbeitung der gutachtlichen Stellungnahme erfolgte durch:

Verfasser	 Dr. J. Hauschild Sachverständiger Hamburg, 09.06.2026
Geprüft durch	 M.Sc. N. Cromm Sachverständiger Hamburg, 09.06.2026

Änderungshistorie

Rev.	Datum	Änderung
0	09.06.2026	Erste Ausgabe

Herausgeber

TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG
Große Bahnstraße 31 • 22525 Hamburg
Geschäftsführung: Silvio Konrad, Dr. Hans Koopman
Amtsgericht Hamburg • HRA 100227
USt.-IdNr.: DE 813992777 • Steuer-Nr.: 27/628/00023

Für weitere Auskünfte

Dr. J. Hauschild
Telefon: +49 40 8557-1648
E-Mail: jhauschild@tuev-nord.de

Urheberrechtshinweis

Dieser Bericht wird ausschließlich dem oben genannten Antragsteller bzw. Kunden zur Verfügung gestellt. Die Veröffentlichung oder Verbreitung dieses Berichts ist nur durch vorherige schriftliche Freigabe der TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG oder des oben genannten Antragstellers oder Kunden gestattet. Eine auszugsweise Veröffentlichung oder Verbreitung ist im Allgemeinen nicht gestattet.

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	4
2	Projektbeschreibung	5
2.1	<i>Funktionsweise AVES</i>	5
2.2	<i>Datengrundlage.....</i>	8
2.3	<i>Beteiligte Akteure</i>	8
3	Prüfung der Dokumentation.....	9
4	Ergänzungsprüfung.....	10
4.1	<i>Prüfung des Konzepts der Ergänzungsprüfung</i>	10
4.2	<i>Prüfung der naturschutzfachlichen Aspekte.....</i>	12
4.2.1	<i>Versuchsplan und Versuchsdurchführung.....</i>	12
4.2.2	<i>Unabhängige Datenerhebung und -auswertung.....</i>	14
4.2.3	<i>Auswertungsmethodik und Versuchsergebnisse</i>	15
4.3	<i>Abschließende Bewertung.....</i>	19
5	Prüfanmerkungen	19
5.1	<i>Liste der offenen Punkte.....</i>	20
5.2	<i>Liste der kritischen Abweichungen</i>	20
5.3	<i>Liste der relevanten Abweichungen.....</i>	20
5.4	<i>Liste der geringfügigen Abweichungen.....</i>	21
6	Formelzeichen und Abkürzungen.....	21
7	Rechtsbelehrung	22
8	Literatur- und Quellenangaben	23
8.1	<i>Allgemeine Unterlagen</i>	23
8.2	<i>Regelwerk</i>	23
8.3	<i>Unterlagen zur Ergänzungsprüfung.....</i>	23
8.4	<i>Unterlagen zu naturschutzfachlichen Themen.....</i>	23

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	AVES PTZ-Kamerasystem /E-4/	6
Abbildung 2	Beispielhafte Illustration für zwei montierte PTZ-Kameras an einer Onshore-WEA /E-4/	6
Abbildung 3	Theoretischer Erfassungsbereich einer PTZ-Kamera /E-4/	7
Abbildung 4	Positionsbestimmung über Triangulation von mind. 2 AVES-AKS	7

1 Aufgabenstellung

Die TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG (TÜV NORD) ist von der ProTecBird GmbH mit Schreiben vom 06.01.2026 mit einer unabhängigen Begleitung einer Ergänzungsprüfung (Digitale Validierung) des Antikollisionssystems (AKS) AVES WIND ONSHORE (AVES) gemäß Prüfraumen Schleswig-Holstein (SH) /R-1/ für den Weißstorch beauftragt worden.

Der Prüfraumen SH:2024 /R-1/ definiert die Anforderungen an die Entwicklung, Validierung und Prüfung von AKS für Windenergieanlagen (WEA) an Land. Außerdem sind Vorgaben für die Dokumentation und das Qualitätsmanagement sowie die Betriebsphase enthalten. In Summe umfasst der Prüfraumen alle relevanten Phasen im Lebenszyklus eines AKS. Den Herstellern gibt der Prüfraumen einen fachlichen Rahmen an die Hand, der es ihnen ermöglicht, die Leistungsfähigkeit ihres Produktes zur Darlegung der grundsätzlichen Wirksamkeit mit einer einmaligen Validierung und Systemprüfung zu belegen. Darüber hinaus ist eine Weiterentwicklung von AKS im Rahmen einer auf die maßgeblichen Änderungen fokussierten Teilvalidierung und Ergänzungsprüfung möglich.

Mit dem Ziel, einen Nachweis über die digitale Validierung und die Erfüllung der Vorgaben des Prüfraumens SH:2024 /R-1/ zu erbringen, sind, im Sinne einer Ergänzungsprüfung nach Prüfraumen SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.4.2, mindestens die folgenden Punkte auf Richtigkeit, Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit zu überprüfen und zu bewerten:

- Konzept der Ergänzungsprüfung: geplante Änderungen, übertragbare Nachweise und neu zu erbringende Nachweise.
- Für die neu zu erbringenden Ergebnisse/Nachweise erfolgen die Prüfungen entsprechend den Anforderungen/Prüfvorgaben aus dem Prüfraumen SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.4.1 „Systemprüfung“.

Im Rahmen der unabhängigen Begleitung der Ergänzungsprüfung wurden die folgenden Punkte gemäß Prüfraumen SH:2024 /R-1/ bearbeitet:

- Prüfung von Dokumentation und Qualitätsmanagement: Die Prüfung von Dokumentation und Qualitätsmanagement dient der Bewertung, inwieweit die grundsätzlichen Anforderungen des Prüfraumens gemäß Kapitel 3.6 /R-1/ umgesetzt wurden. Die Prüfung erfolgte durch Dokumentationsprüfung sowie durch Audits, die entweder vor Ort oder online durchgeführt wurden.
- Prüfung des Konzepts der Ergänzungsprüfung: Ist ein Einsatz eines AKS in einem nach Einflussanalyse abweichenden Szenario geplant, für das die Ergebnisse der bisher durchgeführten Validierung nicht übertragbar sind, oder wenn sich durch eine Modifikation Änderungen der Funktionsweise oder neue Einflussfaktoren ergeben, so ist, nach Prüfraumen SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.4.2, eine Ergänzungsprüfung durchzuführen. Eine Ergänzungsprüfung setzt eine gültige Systemprüfung gemäß Prüfraumen SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.4.1 voraus. Im Rahmen der Ergänzungsprüfung sind die geplanten Änderungen zu beschreiben und es ist plausibel zu begründen, welche der Ergebnisse/Nachweise der Systemprüfung übertragbar sind und es ist darzulegen, welche der Ergebnisse/Nachweise aufgrund der geplanten Änderungen neu zu erbringen sind. Für die neu zu erbringenden Ergebnisse/Nachweise gelten die Anforderungen/Prüfvorgaben aus dem Prüfraumen SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.4.1 „Systemprüfung“. Die Prüfung erfolgte durch Dokumentationsprüfung.
- Prüfung der naturschutzfachlichen Aspekte: Im Sinne neu zu erbringender Ergebnisse/Nachweise wurden die naturschutzfachlichen Aspekte identifiziert. Die Prüfung der naturschutzfachlichen Aspekte dient der Bewertung, inwieweit die Anforderungen des Prüfraumens SH:2024 /R-1/ gemäß Kapitel 3.3 umgesetzt wurden. Gemäß Prüfraumen SH:2024 /R-1/ ist

das Ziel der Untersuchung ein empirisch ausreichend fundierter Nachweis darüber, dass die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit eines AKS mit hinreichender Zuverlässigkeit erreicht werden. Bestandteil der digitalen Validierung waren die Ermittlung der Raten (Erfassungsraten, Erkennungsraten, Gesamtraten). Die Prüfung erfolgte durch Dokumentationsprüfung und stichprobenhafte Nachberechnung von Kenngrößen sowie durch Audits, die entweder vor Ort oder online durchgeführt wurden. Im Sinne neu zu erbringender Ergebnisse/Nachweise waren die folgenden Punkte Bestandteil der Prüfung:

- Versuchsplan.
- Versuchsdurchführung.
- Unabhängige Datenerhebung und -auswertung.
- Auswertungsmethodik.
- Versuchsergebnisse.
- Abschließender Prüfbericht: Die Ergebnisse werden inklusive der identifizierten Auffälligkeiten und Abweichungen in diesem Prüfbericht dokumentiert (siehe Prüfrahen SH:2024/R-1/ Kapitel 3.4.6).

Die Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen werden im vorliegenden Bericht dargestellt.

2 Projektbeschreibung

2.1 Funktionsweise AVES

Die folgende Beschreibung der Funktionsweise des AVES-AKS wurde den Dokumenten /E-4/ bis /E-5/ entnommen.

Das AVES-AKS ist ein modulares Software- und Sensorsystem zur automatisierten Vermeidung von Vogelkollisionen mit WEA. Es besteht aus mehreren physisch und funktional identisch aufgebauten AVES Wind Einzelsystemen, die jeweils aus einer PTZ-Kamera, einem Industrie-PC mit vorinstallierter Software sowie Stromversorgungskomponenten bestehen. Jedes Einzelsystem ist in der Lage, lokal Bilddaten zu erfassen, Objekte zu erkennen und zu klassifizieren sowie Tracking- und Steuerlogik auszuführen.

