

**A review of post-construction mitigation strategies to reduce impacts of wind energy on raptors, with particular attention to the golden eagle (*Aquila chrysaetos*)**

Prepared by:

**Julia Gómez-Catasús, Ph.D.**

**Fabio Balotari-Chiebao, Ph.D.**

Novia University of Applied Sciences, Raseborgsvägen 9, FI-10600 Ekenäs, Finland



Prepared for:



ETHA WIND

**September 2022**

## Table of Contents

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>3</b>
1.1	WIND ENERGY: BACKGROUND, EXPANSION, AND ECOLOGICAL CHALLENGES .....	3
1.2	WIND ENERGY IN FINLAND: CURRENT AND FUTURE DEVELOPMENT .....	4
1.3	WIND ENERGY AND RAPTORS: AN OVERVIEW .....	4
<b>2</b>	<b>OBJECTIVES</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>MATERIALS AND METHODS</b> .....	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>RESULTS AND DISCUSSION</b> .....	<b>6</b>
4.1	CURTAILMENT (TURBINE SHUTDOWN).....	8
4.1.1	<i>Field observers</i> .....	9
4.1.2	<i>Image- or acoustic-based systems</i> .....	9
4.1.3	<i>Radar-based systems</i> .....	11
4.1.4	<i>Biotelemetric-based systems</i> .....	12
4.2	DETERRENCE .....	12
4.2.1	<i>Acoustic, electromagnetic, and visual approaches</i> .....	12
4.3	ATTRACTION AVOIDANCE .....	13
4.3.1	<i>Increasing turbine visibility</i> .....	13
4.3.2	<i>Habitat intervention: on-site and off-site</i> .....	15
4.3.3	<i>Other habitat-related measures</i> .....	17
4.4	REPOWERING .....	17
4.5	OFF-SITE COMPENSATION .....	18
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>19</b>
5.1	WHAT ARE THE AVAILABLE MITIGATION SYSTEMS OR STRATEGIES TO ADDRESS BIRD COLLISION? HOW DO THEY WORK? .....	19
5.2	WHAT ARE THE LATEST TECHNOLOGIES?.....	20
5.3	WHAT IS THEIR EFFECTIVENESS? .....	20
5.4	CAN THEY FUNCTION PROPERLY UNDER FINLAND’S WEATHER CONDITIONS?.....	21
5.5	WHAT ARE THE BEST OPTIONS FOR PONTEMA WIND FARM?.....	21
<b>6</b>	<b>REFERENCES</b> .....	<b>22</b>

# 1 INTRODUCTION

## 1.1 Wind energy: background, expansion, and ecological challenges

Wind energy is regarded as the most promising renewable energy source to face the challenges of climate change, due to the global potential for wind-power generation <sup>1</sup>. This fact has boosted the innovation, development, and application of wind energy worldwide, raising also a series of ecological concerns <sup>2</sup>. A major challenge is that the pace of wind energy expansion is faster than the ability of conservation scientists to verify its environmental and wildlife impacts, and implement efficient measures to mitigate such impacts <sup>3,4</sup>. Thus, there is great uncertainty as to the true impacts of wind energy, and this in turn poses a challenge to policy-, decision-makers, and planners. Under this scenario, researchers highlight the importance of implementing rigorous comprehensive planning and independent environmental assessments <sup>4,5</sup>. Moreover, additional regulation and management standards (with e.g., rigorous collection and reporting of post-construction fatality data) are needed to reconcile operational wind farms with the protection of the environment, biodiversity, and ecosystem services <sup>6</sup>.

Birds colliding with wind turbines are generally perceived as one of the major conflict issues for wind-energy development. Since the installation of wind farms began and the first accidents were detected, numerous researchers, consultants and managers have worked on the prevention and correction of impacts caused by these installations. With the experience accumulated over the years, a hierarchical process has been established for supporting decision-makers. This process consists of three sequential steps: 1) avoid, 2) minimise, and 3) compensate <sup>7</sup>. Thus, minimisation or corrective measures to minimise collisions should not be established without first assessing the prevention of damage through a comprehensive planning and environmental assessment process for different alternatives to the location of a wind farm, including the no-build alternative. Once wind farms are built, the options to minimise predicted impacts need to be adjusted to species needs at a specific site <sup>7</sup>. If impacts are predicted to be manageable, it is necessary to identify what minimisation measures (e.g., automated devices or habitat management) could be used to reduce impacts to acceptable levels. Minimisation measures usually target specific species, thus ideally different options should be considered. It should be noted that impacts are to be expected in any wind energy project, and that in many installations the impacts that persist after the implementation of minimisation measures (referred to as residual impacts) must be addressed in the form of compensation, which is the last stage of the mitigation hierarchy. Importantly, compensatory measures to counter wind-energy fatalities are challenging and remain to be tested for effectiveness. In sum, there is currently a great deal of uncertainty associated with mitigation measures, so it is essential to invest in understanding their effectiveness in different environmental contexts, in different species, and how a combination of measures could best contribute to reducing impacts. Uncertainty as to the true impacts of wind energy will likely remain, but adaptive management (with the implementation of effective corrective measures at existing and new installations) needs to be fully supported for bird conservation, especially with a view towards cumulative impacts rather than impacts from individual facilities <sup>8</sup>.