Alle AVES Wind Einzelsysteme sind über eine redundante Netzwerkstruktur (typischerweise als Glasfaser-Ring ausgelegt) miteinander verbunden. Im Verbund wird eines dieser Systeme als Master-System konfiguriert. Dieses übernimmt zusätzlich zu den Standardfunktionen die zentrale Koordination, Entscheidungslogik sowie die Anbindung an die externe Steuerung des Windparks. Die Kommunikation mit der Windparksteuerung erfolgt über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), die über Industriestandardschnittstellen eingebunden ist.

Die Überwachung des Luftraums erfolgt mit beweglichen PTZ-Kamerasystemen (siehe Abbildung 1 und beispielhafte Illustration in Abbildung 2). Diese Kamerasysteme sind so konzipiert, dass sie den interessierenden Luftraum mit Hilfe von Schwenk-, Neige- und Zoomfunktionen sorgfältig überwachen und so eine automatische Verfolgung der Vögel und eine Nahaufnahme zur Artenerkennung ermöglichen.

In Abhängigkeit eines zuvor festgelegten Reaktionsbereichs und der gemessenen Position, Flugroute und Fluggeschwindigkeit einer Zielvogelart lässt sich festlegen, ob eine Abschaltung der WEA erforderlich ist oder nicht und wann die WEA wieder in Betrieb genommen werden kann.

Die Hochleistungskamera ermöglicht die 360-Grad-Erfassung und Verfolgung von Einzelvögeln und Vogelschwärmen. Dabei wird z. B. beim Rotmilan eine Erfassungs-Reichweite von bis zu 1.000 m bei Tag erreicht (siehe Abbildung 3). Größere Vögel wie Seeadler können entsprechend früher detektiert werden. Die IR-Lichtquelle für den Nachtmodus hat eine Reichweite von bis zu 400 m. Damit kann das System bei Bedarf auch auf nachtaktive Vogelarten ausgeweitet werden /E-4/ (siehe Abbildung 1).

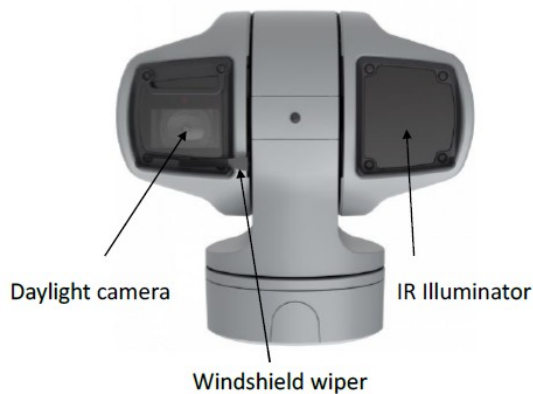


Abbildung 1 AVES PTZ-Kamerasystem /E-4/

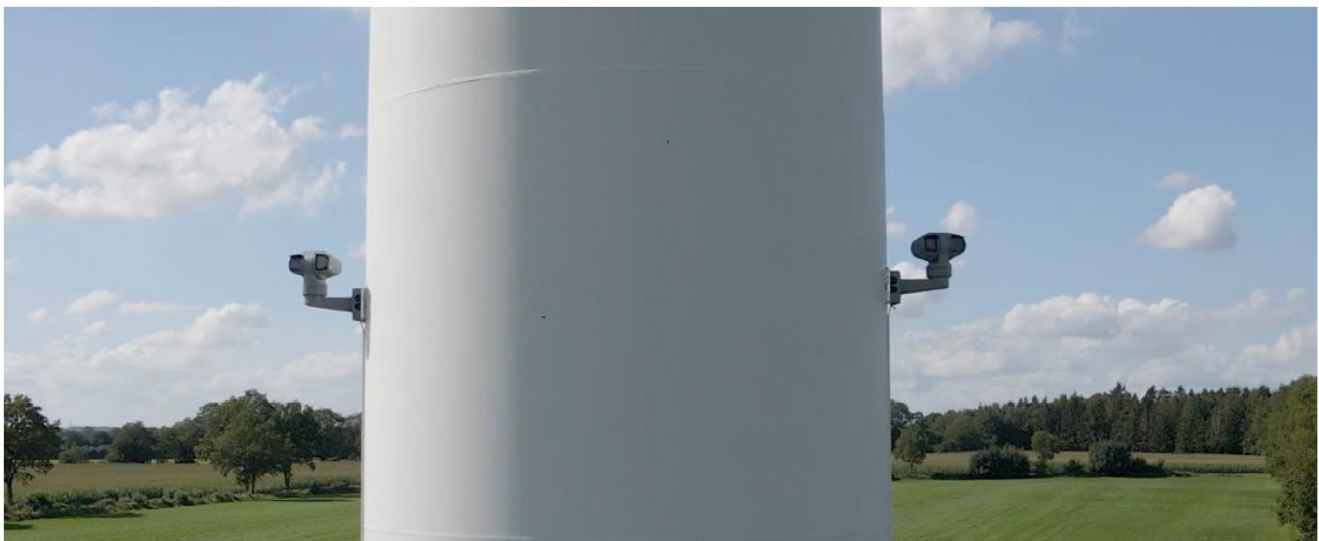


Abbildung 2 Beispielhafte Illustration für zwei montierte PTZ-Kameras an einer Onshore-WEA /E-4/

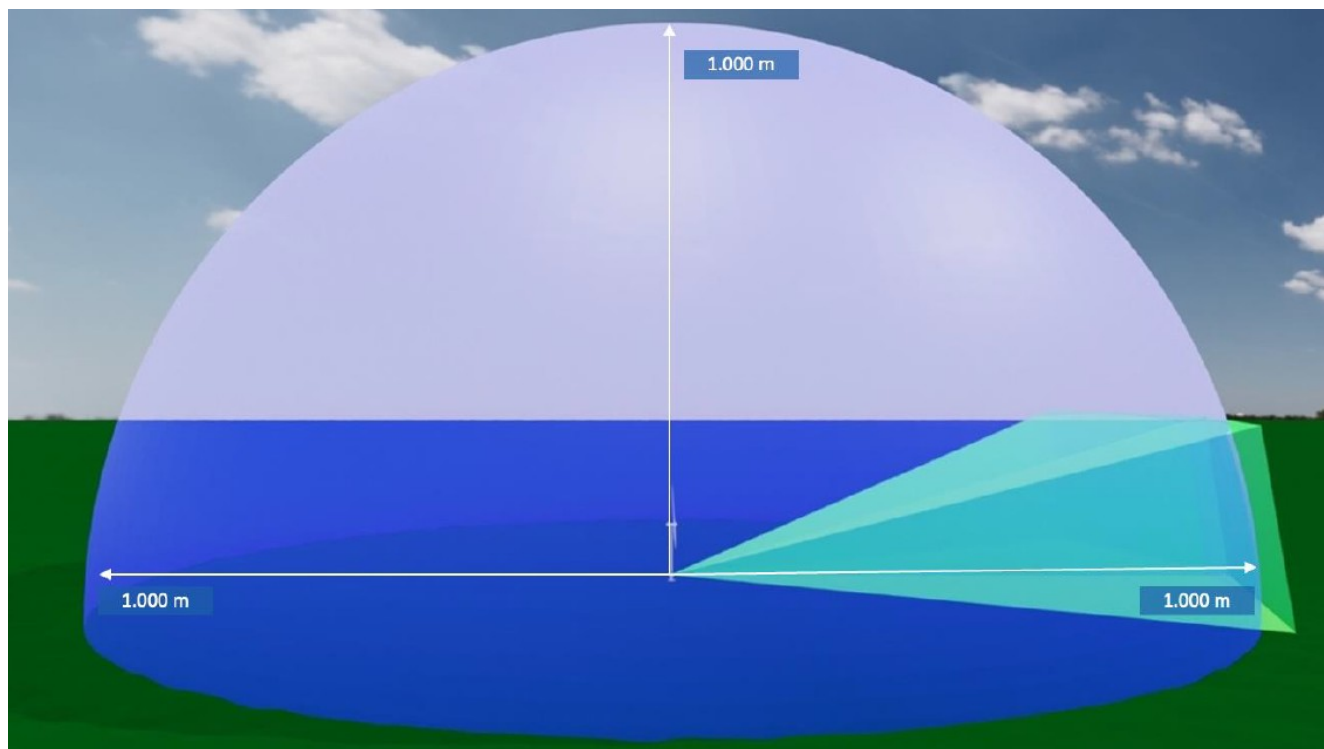


Abbildung 3 Theoretischer Erfassungsbereich einer PTZ-Kamera /E-4/

Sobald eine geschützte Vogelart (Zielvogelart) identifiziert wurde, wird diese von bis zu zwei unterschiedlichen Kamerasystemen kontinuierlich verfolgt. Die Entfernung und Position des Vogels können bereits monokular mit einer Kamera über die bekannte Größe der erkannten Vogelart bestimmt werden. Optional erfolgt mittels Triangulation eine präzisere dreidimensionale Positionsbestimmung (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4 Positionsbestimmung über Triangulation von mind. 2 AVES-AKS

2.2 Datengrundlage

Die folgende Beschreibung wurde dem seitens der Bionum GmbH vorgelegten Bericht zur digitalen Validierung für den Weißstorch /N-1/ entnommen.

LRF-Daten für die Bestimmung/Prognose der artspezifischen Erfassungsrate

Die im Rahmen der digitalen Validierung (Ermittlung der Erfassungsrate) verwendeten LRF-Daten wurden an 38 verschiedenen Tagen zwischen August und Oktober 2023 und 2024 im Umfeld von insgesamt 14 verschiedenen Kameras/Standorten erhoben und beinhalten insgesamt 9.620 eingemessene LRF-Punkte aus 871 verschiedenen Flugtracks von 25 verschiedenen Vogelspezies in Distanzen zwischen 300 und 1.000 Metern /N-1/. Zudem wurden (gemäß Prüfraum SH:2024 /R-1/) nur diejenigen LRF-Tracks verwendet, die mindestens vier verschiedene Punkte im analysierten Erfassungsbereich umfassten, da sie im Kontext der Regressionsmethoden bei oft sehr geringem Anteil an den Gesamtdaten zu einem unverhältnismäßig starken Anstieg der Varianz bzw. zu verzerrten Ergebnissen führen können /N-1/.

LRF-Daten und AVES-AKS-Daten des Rotmilans zwecks Validierung

Die im Rahmen der digitalen Validierung verwendeten LRF- und AKS-Daten des Rotmilans (zwecks Validierung der rechnerischen Kopplung beider Einzelarten mit externen/unabhängigen Daten) wurden, wie im Rahmen der Systemprüfung beschrieben /N-2/, /E-2/, an 25 Erfassungstagen an fünf unterschiedlichen Standorten erhoben und beinhalten insgesamt 12.024 eingemessene LRF-Punkte.

LRF-Daten des Schreiadlers zwecks Validierung

Die im Rahmen der digitalen Validierung verwendeten LRF-Daten des Schreiadlers (zwecks Validierung der Parametrierung des Kopplungsmodells mit externen/unabhängigen Daten) wurden an zwei verschiedenen Tagen im September 2025 im Umfeld von zwei verschiedenen Kameras erhoben und beinhalten insgesamt 295 eingemessene LRF-Punkte aus 27 verschiedenen Flugtracks zwischen 400 und 600 Metern /N-1/.

AKS-Kameradaten für die Bestimmung der Erkennungsrate des Weißstorchs

Von beliebig ausgewählten AVES-AKS-Kameras wurden an beliebig ausgewählten Tagen alle Videos von getrackten Objekten manuell durchsucht. Videos, auf denen ein oder mehrere Weißstörche zu sehen waren, wurden für die digitale Validierung abgespeichert. So wurden für zwölf verschiedene Tage zwischen Mai und Juni 2025 von neun verschiedenen Kameras Videos von Weißstörchen heruntergeladen. Insgesamt umfasste der Datensatz 78 Tracks zwischen 0 und 1.000 m Distanz.

2.3 Beteiligte Akteure

Im Folgenden werden die an dieser Ergänzungsprüfung beteiligten Rollen/Akteure kurz vorgestellt:

- Projektleitung: Im Rahmen dieses Projekts obliegt die Projektleitung dem Hersteller des AVES-AKS und Auftraggeber der Validierung, der ProTecBird GmbH.
- Hersteller AKS: Hersteller des AVES-AKS ist die ProTecBird GmbH.
- Datenerhebung: Datenerhebung und -selektion erfolgte durch die ProTecBird GmbH.
- Datenbereitstellung: Downloads und technische Bereitstellung von Videodatenmaterial erfolgte durch die BioConsult SH GmbH & Co. KG.
- Experte:in Datenauswertung: Die Entwicklung der Methodik zur digitalen Validierung und die Auswertung der Daten erfolgte durch die Bionum GmbH.

- Ersteller:in Validierungsbericht: Die Erstellung des zusammenfassenden naturschutzfachlichen Validierungsberichts im Sinne Prüfraumen SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.3 erfolgte durch die Bionum GmbH.
- Unabhängige Stelle: Unabhängige Stelle im Sinne Prüfraumen SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.3.8 und Kapitel 3.4.2 ist die TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG (TÜV NORD), welche zudem den abschließenden Prüfbericht (dieses Dokument) nach Prüfraumen SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.4.6 erstellt hat.

3 Prüfung der Dokumentation

Prüfpunkte

Gemäß Prüfraumen SH:2024 /R-1/ sollte sich die interne Dokumentation an den Grundzügen der gängigen Standards wie DIN EN ISO 9001 oder DIN EN 61508 orientieren. Die Dokumentation muss eindeutig, übersichtlich, nachvollziehbar und leicht verständlich sein. Alle relevanten Lebensphasen von der Entwicklung über die Verifizierung, Validierung und Betrieb müssen dokumentiert werden. Es sollte ein gut pflegbares und verständliches Dokumentenmanagementsystem intern eingerichtet werden. Die Struktur muss dem Zweck dienen und prüfbar sein. Die einzelnen Dokumente sollten mindestens die folgenden Punkte enthalten:

- Eindeutiger Titel und Bezeichnung des Dokumentes.
- Anwendungsbereich (Zweck des Dokumentes).
- Register und Inhaltsverzeichnis.
- Revision, Versionsnummer, Datum.
- Dokumentenlenkungsinformationen.
- Informationen zur Freigabe und Prüfung.
- Dokumentenverantwortlichkeit.

Durchführung

Seitens der ProTecBird GmbH wurden die folgenden Dokumente vorgelegt:

- Bericht zur digitalen Validierung für den Weißstorch /N-1/.
- Ergänzender Bericht zur Datengrundlage /N-3/.
- Konzept zur digitalen Ergänzungsprüfung /E-1/.
- Erklärung ProTecBird GmbH zur Datengrundlage /N-5/.
- Erklärung Bionum GmbH zur Datenauswertung /N-6/.

Bewertung TÜV NORD

Für die vorgelegte Dokumentation (siehe Kapitel 4.1 und Kapitel 4.2) kann bestätigt werden, dass die Anforderungen des Prüfraumes SH:2024 /R-1/ an die Dokumentation erfüllt werden.

Unter Berücksichtigung der durch TÜV NORD geprüften Dokumente (siehe Kapitel 4.1 und Kapitel 4.2) kommen wir zu dem Ergebnis, dass die vorgelegten Dokumente die Anforderungen des Prüfraumes SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.6 erfüllen.

Prüfanmerkung

keine

4 Ergänzungsprüfung

Unter Berücksichtigung bereits vorliegender Prüfberichte wird geprüft, welche der Ergebnisse/Nachweise der Systemprüfung übertragbar sind und welche der Ergebnisse/Nachweise aufgrund der geplanten Änderungen neu zu erbringen sind.

Für die neu zu erbringenden Ergebnisse/Nachweise erfolgen die Prüfungen entsprechend den Anforderungen/Prüfvorgaben aus dem Prüfraumen SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.4.1 „Systemprüfung“.

Folgende Nachweisdokumente liegen vor und werden im Rahmen dieser Ergänzungsprüfung berücksichtigt:

- /E-2/: TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG. Abschließender Prüfbericht zur Validierung des AVES-AKS gemäß Prüfraumen für Antikollisionssysteme (Schleswig-Holstein).

Zudem hat die ProTecBird GmbH mit dem Schreiben vom 05.02.2026 /E-1/ eine Erläuterung zur Umsetzung der Ergänzungsprüfung vorgelegt.

4.1 Prüfung des Konzepts der Ergänzungsprüfung

Prüfpunkte

Gemäß Prüfraumen SH:2024 /R-1/ ist im Rahmen einer Ergänzungsprüfung nachzuweisen, dass alle Anforderungen analog zur Systemprüfung auch für das neue Szenario erfüllt werden. Dabei kann gemäß Prüfraumen SH:2024 /R-1/ auf die Ergebnisse der Systemprüfung oder weiterer vorangegangener Ergänzungsprüfungen verwiesen werden, sofern eine Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Prüfungen auf das neu zu bewertende Szenario plausibel begründet werden kann. In diesem Kapitel wird bewertet, welche der bisher erbrachten Nachweise „übertragbar“ sind und welche der Nachweise „neu“ zu erbringen sind. Die Bewertung erfolgt dabei anhand der Nachweise, welche gemäß Prüfraumen SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.4.1 im Rahmen einer Systemprüfung vorzulegen sind:

- Systembeschreibung (Hardware und Software).
- Naturschutzfachliche Einflussanalyse.
- Versuchsplan.
- Versuchsdurchführung (Vor-Ort-Überprüfung).
- Unabhängige Datenerhebung und -auswertung.
- Auswertungsmethodik.
- Versuchsergebnisse.

Durchführung

Mit dem Dokument /E-1/ zur digitalen Ergänzungsprüfung Weißstorch hat die ProTecBird GmbH die Anwendung von Anforderungen des Prüfraumen SH:2024 /R-1/ bewertet – dies auf Basis der bereits erfolgten Prüfungen gemäß Validierung des AVES-AKS / Systemprüfung für den Rotmilan (siehe TÜV NORD Prüfbericht /E-2/). Mit dem Bericht zur digitalen Validierung für den Weißstorch /N-1/ hat die Bionum GmbH einen Bericht vorgelegt, in welchem die Methode der digitalen Validierung hergeleitet und beschrieben und mit dem Zwecke der Validierung des Weißstorchs umgesetzt wurde.