## 1.2 Wind energy in Finland: current and future development

Wind energy is an integral part of Finland's National Energy and Climate Strategy <sup>9</sup>, with a potential to facilitate an energy system transition in the face of climate change. In line with the European Union's climate and energy targets, Finland plans to extensively exploit its wind resources to bring the share of renewables to 51% of total energy consumption by 2030 <sup>9</sup>. In the end of 2022, Finland had a total of 1112 turbines with a cumulative capacity of 4037 MW <sup>10</sup>. As of March 2022, there were 741 wind turbines under construction and 5527 wind turbines in preceding development phases (from Identified project/pre-screening to Fully permitted) totalling 44466 MW of additional capacity <sup>11</sup>. As wind energy expands, careful spatial planning will be required to avoid conflicts with birdlife.

## 1.3 Wind energy and raptors: an overview

Raptors have been the focus of wind energy research in many countries, because they are both often threatened <sup>12</sup> and among the most vulnerable bird groups to turbine collision <sup>13</sup>. Notable examples of high mortality rate at wind facilities include the golden eagle (*Aquila chrysaetos*) in the United States <sup>14</sup>, the griffon vulture (*Gyps fulvus*) in southern Spain <sup>15</sup>, and the white-tailed eagle (*Haliaeetus albicilla*) in Norway <sup>16,17</sup>. Particularly worrying is the fact that many raptor species, such as the ones mentioned above, are slow-maturing, have long generation times and low reproductive output, thus mortality from turbine collision (combined with other anthropogenic pressures) may prove harmful to population persistence <sup>18,19</sup>.

Regarding the golden eagle, which is treated in more detail in this review, there are serious concerns for the potential impacts of existing and future wind farms. In addition to collision (which is of primary concern), golden eagles are often displaced by turbines, altering both their flight height behaviour (flying higher above turbines; <sup>20,21</sup> and habitat use behaviour <sup>22,23</sup>. By changing their habitat use behaviour, golden eagles thus effectively lose e.g., foraging habitats within the wind farm area, in some cases with no signs of habituation even after years of turbine installation <sup>22</sup>. Detrimental effects of wind energy can pose permission-related challenges to wind energy companies, potentially preventing such development in areas where golden eagle home ranges overlap with areas favourable for wind energy. The golden eagle is currently classified as a vulnerable (VU) species in the Finnish Red List <sup>24</sup>, and is listed in Annex I of the European Union's (EU) Birds Directive <sup>25</sup>, being thus protected under Finnish and EU law.

Despite the risks faced by raptors, wind farms are often operated without proper considerations of their potential impacts and mitigation options. A recent review (of 321 wind farms from 12 countries) highlighted that rigorous data collection on wind energy impacts on raptors is rare, and that actions to mitigate negative effects are rarely implemented <sup>26</sup>. Thus, effective guidance for wind farm siting, operation, and impact mitigation is a conservation priority.

## 2 OBJECTIVES

In this review, we focus on post-construction mitigation measures, primarily on minimisation or correction measures, also touching upon compensatory measures and associated examples. We review the existing literature on the topic, providing insights into the range of current mitigation options and their known effectiveness and limitations. We focus on measures that address impacts specifically on raptors (which are often among the most concerned species in wind energy planning), with particular attention to collision risk and the golden eagle. Pre-construction mitigation measures (e.g., large-scale wind-farm siting) are not included here. In addition, our review sought to answer or provide directions to the questions that were posed to us: (a) What are the available mitigation systems or strategies to address bird collision? (b) What are the latest technologies? (c) How do they work? (d) What is their effectiveness? (e) Can they function properly under Finland's weather conditions? (f) What are the best options for Pontema wind farm?