Bewertung TÜV NORD

Systembeschreibung (Hardware und Software): In dem Dokument zur digitalen Ergänzungsprüfung für den Weißstorch /E-1/ wurde die Aussage getroffen, dass das System AKS in derselben vollumfänglichen technischen Ausstattung betrieben würde, wie für den Einsatz beim Schutz des Rotmilans (Systemprüfung mit TÜV NORD Prüfbericht /E-2/). Unter Berücksichtigung der durch TÜV NORD geprüften Dokumente /E-1/ sowie ergänzenden Gesprächen mit der ProTecBird GmbH zu den Konfigurationen

im Rahmen der Projekte zur Systemprüfung Rotmilan /U-1/ und digitalen Validierung Weißstorch /U-2/ kommen wir zu dem Ergebnis, dass die Ergebnisse der Systemprüfung Rotmilan hinsichtlich der technischen Aspekte zur Hardware und Software übertragbar sind (Kapitel 3.1.2 und 3.2 aus dem TÜV NORD Prüfbericht /E-2/). Zur Sicherstellung, dass zukünftige Modifikationen gemäß Prüfrahen SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.2.3 dahingehend bewertet werden, ob sie eine Änderung der Funktionsweise bewirken und eine erneute Validierung erforderlich machen, empfehlen wir, den Umgang mit Modifikationen/Änderungen konsequent in das Managementsystem der ProTecBird GmbH zu integrieren [RA-1].

Naturschutzfachliche Einflussanalyse: In dem Dokument zur digitalen Ergänzungsprüfung Weißstorch /E-1/ wurde die Aussage getroffen, dass die Aufnahme der zusätzlichen Vogelart Weißstorch zu den zu schützenden Vogelarten keinen Einfluss auf die Einfluss- und Wirkungsanalyse des Systems AVES-AKS habe. Dem Validierungsbericht /N-1/ und dem ergänzenden Bericht zur Datengrundlage /N-3/ ist zu entnehmen, dass Parameter, der im Rahmen der Systemprüfung erstellten naturschutzfachlichen Einflussanalyse /E-3/, übernommen wurden. Um eine repräsentative Auswertung zu ermöglichen, sei es notwendig, dass die Videos die Verhältnisse des Live-Betriebs (Lichtverhältnisse, Größe des Vogels im Bild, Auflösung, Flugverhalten, usw.) möglichst genau nachbilden. Unter Berücksichtigung der durch TÜV NORD geprüften Dokumente /E-1/, /N-1/, /N-3/ sowie der ergänzenden Aussagen der Bionum GmbH zur Übertragbarkeit der naturschutzfachlichen Einflussanalyse aus /E-3/ kommen wir zu dem Ergebnis, dass die Ergebnisse der Systemprüfung Rotmilan hinsichtlich der naturschutzfachlichen Einflussanalyse übertragbar sind (Kapitel 3.3.1 aus dem TÜV NORD Prüfbericht /E-2/).

Versuchsplan und Versuchsdurchführung: Da die Vorgehensweise von der Vorgehensweise im Rahmen der Systemprüfung für den Rotmilan /E-2/ deutlich abweicht (Erhebung von LRF-Daten vs. Zusammenstellung eines AKS-Datensatzes für die digitale Validierung), sind die Ergebnisse aus dem TÜV NORD Prüfbericht /E-2/ zur Versuchsplanung und -durchführung nicht oder nur mit Einschränkungen (z. B. für die Prognose der Erfassungsrate – siehe Kapitel 4.2.3) übertragbar. Die Einhaltung der Anforderungen aus dem Prüfrahen SH:2024 /R-1/ an die Versuchsplanung und die Versuchsdurchführung sind somit neu nachzuweisen und im Rahmen dieses Prüfberichts zu bewerten (siehe Kapitel 4.2.1).

Unabhängige Datenerhebung und -auswertung: Da die Datengrundlage von der Datengrundlage im Rahmen der Systemprüfung für den Rotmilan /E-2/ deutlich abweicht (Untersuchung für den Weißstorch vs. Rotmilan), sind die Ergebnisse aus dem TÜV NORD Prüfbericht /E-2/ zur unabhängigen Datenerhebung und -auswertung nicht übertragbar. Die Einhaltung der Anforderungen aus dem Prüfrahen SH:2024 /R-1/ an die unabhängige Datenerhebung und -auswertung sind somit neu nachzuweisen und im Rahmen dieses Prüfberichts zu bewerten (siehe Kapitel 4.2.2).

Auswertungsmethodik und Versuchsergebnisse: Da sich die Auswertungsmethodik der digitalen Validierung von der Auswertungsmethodik im Rahmen der Systemprüfung für den Rotmilan /E-2/ deutlich unterscheidet (Kombination von prognostizierter Erfassungsrate mit Erkennungsrate basierend auf AKS-Daten vs. Gesamtrate auf Basis einer örtlich-zeitlichen Verschneidung von LRF-Daten und AKS-Daten), sind die Ergebnisse aus dem TÜV NORD Prüfbericht /E-2/ zur Auswertungsmethodik und den Versuchsergebnissen nicht übertragbar. Die Einhaltung der Anforderungen aus dem Prüfrahen SH:2024 /R-1/ an die Auswertungsmethodik und die Versuchsergebnisse sind somit neu nachzuweisen und im Rahmen dieses Prüfberichts zu bewerten (siehe Kapitel 4.2.3).

Prüfanmerkung

[RA-1] Zur Verbesserung und Weiterentwicklung der Prozesse ist im Managementsystem der ProTecBird GmbH verbindlich zu regeln, wie mit Modifikationen/Änderungen gemäß Prüfraumen SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.2.3 umzugehen ist (z. B. im Qualitätsmanagementhandbuch sowie im Hardware- und Software-Entwicklungsplan).

Hinweis: Diese Prüfanmerkung ist prozessualer Natur (Änderungsmanagement) und hat im vorliegenden Fall keinen erkennbaren direkten Einfluss auf die grundsätzliche Wirksamkeit des AKS sowie die Einhaltung des erforderlichen Schutzniveaus (siehe Bewertung TÜV NORD). Die Abweichung ist im weiteren Betrieb zeitnah zu adressieren und zu beheben.

4.2 Prüfung der naturschutzfachlichen Aspekte

Die Validierung hat gemäß Prüfraumen SH:2024 /R-1/ zum Ziel, einen empirisch ausreichend fundierten Nachweis darüber zu erbringen, dass die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit eines AKS mit hinreichender Zuverlässigkeit erreicht werden.

Im Sinne der vorliegenden digitalen Validierung sind die Ermittlung der Raten (Erfassungsrate, Erkennungsrate und Gesamtrate) Bestandteil der geforderten Untersuchungen. Eine Ermittlung des örtlichen Messfehlers ist im Rahmen der vorliegenden digitalen Validierung nicht erforderlich – der örtliche Messfehler ist gemäß Prüfraumen SH:2024 /R-1/ über gezielte Feldexperimente im Erfassungsbereich entlang der unterschiedlichen existierenden Distanzen zum AKS zu ermitteln. Die Ermittlung des örtlichen Messfehlers war bereits Bestandteil der Systemprüfung für den Rotmilan /N-2/, /E-2/.

Zudem definiert der Prüfraumen SH:2024 /3/ Anforderungen an den Versuchsplan und die Versuchsdurchführung, die Unabhängigkeit der Datenerhebung und -auswertung, die Datenaufbereitung und die statistischen Analysen.

4.2.1 Versuchsplan und Versuchsdurchführung

Prüfpunkte

Es ist sicherzustellen, dass das gewählte Vorgehen plausibel im Hinblick auf die digitale Validierung für den Weißstorch und den Prüfraumen SH:2024 /R-1/ ist.

Durchführung

Seitens der ProTecBird GmbH wurden die folgenden Dokumente vorgelegt:

- Bericht zur digitalen Validierung für den Weißstorch /N-1/.

Bewertung TÜV NORD

Mit dem Validierungsbericht /N-1/ wurde ein Dokument vorgelegt, das die Versuchsplanung und die Versuchsdurchführung beschreibt:

Erfassungsbereich: Im Falle der Analyse der Erfassungsrate wurde im Rahmen der digitalen Validierung /N-1/ der ringförmige Bereich mit 300 bis 1.000 m Distanz zum AKS sowie 300 bis 700 m Distanz zum AKS betrachtet. Darüber hinaus wurden die untersuchten Erfassungsbereiche weder nach oben noch nach unten begrenzt, sondern alle LRF- bzw. AKS-Kamera-Tracks analysiert, die sich horizontal betrachtet innerhalb der Erfassungsbereiche befanden. Da es sich beim AVES-AKS um ein Mehrkamera-System handelt, welches die Anzahl der Kameras projektspezifisch anpasst, kamen in den vorliegenden Feldexperimenten zu den Raten/der Validierung insgesamt vier Kameras zum Einsatz. Der

Erfassungsbereich wurde entsprechend angepasst (ein „Tortenstück“ von 30 Grad Öffnungswinkel pro Kamera).

Erfassungsrate: Die Untersuchungen zur Erfassungsrate hatten gemäß Validierungsbericht /N-1/ zum Ziel, ein Modell zur Prognose der artspezifischen Erfassungsrate abzuleiten. Die zur Prognose der artspezifischen Erfassungsrate verwendeten LRF-Daten wurden an 38 verschiedenen Tagen zwischen August und Oktober 2023 und 2024 im Umfeld von insgesamt 14 verschiedenen Kameras/Standorten erhoben und beinhalten insgesamt 9.620 eingemessene LRF-Punkte aus 871 verschiedenen Flugtracks von 25 verschiedenen Vogelspezies in Distanzen zwischen 300 und 1.000 m /N-1/. Zudem wurden diejenigen LRF-Tracks verwendet, die mindestens vier verschiedene Punkte im analysierten Erfassungsbereich umfassten, da sie im Kontext der Regressionsmethoden bei oft sehr geringem Anteil an den Gesamtdaten zu einem unverhältnismäßig starken Anstieg der Varianz bzw. zu verzerrten Ergebnissen führen können /N-1/. Zur Ermittlung eines Prognosemodells wurden unterschiedliche Variablen untersucht, die theoretisch die Erfassungsrate beeinflussen können (u. a. Flügelspannweite, Körperlänge, mittlere Körperausdehnung, Fluggeschwindigkeitsklasse oder Artengruppe). Das abgeleitete Modell zur Prognose der artspezifischen Erfassungsrate wurde anhand der aus der Systemprüfung für den Rotmilan bekannten Ergebnisse zur Erfassungsrate /N-2/ validiert.

Erkennungsrate: Zur Ermittlung der Erkennungsrate wurden im Rahmen der digitalen Validierung /N-1/ Videos von Weißstörchen mit einem KI-Modell offline analysiert. Um eine repräsentative Auswertung zu ermöglichen, war es notwendig, dass die Videos die Verhältnisse des Live-Betriebs (Lichtverhältnisse, Größe des Vogels im Bild, Auflösung, Flugverhalten, usw.) möglichst genau nachbilden. Dazu wurden von beliebig ausgewählten AVES-AKS-Kameras an beliebig ausgewählten Tagen alle Videos von getrackten Objekten manuell durchsucht. Videos, auf denen ein oder mehrere Weißstörche zu sehen waren, wurden für die digitale Validierung abgespeichert. So wurden für zwölf verschiedene Tage zwischen Mai und Juni 2025 von neun verschiedenen Kameras Videos von Weißstörchen heruntergeladen. Insgesamt umfasste der Datensatz 78 Tracks zwischen 0 und 1.000 m Distanz. Um die Videos grob nach Distanz des fliegenden Weißstorchs zu klassifizieren (unter oder über 1.000 m Distanz), wurden die geloggte AKS-Daten genutzt, um eine Abschätzung der mittleren Distanz zu erhalten. Insgesamt umfasste der Datensatz 78 Tracks zwischen 0 und 1.000 m Distanz. Die Videos wurden frame für frame mit dem zu validierenden KI-Modell für die Vogel-Klassifizierung ausgewertet. Analog der Vorgehensweise im Live-Betrieb wurde die KI-Klasse und die KI-Konfidenz pro Frame über die Zeit des Tracks gesammelt und fortlaufend eine „finale“ KI-Klasse berechnet. Das Ergebnis war eine KI-Klasse pro Video-Frame.

Gesamtrate: Die Gesamtrate p_{Ges} beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Vogel vom System sowohl erfasst (Detektion, p_D) als auch korrekt erkannt (Erkennung/Klassifikation, p_C) wird. Da eine Erkennung ohne vorherige Erfassung nicht möglich ist, handelt es sich gemäß Validierungsbericht /N-1/ um eine sog. „bedingte Erkennungsrate“. Die rechnerische Kopplung beider Raten zur Schätzung der Gesamtrate wurde gemäß /N-1/ anhand eines Simulations-Frameworks mittels korrelationskorrigierter Delta-Methode (k-Delta-Methode) realisiert. Die k-Delta-Methode benötigt als Eingangsparameter die Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle der Einzelraten zuzüglich der Parameter zur Streuung und Kopplung der beiden Raten. Die Parameter zur Streuung und Kopplung wurden anhand der Daten des Rotmilans geschätzt und über die Vogelart „Schreiadler“ validiert. Die Validierung des Vorgehens zur Kopplung beider Raten zwecks Ermittlung der Gesamtrate erfolgte anhand der k-Delta-Methode für die Daten des Rotmilans, welche dann mit den bekannten Ergebnissen aus der Systemprüfung /N-2/, /E-2/ verglichen wurden. Abschließend wurde die Gesamtrate für den Weißstorch nebst 95%-Konfidenzintervalle unter Anwendung der k-Delta-Methode ermittelt.

Fazit: Unter Berücksichtigung des durch TÜV NORD geprüften Validierungsberichts /N-1/ kommen wir zu dem Ergebnis, dass das gewählte Vorgehen plausibel ist und die Anforderungen des Prüfraums SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.3.3 an eine Versuchsplanung und -durchführung erfüllt werden.

Die Erfassungsbereiche (als Grundlage der Ermittlung eines Prognosemodells für die Erfassungsrate) wurden stimmig zu den Distanzbereichen gewählt, für welche im späteren Verlauf die Erkennungsrate (auf Basis von AKS-Daten) und die Gesamtrate (rechnerische Kopplung von Erfassungsrate und Erkennungsrate) für den Weißstorch ermittelt wurden.

Der Bedarf zur gesonderten Betrachtung der Erfassungsrate (zwecks späterer Kopplung mit der bedingten Erkennungsrate) wurde erkannt und gesondert untersucht. Zur Überprüfung der Vorgehensweise wurde das abgeleitete Modell zur Prognose der artspezifischen Erfassungsrate über die bekannten Ergebnisse zur Systemprüfung für den Rotmilan /N-2/, /E-2/ validiert.

Der Ansatz der digitalen Validierung zur Ermittlung der Erkennungsrate anhand von AVES-AKS-Kameravideos ist plausibel und konform zu Ausführungen im Prüfraum SH:2024 /3/. Zum Zwecke einer repräsentativen Auswertung wurde festgelegt, dass die Videos die Verhältnisse des Live-Betriebs (Lichtverhältnisse, Größe des Vogels im Bild, Auflösung, Flugverhalten, usw.) möglichst genau nachbilden. Zum Zwecke der Variabilität in den Daten wurden diese aus beliebig ausgewählten AVES-AKS-Kameras an beliebig ausgewählten Tagen erhoben.

Zwecks Ermittlung der Gesamtrate wurde erkannt, dass diese über eine besondere rechnerische Kopplung der Erfassungsrate mit der bedingten Erkennungsrate zu ermitteln ist. Die Umsetzung erfolgte via Simulations-Framework mittels korrelationskorrigierter k-Delta-Methode. Die Parameter zur Streuung und Kopplung (Modellparameter der k-Delta-Methode) wurden anhand der Daten des Rotmilans geschätzt und über die Vogelart „Schreiadler“ validiert. Die Validierung des Gesamtverfahrens erfolgte anhand der k-Delta-Methode für die Daten des Rotmilans, welche dann mit den bekannten Ergebnissen aus der Systemprüfung für den Rotmilan /N-2/, /E-2/ verglichen wurden.

Prüfanmerkung

keine

4.2.2 Unabhängige Datenerhebung und -auswertung

Prüfpunkte

Gemäß Prüfraum SH:2024 /R-1/ ist sicherzustellen, dass die Datenerhebung und Auswertung ohne gegenseitige Einflussnahme erfolgt. Ein beiderseitiger Datenabgleich oder Austausch darf während der Versuchsdurchführung und vor der Auswertung nicht stattfinden. Aus den Anforderungen des Prüfraums SH:2024 /R-1/ lässt sich für eine digitale Validierung folgendes ableiten.

- Es ist sicherzustellen, dass die Datensätze nicht bereits als Trainingsmaterial für das KI-Modell verwendet wurden. Die Validierung muss dann sicherstellen, dass solche Daten von der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen werden, da ansonsten eine Überschätzung der Klassifizierungsleistung resultiert.
- Es ist sicherzustellen, dass keine Daten manipuliert wurden. Die Validierung muss dann sicherstellen, dass die Prozesse ausreichend unabhängig voneinander sind und seitens der beteiligten Akteure entsprechende Selbstverpflichtungserklärungen vorliegen.

Durchführung

Seitens der ProTecBird GmbH und der Bionum GmbH wurden die folgenden Dokumente vorgelegt:

- Bericht zur digitalen Validierung für den Weißstorch /N-1/.
- Ergänzender Bericht zur Datengrundlage /N-3/.
- Zusammenstellung verwendeter Videos /N-4/.
- TÜV NORD Prüfbericht zur Systemprüfung Rotmilan /E-2/.

- Erklärung ProTecBird GmbH /N-5/.
- Erklärung Bionum GmbH /N-6/.

Bewertung TÜV NORD

Für die digitale Validierung wurden folgende Datensätze verwendet:

- LRF-Daten für die Bestimmung/Prognose der artspezifischen Erfassungsrate.
- LRF-Daten und AVES-AKS-Daten des Rotmilans zwecks Validierung.
- LRF-Daten des Schreiadlers zwecks Validierung.
- AKS-Kameradaten für die Bestimmung der Erkennungsrate des Weißstorchs.