## 3 MATERIALS AND METHODS

The overview of possible post-construction mitigation measures is based on existing reviews on the topic <sup>7,27-33</sup>, keyword searches in ISI Web of Science, Google Scholar and Internet sites, and by contacting experts internationally (researchers, and representatives from industry and government agencies) directly. This broad approach was deemed appropriate to retrieve as much information as possible both from scientific (peer-reviewed journals, books) and grey literature (reports, articles, websites). We also checked the website Conservation Evidence (<https://www.conservationevidence.com/>) which review and summarize evidence from the scientific literature about the effects of conservation actions. **Table 1** summarizes the number of studies employed in this review for each post-construction or operational mitigation measure.

**Table 1.** Research studies found in this review per operational mitigation measure. For each measure, the number of studies, the countries where the studies were carried out and the references are indicated. General reviews on post-construction mitigation measures are not included here.

	<b>Number of studies</b>	<b>Countries</b>	<b>References</b>
<b>Curtailement: turbine shutdown</b>			
<i>Field-observers</i>	2	Australia, Norway, Portugal, Spain, Switzerland	15,37,41,42
<i>Image-based systems</i>	7	Norway, United States	39–41,43–46
<i>Radar-based systems</i>	13	Belgium, France, Israel, Spain, Switzerland, The Netherlands, Norway, United States	38–41,47–55
<i>Biotelemetry systems</i>	1	United States	56
<b>Deterrence</b>			
<i>Acoustic, electromagnetic, and visual approaches</i>	15	Denmark, Germany, Iceland, Spain, United Kingdom, United States, Norway	28,32,57–69
<b>Attraction avoidance</b>			
<i>Increasing turbine visibility</i>	4	Canada, Norway, United States	70–73
<i>Habitat intervention</i>	6	Spain, Germany, Scotland, Portugal	23,76,77,79–81
<i>Other habitat-related measures</i>	4	Spain, Sweden	82,83,85,86
<b>Repowering</b>			
<i>Repowering</i>	7	France, Germany, Sweden, The Netherlands, Switzerland, United Kingdom, United States	69,87–92
<b>Off-site compensation</b>			
<i>Off-site compensation</i>	4	United States, Norway	87,93–95

## 4 RESULTS AND DISCUSSION

Several mitigation measures have been proposed to minimize the collision impacts associated with wind farm infrastructures. These measures include: 1) turbine shutdown when there is a high risk of bird collision; 2) the deterrence of birds away the wind farm area in order to minimize the collision risk; 3) the avoidance of attraction to the turbine area by increasing the visibility of the blades, and the attraction of individuals to other areas through habitat interventions aiming to increase habitat attractiveness; 4) wind turbine repowering by replacing a number of old turbines by a lower number of taller and more efficient and powerful models; and 5) off-site compensation to achieve no-net loss for wildlife populations. These measures are site- and species-specific and therefore, their implementation should be based on the knowledge available for the target species and the specific characteristics of the area. They have been applied in different countries in Europe (Belgium, France, Germany, Norway Sweden,

among others), Oceania (Australia) and America (United States), but their effectiveness has been barely assessed. There is international consensus that one of the biggest challenges in the expansion of wind energy is to design adequate methodological protocols to be used during post-construction monitoring (which could be aided by automated blade collision detection systems <sup>34</sup>) that allow to evaluate the effectiveness of the mitigation measures implemented. This would allow to combat the current lack of knowledge on this matter and support the decisions to be taken in future wind energy projects.

Regarding golden eagles, perhaps the most detailed guidelines for mitigation strategies of wind energy are provided by the US Fish and Wildlife Service. This paragraph is thus based on documentation that thoroughly presents and discusses the options to mitigate the so-called “take” of golden eagles at wind farms in the United States, which provide useful insights and offer implementation possibilities for Finland and other countries. In the United States, the golden eagle is a legally protected species, hence the take of this species (a term that includes to “pursue, shoot, shoot at, poison, wound, kill, capture, trap, collect, molest, or disturb”) is prohibited <sup>35</sup>. However, under certain circumstances, there are permit regulations that can authorise an incidental (non-purposeful) take. To issue such permits specifically for onshore wind energy, the USFWS developed the Eagle Conservation Plan (ECP) Guidance <sup>36</sup>. This is a detailed framework for assessing and mitigating risk to eagles at wind facilities, and should be referred to by wind energy developers when eagles in a potentially dangerous situation are identified at a project site. The framework is based on the same three-step mitigation hierarchy discussed above, but it provides options and details that are specific to the golden eagle. **Table 2** has been adapted from Allison et al. 2017, who reviewed the possible options associated with each step of the mitigation hierarchy. The use of minimisation and compensatory measures, which are being implemented at wind farms, is faced with many challenges. For example, the number of predicted or reported fatalities at individual facilities is typically low (reflecting also the uncommonness of the species), which makes it difficult to assess the effectiveness of mitigation actions. Allison et al. (2017) concluded that there is a general lack of data to support the effectiveness of those measures, meaning that their actual effectiveness and thus reliability remain unknown. This challenge could be overcome with a combination of research efforts and coordinated action among multiple wind energy projects, for the benefit of golden eagles and also similar species. There are, indeed, more recent studies (see sections below) that report on promising strategies to mitigate impacts.