Gemäß Validierungsbericht /N-1/, wurde darauf hingewiesen, dass das Bildmaterial von denjenigen Tagen, aus denen die Validierungs-Videos stammten, kategorisch aus dem Training ausgeschlossen wurde. Die verwendeten Datensätze (Validierungsdaten vs. Trainingsdaten) wurden mit /N-4/ zur Verfügung gestellt, einschließlich eines Prüfergebnisses zum Abgleich der Datensätze. Seitens der beteiligten Rollen wurden Erklärungen eingereicht /N-5/, /N-6/ in denen bestätigt wird, dass die Datenerhebungen (AVES-AKS-Daten und LRF-Daten, KI Validierungs-Videos und Trainings-Videos) unabhängig verliefen und Daten zudem nachträglich nicht verändert wurden.

Unter Berücksichtigung der durch TÜV NORD geprüften Unterlagen zur unabhängigen Datenerhebung und -auswertung /N-1/, /N-3/, /N-5/, /N-6/ sowie des TÜV NORD Prüfberichts zur Systemprüfung Rotmilan /E-2/ und einer stichprobenhaften Prüfung der Datensätze /N-4/ kommen wir zu dem Ergebnis, dass die Datenerhebungen und -auswertungen im Kontext der digitalen Validierung Weißstorch gemäß Anforderungen des Prüfrahmens SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.3.8 unabhängig verliefen.

Prüfanmerkung

keine

4.2.3 Auswertungsmethodik und Versuchsergebnisse

Prüfpunkte

Es ist sicherzustellen, dass die Methoden korrekt und sinnvoll angewandt/umgesetzt wurden und die Ergebnisse plausibel im Hinblick auf die digitale Validierung für den Weißstorch und den Prüfrahen SH:2024 /R-1/ sind.

Durchführung

Seitens der ProTecBird GmbH wurden die folgenden Dokumente vorgelegt:

- Bericht zur digitalen Validierung für den Weißstorch /N-1/.

Bewertung TÜV NORD

Mit dem Validierungsbericht /N-1/ wurde ein Dokument vorgelegt, das die Auswertungsmethodik und die Versuchsergebnisse beschreibt:

Erfassungsbereich: Untersucht wurden gemäß /N-1/ zwei ringförmige Bereiche mit 300 bis 1.000 m Distanz zum AKS sowie 300 bis 700 m Distanz zum AKS. Die Bereiche wurden so gewählt, um ein möglichst großes Spektrum an zukünftigen/realen Reaktionsbereichen im Kontext von Genehmigungsverfahren abdecken zu können /N-1/.

Erfassungsrate: Zur Modellierung der artspezifischen Erfassungsrate wurden gemäß Validierungsbericht /N-1/ mit modernen statistischen Selektionsmethoden diejenigen Variablen (Prädiktoren) ausgewählt, die einen messbaren Einfluss auf die Erfassungsrate zeigen. Basierend auf diesen selektierten Variablen (und der örtlichen Ausdehnung des Erfassungsbereichs) wurde ein Generalised Linear Mixed Model (GLMM) zur Ermittlung der Erfassungsrate an die Daten angepasst. Auf Basis der Ergebnisse wurde gemäß Validierungsbericht /N-1/ abgeleitet, dass die Erfassungsrate hauptsächlich von der Flügelspannweite abhängt /N-1/. Die Ergebnisse wurden anhand der aus der Systemprüfung für den Rotmilan bekannten Ergebnisse zur Erfassungsrate /N-2/ validiert. Für einen Erfassungsbereich von 400 bis 600 m wurde eine Erfassungsrate nebst 95%- Konfidenzintervalle von 94% [91% - 95%] prognostiziert. Die prognostizierten Mittelwerte und Konfidenzintervalle lagen gemäß /N-1/ dicht an den im Rahmen der Systemprüfung /N-2/ ermittelten Werten – dort reichten die Werte je nach genauem Zuschnitt des Erfassungsbereichs von 95% [92% - 96%] bis hin zu 97% [94% - 99%]. Für den Weißstorch wurde eine Erfassungsrate von 92% [89% - 95%] für den Bereich von 300 bis 1.000 m prognostiziert und 95% [93% - 97%] für den Bereich von 300 bis 700 m /N-1/.

Erkennungsrate: Zur Ermittlung der Erkennungsrate wurde gemäß /N-1/ die Methode nach Reichenbach /N-7/ verwendet, die auf Bootstrapping-Methoden beruht. Insbesondere wurde 1000-fach wiederholt (A) eine Anzahl an Track-IDs (die der Anzahl der Original-Track-IDs entspricht) über „Ziehen mit Zurücklegen“ selektiert, (B) für jeden dieser Tracks die mittlere Erkennungsrate (Klassifikationsrate) bestimmt, und (C) über diese Werte wiederum das arithmetische Mittel gebildet. Anschließend wurde aus der Verteilung dieser 1.000 resultierenden trackübergreifenden Mittelwerte das 2,5% sowie das 97,5%-Perzentil berechnet, welche dem 95%-Konfidenzintervall der Erkennungsrate entsprechen. Für den Weißstorch wurde die Erkennungsrate nebst 95%- Konfidenzintervalle für den Bereich bis 1000 m zu 91% [86% - 94%] ermittelt /N-1/.

Gesamtrate: Die Kombination von Erfassungsrate und bedingter Erkennungsrate zur Gesamtrate erfolgte gemäß Validierungsbericht /N-1/ mittels korrelationskorrigierter Delta-Methode (k-Delta-Methode). Dieses Verfahren benötigt als Eingangsparameter die Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle der Einzelraten sowie Parameter zur Streuung und Kopplung der beiden Raten (empirisch geschätzte Flugmittel-Korrelation).

Das Verfahren erfolgte gemäß /N-1/ in vier Schritten:

1. Transformation der Einzelraten auf die Logit-Skala, in welcher die Einzelraten näherungsweise normalverteilt sind.
2. Aufbau einer bivariaten Normalverteilung mit empirischer Korrelation. Die Logit-transformierten Schätzer wurden als gemeinsame bivariate Normalverteilung modelliert. Die Varianzen stammen aus den Einzelraten. Die Kovarianzen ergaben sich aus der empirisch gemessenen Korrelation der Flugmittelwerte von Erfassung und Erkennung. Diese Flugmittel-Korrelation betrug beim Rotmilan 0,671 und beim Schreiadler 0,658. Die Ergebnisse deuten gemäß /N-1/ auf eine systemische, nicht art- oder ortsspezifische Kopplung hin [RA-2].
3. Ziehen korrelierter Logit-Werte (Monte-Carlo-Simulation): Aus der bivariaten Normalverteilung wurden 20.000 Paare korrelierter Logit-Werte gezogen. Diese wurden mittels Inverse-Logit in Wahrscheinlichkeiten $p_D(i)$ und $p_C(i)$ zurücktransformiert.
4. Berechnung der Gesamtrate: Für jede Ziehung wurde die Gesamtrate $p_{Ges(i)} = p_D(i) * p_C(i)$ berechnet. Die resultierende Verteilung bildete die kombinierte Unsicherheit beider Teilprozesse ab. Daraus wurden der Median sowie das 95%-Konfidenzintervall bestimmt.

Zwecks Validierung des Vorgehens (Kombination von Erfassungsrate und bedingter Erkennungsrate zur Gesamtrate) wurde gemäß /N-1/ für den Rotmilan mittels k-Delta-Methode eine Gesamtrate nebst 95%- Konfidenzintervalle von 85,8% [78,0% - 91,2%] ermittelt. Verglichen mit den Ergebnissen aus der Systemprüfung /N-2/, /E-2/ zeigte sich, dass die Ergebnisse dicht beieinander liegen (86,0% [76,5% - 91,5%]) /N-1/.

Für den Weißstorch wurde gemäß /N-1/ die ermittelte Gesamtrate nebst 95%- Konfidenzintervalle unter Anwendung der k-Delta-Methode zu 80% [72% - 86%] für den Bereich von 300 bis 1.000 m und zu 83% [76% - 88%] für den Bereich von 300 bis 700 m ermittelt. Die untere Grenze des Konfidenzintervalls der Gesamtrate des Weißstorchs lag gemäß /N-1/ sowohl für den Erfassungsbereich von 300 bis 1.000 m als auch für den Erfassungsbereich von 300 bis 800 m bei über 70 %.

Abschließend wurde in /N-1/ darauf hingewiesen, dass es verschiedenste Anhaltspunkte dafür gäbe, dass sowohl die Schätzung beider Einzelraten als auch die k-Delta-Methode zur Berechnung der Gesamtrate Unterschätzungen der Raten und/oder Überschätzungen der Konfidenzintervalle liefere, so dass in Summe von einer naturschutzfachlich vorsorglichen Vorgehensweise ausgegangen werden könne. Diese Tendenzen wurden im Rahmen der zur Methodik durchgeführten Validierung über die Daten des Rotmilans und des Schreiadlers beobachtet.

Fazit: Unter Berücksichtigung des durch TÜV NORD geprüften Validierungsberichts /N-1/ kommen wir zu dem Ergebnis, dass die angewandten Methoden und die erzielten Versuchsergebnisse plausibel sind und die Anforderungen des Prüfrahmens SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.1.1 an die einzuhaltende Gesamtrate erfüllt werden.

Die gewählten Erfassungsbereiche mit 300 bis 1.000 m Distanz zum AKS sowie 300 bis 700 m Distanz zum AKS sehen wir für spätere Anwendungen im Hinblick auf zukünftige/reale Reaktionsbereiche als geeignet an.

Das für die artspezifische Erfassungsrate abgeleitete Ergebnis, dass die Erfassungsrate hauptsächlich von der Flügelspannweite abhängt, können wir auf Basis unserer Erfahrungen als plausibel bestätigen. Das zur Ermittlung der Erfassungsrate genutzte „Generalized Linear Mixed Model (GLMM)“ entspricht den Ausführungen des Prüfrahmens SH:2024 /R-1/ zur Kombination von Logistischen Regressionsmethoden mit gemischten Modellen. Das Prognosemodell für die artspezifische Erfassungsrate mit dem Prädiktor „Flügelspannweite“ wurde anhand der aus der Systemprüfung für den Rotmilan bekannten Ergebnisse zur Erfassungsrate /N-2/, /E-2/ validiert. Die für den Weißstorch für einen Erfassungsbereich von 300 bis 1000 m ermittelten Ergebnisse der prognostizierten Erfassungsrate sind auf Basis unserer Erfahrungen plausibel.

Das zur Ermittlung der Erkennungsrate (Mittelwert und Konfidenzintervalle) genutzte Verfahren Bootstrapping sehen wir als geeignet an. Die Stichprobengröße von 78 Videotracks ist als bedingt ausreichend zu bewerten – die Methode Bootstrapping ist unter dieser Randbedingung anwendbar, jedoch mit erhöhter Unsicherheit. Dem ergänzenden Bericht zur Datengrundlage /N-3/ ist zu entnehmen, dass die selektierten Videodaten für den Weißstorch daraufhin geprüft wurden, ob die folgenden Einflussfaktoren in ausreichender Heterogenität enthalten sind: Wetterbedingungen und andere äußere Bedingungen. Bezüglich der Einflussfaktoren „allgemeine Strahlungsintensität“ (Helligkeit, Dämmerung, Dunkelheit) und „Landschaftselemente/Veränderungen der Vegetation“ wurde in /N-3/ ausgeführt, dass aufgrund der verschiedenen Tageszeiten, Erfassungsorte sowie Jahreszeiten bzw. Datumsangaben der verwendeten Videos von einer ausreichenden Heterogenität dieser Faktoren im Datensatz auszugehen ist. Durch das im Validierungsbericht /N-1/ gewählte Vorgehen zur Gewährleistung relevanter Einflussfaktoren des Live-Betriebs (z. B. Lichtverhältnisse, Bildgröße, Auflösung, Flugverhalten) und der ergänzenden Aussagen in /N-3/ sehen wir die Stichprobe als weitgehend repräsentativ an [RA-3], [RA-4], sodass die Ergebnisse methodisch vertretbar sind. Die für den Weißstorch für einen Erfassungsbereich bis 1000 m ermittelten Ergebnisse der Erkennungsrate sind auf Basis unserer Erfahrungen plausibel.

Das zur Ermittlung der Gesamtrate (Mittelwert und Konfidenzintervalle) eingesetzte Verfahren der „k-Delta-Methode“ zur rechnerischen Kopplung von Erfassungsrate und bedingter Erkennungsrate sehen wir als geeignet an. Die Methode berücksichtigt sowohl die nichtlineare Verknüpfung und Abhängigkeit beider Raten als auch die Variation relevanter Einflussfaktoren (z. B. Sichtverhältnisse, Distanzen, Messunsicherheiten und Modellspezifika). Die für die k-Delta-Methode erforderlichen Parameter zur Streuung und Kopplung der Erfassungsrate und der bedingten Erkennungsrate wurden anhand der Daten des Rotmilans geschätzt und am Beispiel des Schreiadlers validiert. Das Gesamtverfahren (Anwendung der k-Delta-Methode) wurde auf Grundlage der Ergebnisse der Systemprüfung für den Rotmilan /N-2/, /E-2/ validiert. Die für den Weißstorch für Erfassungsbereiche von 300 bis 1.000 m Distanz zum AKS sowie 300 bis 700 m Distanz zum AKS ermittelten Ergebnisse der Gesamtrate sind auf Basis des Vorgehens plausibel. Zudem weisen die beobachteten Ergebnisse darauf hin, dass die Ergebnisse tendenziell konservativ sind (Unterschätzung der Gesamtrate).

Prüfanmerkung

- [RA-2] Im Rahmen der Erhebung von LRF- und AKS-Daten empfehlen wir zur Verbesserung und Weiterentwicklung der Datenbasis, die Parameter zur Streuung und zur Kopplung der beiden Raten (Flugmittel-Korrelation) systematisch zu ermitteln und zu dokumentieren.

Hinweis: Diese Prüfanmerkung ist formeller Natur und hat im vorliegenden Fall keinen erkennbaren direkten Einfluss auf die grundsätzliche Wirksamkeit des AKS sowie die Einhaltung des erforderlichen Schutzniveaus (siehe Bewertung TÜV NORD).

- [RA-3] Zur Verbesserung und Weiterentwicklung des Vorgehens sind unter Berücksichtigung der Ergebnisse der naturschutzfachlichen Einflussanalyse konkrete Anforderungen an einen repräsentativen Datensatz (zusammengestellte AKS-Daten zur digitalen Validierung) zu definieren.

Hinweis: Diese Prüfanmerkung ist formeller Natur und hat im vorliegenden Fall keinen erkennbaren direkten Einfluss auf die grundsätzliche Wirksamkeit des AKS sowie die Einhaltung des erforderlichen Schutzniveaus (siehe Bewertung TÜV NORD). Die Abweichung ist im weiteren Betrieb zeitnah zu adressieren und zu beheben.

- [RA-4] Der zusammengestellte Datensatz zur digitalen Validierung sollte zum Zwecke einer repräsentativen Auswertung im Rahmen des naturschutzfachlichen Validierungsberichts bewertet werden (anhand von zuvor erarbeiteten Anforderungen).

Hinweis: Diese Prüfanmerkung ist formeller Natur und hat im vorliegenden Fall keinen erkennbaren direkten Einfluss auf die grundsätzliche Wirksamkeit des AKS sowie die Einhaltung des erforderlichen Schutzniveaus (siehe Bewertung TÜV NORD). Die Abweichung ist im weiteren Betrieb zeitnah zu adressieren und zu beheben.

4.3 Abschließende Bewertung

Nach Prüfung des Konzepts der Ergänzungsprüfung (siehe Kapitel 4.1) kommen wir zu dem Ergebnis, dass im Kontext der vorliegenden digitalen Validierung für den Weißstorch folgende naturschutzfachlichen Nachweise gemäß Prüfrahen SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.4.1 neu zu erbringen waren:

- Versuchsplanung und -durchführung,
- unabhängige Datenerhebung und -auswertung sowie
- Auswertungsmethodik und Versuchsergebnisse.

Mit dem Validierungsbericht /N-1/ und dem ergänzenden Bericht zur Datengrundlage /N-3/ wurden Dokumente vorgelegt, welche von TÜV NORD im Kapitel 4.2 bewertet wurden.

Das Vorgehen zur digitalen Validierung wurde entsprechend der Vorgaben des Prüfrahmens SH:2024 /R-1/ geplant, die Methodik der digitalen Validierung vorgestellt und anhand weiterer Vogelarten validiert. Dabei wurde überwiegend auf die bekannten Ergebnisse der Systemprüfung für den Rotmilan /N-2/ zurückgegriffen, welche mit dem TÜV NORD Prüfbericht /E-2/ bestätigt wurden. Die im Rahmen der digitalen Validierung für den Weißstorch nachgewiesene Gesamtrate gilt für Erfassungsbereiche von 300 bis 1000 m unter der Voraussetzung, dass die für den Weißstorch angepasste KI in einem validierten AVES-AKS eingesetzt wird (siehe dazu das im Rahmen der Systemprüfung /E-2/ für den Rotmilan von TÜV NORD geprüfte AVES-AKS).

Im Rahmen der Prüfung wurden die Prüfanmerkungen [RA-1] bis [RA-4] identifiziert. Die damit verbundenen Auffälligkeiten und Abweichungen stellen keine unmittelbare Gefahr für den Schutz der kollisionsgefährdeten Vogelart „Weißstorch“ dar und führen zu keiner wesentlichen Beeinträchtigung der Vorgehensweise und der Ergebnisse der digitalen Validierung für den Weißstorch. Die geforderte grundsätzliche Wirksamkeit (Prüfrahen SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.1) des AKS und die Einhaltung des erforderlichen Schutzniveaus (Prüfrahen SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.4.1) werden auf Grundlage der vorgelegten Nachweise zur digitalen Validierung für den Weißstorch bestätigt. Die identifizierten Prüfanmerkungen sind im weiteren Betrieb zeitnah zu adressieren und zu beheben.

5 Prüfanmerkungen

Die folgende Liste stellt eine Zusammenfassung der in diesem Prüfbericht identifizierten Auffälligkeiten und Abweichungen gemäß Prüfrahen SH:2024 /R-1/ dar. Zudem wird jede identifizierte Auffälligkeit und Abweichung, wie im Folgenden beschrieben, klassifiziert.

Offener Punkt: Ein offener Punkt beschreibt ein Defizit in der Dokumentation mit potenzieller Bedeutung für den Schutz von kollisionsgefährdeten Vogelarten. Ohne erfolgte Prüfung der fehlenden Dokumentation kann keine Prüfaussage zur grundsätzlichen Wirksamkeit des AKS und zur Einhaltung des erforderlichen Schutzniveaus getätigt werden.

Kritische Abweichung: Diese Kategorie umfasst Abweichungen, die eine direkte und ernsthafte Gefahr für den Schutz von kollisionsgefährdeten Vogelarten darstellen oder die die Funktionalität des AKS so beeinträchtigen, dass es nicht mehr seinen grundlegenden oder gesetzlich vorgeschriebenen Zweck erfüllen kann. Ohne Beseitigung dieser Abweichungen können die grundsätzliche Wirksamkeit des AKS und die Einhaltung des erforderlichen Schutzniveaus nicht bestätigt werden.

Relevante Abweichung: Diese Kategorie umfasst Abweichungen, die die Qualität der Nachweisführung betreffen, ohne dass Hinweise auf eine Unterschreitung des erforderlichen Schutzniveaus vorliegen. Die grundsätzliche Wirksamkeit des AKS und die Einhaltung des erforderlichen Schutzniveaus können bestätigt werden. Die Abweichungen sind im weiteren Betrieb zeitnah zu adressieren und zu beheben.

Geringfügige Abweichung: Diese Kategorie beinhaltet Auffälligkeiten und Abweichungen, die eine untergeordnete Auswirkung auf die Qualität der Nachweisführung haben. Die grundsätzliche Wirksamkeit des AKS und die Einhaltung des erforderlichen Schutzniveaus können bestätigt werden.

5.1 Liste der offenen Punkte

keine

5.2 Liste der kritischen Abweichungen

keine

5.3 Liste der relevanten Abweichungen

- [RA-1] Zur Verbesserung und Weiterentwicklung der Prozesse ist im Managementsystem der Pro-TecBird GmbH verbindlich zu regeln, wie mit Modifikationen/Änderungen gemäß Prüfrahen SH:2024 /R-1/ Kapitel 3.2.3 umzugehen ist (z. B. im Qualitätsmanagementhandbuch sowie im Hardware- und Software-Entwicklungsplan).
- [RA-2] Im Rahmen der Erhebung von LRF- und AKS-Daten empfehlen wir zur Verbesserung und Weiterentwicklung der Datenbasis, die Parameter zur Streuung und zur Kopplung der beiden Raten (Flugmittel-Korrelation) systematisch zu ermitteln und zu dokumentieren.
- [RA-3] Zur Verbesserung und Weiterentwicklung des Vorgehens sind unter Berücksichtigung der Ergebnisse der naturschutzfachlichen Einflussanalyse konkrete Anforderungen an einen repräsentativen Datensatz (zusammengestellte AKS-Daten zur digitalen Validierung) zu definieren.
- [RA-4] Der zusammengestellte Datensatz zur digitalen Validierung sollte zum Zwecke einer repräsentativen Auswertung im Rahmen des naturschutzfachlichen Validierungsberichts bewertet werden (anhand von zuvor erarbeiteten Anforderungen).

5.4 Liste der geringfügigen Abweichungen

keine

6 Formelzeichen und Abkürzungen

AKS	Antikollisionssystem
AVES	AVES WIND ONSHORE
GLMM	Generalised Linear Mixed Model
KI	Künstliche Intelligenz
LFU	Landesamts für Umwelt des Landes Schleswig-Holstein
LRF	Laser Range Finder
m	Meter
$p_{Ges} = p_D * p_C$	Die Gesamtrate p_{Ges} beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Vogel vom System sowohl erfasst (Detektion, p_D) als auch korrekt erkannt (Erkennung/Klassifikation, p_C) wird.
PTZ	Pan-Tilt-Zoom
SH	Schleswig-Holstein
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
WEA	Windenergieanlage

7 Rechtsbelehrung

Die vorliegende Prüfung ist nur in ihrer Gesamtheit gültig. Die darin getroffenen Aussagen beziehen sich ausschließlich auf die vorliegenden übermittelten Dokumente.

Die TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG leistet keine Gewähr für die Erfüllung von Vorhersagen. Die TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit der eingereichten Unterlagen und Angaben und für durch unrichtige Angaben bedingte falsche Aussagen oder abgeleitete Empfehlungen.

Die von TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG erbrachten Leistungen (z.B. Gutachten-, Prüf- und Beratungsleistungen) dürfen nur im Rahmen des vertraglich vereinbarten Zwecks verwendet werden. Vorbehaltlich abweichender Vereinbarungen im Einzelfall, räumt TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG der ProTecBird GmbH an seinen urheberrechtsfähigen Leistungen jeweils ein einfaches, nicht übertragbares sowie zeitlich und räumlich auf den Vertragszweck beschränktes Nutzungsrecht ein. Weitere Rechte werden ausdrücklich nicht eingeräumt, insbesondere ist die ProTecBird GmbH nicht berechtigt, die Leistungen des Auftragnehmers zu bearbeiten, zu verändern oder nur auszugsweise zu nutzen.

Eine Veröffentlichung der Leistungen über den Rahmen des vertraglich vereinbarten Zwecks hinaus, auch auszugsweise, bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung von TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG. Eine Bezugnahme auf TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG ist nur bei Verwendung der Leistung in Gänze und unverändert zulässig.

Bei einem Verstoß gegen die vorstehenden Bedingungen ist TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG jederzeit berechtigt, der ProTecBird GmbH die weitere Nutzung der Leistungen zu untersagen.

8 Literatur- und Quellenangaben

8.1 Allgemeine Unterlagen

- /U-1/ TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG. Angebot 2024-ERS-742a. Gutachtliche Stellungnahme zur Validierung. Schreiben vom 17.10.2024.
- /U-2/ TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG. Angebot 2025-ERS-866. Gutachtliche Stellungnahme zur Ergänzungsprüfung - digitale Validierung. Schreiben vom 20.11.2025.

8.2 Regelwerk

- /R-1/ Landesamt für Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (LfU). Fachkonventionsvorschlag „Prüfraumen für Antikollisionssysteme“ (Prüfraumen AKS). Stand: 01.07.2024.

8.3 Unterlagen zur Ergänzungsprüfung

- /E-1/ ProTecBird GmbH. Konzept zur digitalen Ergänzungsprüfung für den Weißstorch. Version 1.1 vom 05.02.2026.
- /E-2/ TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG. Abschließender Prüfbericht zur Validierung des AVES-AKS gemäß Prüfraumen für Antikollisionssysteme (Schleswig-Holstein). Revision 0 mit Stand vom 27.05.2026.
- /E-3/ Bioplan - Hammerich, Hinsch und Partner PartG. AVES WIND ONSHORE Antikollisionssystem zum Schutz des Rotmilans (*Milvus milvus*) - Nachweis der Wirksamkeit und Beschreibung der Datenerhebung. Version 1.0 vom 10.12.2025.
- /E-4/ ProTecBird GmbH. ANNEX I - Technical Description of the AI-based anti-collision system AVES Wind ACS. Project: Ignitis WF Kelme. Document Nr.: 24-005-KV-ANNEX-I. Husum, 30.10.2024.
- /E-5/ ProTecBird GmbH. ProTecBird - AVES Onshore - Software Design Description. PTB-500-0001_SDD. Version: 003 vom 30.01.2026.

8.4 Unterlagen zu naturschutzfachlichen Themen

- /N-1/ Bionum GmbH – Büro für Biostatistik. Statistische Begutachtung des Antikollisionssystems „AVES-Wind Onshore“ gemäß LfU-AKS Prüfraumen – Ein Methodenvorschlag zur digitalen Ergänzungsprüfung am Beispiel des Weißstorchs. Stand: 17.12.2025.
- /N-2/ Bionum GmbH – Büro für Biostatistik. Statistische Begutachtung des Antikollisionssystems „AVES-Wind Onshore“ vor dem Hintergrund des LfU-AKS Prüfraumens und in Anlehnung an die „KNE-Checkliste“. Stand: 14.02.2024.
- /N-3/ ProTecBird GmbH. Digitale Validierung Weißstorch – Datengrundlage. Version 1.1 vom 05.06.2026.
- /N-4/ ProTecBird GmbH. 26-001-INT-WStorch_Videos_Validation.xlsx. Zusammenstellung verwendeter Videos. Version 1.0 vom 04.06.2026.
- /N-5/ ProTecBird GmbH. Erklärung zur Datengrundlage für die digitale Validierung. Schreiben vom 01.06.2026.
- /N-6/ Bionum GmbH – Büro für Biostatistik. Erklärung zur Datenauswertung für die digitale Validierung. Schreiben vom 29.05.2026.
- /N-7/ ARSU in Kooperation mit OekoFor. Untersuchungskonzept für die „Ausweitung des Zielartenspektrums von Identi-Flight“ - Methodische Ansätze zur Validierung neuer Versionen des Neuronalen Netzes. Stand: 29.07.2024. Erstellt im Auftrag von e3 IDF GmbH.