**Table 2.** The table below displays several mitigation options that have been officially recommended to avoid, minimize, or compensate for wind-energy impacts on the golden eagle in the United States.

Step 1: avoid 2: minimise 3: compensate	Option	Description
1	Macro-siting	Avoid high-use areas by birds.
1	Turbine number reduction	Reduce number of turbines in a project.
2	Attractant removal	Reduce perching sites, prey availability to try to lower eagle activity within project area. Enhance prey availability outside project area (sufficiently far).
2	Flight diverters	Install flight diverters on e.g., guy wires.
2	Nest management	Inhibit future nest building by modifying suitable nest sites (e.g., removing trees).
2	Curtailement	Stop turbine operation at times of increased collision risk.
2	Turbine setbacks (relocation)	Relocate turbines associated with high eagle activity. This may be done during repowering, when older turbines are replaced by modern turbines.
2	Deterrence	Use deterrent systems, including automated systems, to detect and deter eagles from turbine vicinity.
3	Power line retrofitting	Retrofit power lines to prevent electrocution.
3	Roadkill removal	Remove roadkill to reduce vehicle strikes.
3	Prey habitat enhancement	Manage prey populations to increase eagle productivity.

In the sections below, we describe in detail the post-construction mitigation measures that have been applied to raptors (including the golden eagle), classified here into five major approaches for illustrative purposes: 1) curtailment (turbine shutdown); 2) deterrence; 3) attraction avoidance; 4) repowering; and 5) off-site compensation.

#### 4.1 Curtailment (turbine shutdown)

The most applied and tested measure is the shutdown of turbines during periods with increased collision risk (so-called “shutdown-on-demand”). These time periods can be defined according to different criteria: seasonality (e.g., during mass migration; Liechti et al., 2013), weather conditions (e.g., fog, wind, or rain; Aschwanden et al., 2018; Hayes et al., 2019) or species occurrence and behaviour (certain species are most prone to collisions e.g., raptors)<sup>29</sup>. In particular, the detection of birds can be either carried out with field observers, with automated sensors, such as cameras or microphones (image- or acoustic-based) or radar (radar-based systems), or by the employment of avian GPS-tags (biotelemetric-based systems). Below, we present the most common systems that have been used and tested for monitoring bird activity close to turbines and for automatic turbine shutdown. For each system, we compile the scientific



evidence on their effectiveness (when they existed), and we confront their advantages and limitations which have been compiled from Collier et al. (2011)<sup>40</sup> and BirdLife International<sup>41</sup>.

#### 4.1.1 Field observers

Human observers have been employed to define turbine shutdown periods, who communicate with the wind farm control office to switch off the turbines involved in the risk. This measure has been used in different countries such as Australia, Norway, Portugal, Spain and Switzerland<sup>37,41,42</sup>. In particular, it has been tested to be useful in Cádiz (Spain) by reducing Griffon vulture mortality rate by 50% with a consequent reduction in total energy production by only 0.07% per year<sup>15</sup>. The main limitations of the approaches relying on field observers is that they are labour intensive, they are limited to periods of good visibility (i.e., daylight and good weather conditions), and they require expertise from the observers which might not be always available. As a consequence, human observers have been recently replaced by automatic systems which monitor the environment around the wind farm using radars (radar-based systems), or video cameras and microphones (image- or acoustic-based), so that they stop the turbine in real time when they detect a dangerous situation.

#### 4.1.2 Image- or acoustic-based systems

**IdentiFlight** ([www.identiflight.com](http://www.identiflight.com)) is an image-based monitoring system, which is also an automated curtailment system—a camera system that detects flying objects, classifies them, and decides whether to curtail individual turbines to avoid potential collision. Studying golden eagles, McClure et al. (2021) observed that the number of collision fatalities decreased by 82% (75%-89%) in the sites with automated curtailment as compared to the control site (without automated curtailment). Although automated curtailment reduced fatalities in this study, they were not fully eliminated. This might be because the IdentiFlight system fails to accurately identify bird species since, for instance, it has been tested to misclassifies eagles as non-eagles (false negative rate of 6%) and non-eagles as eagles (false positive rate of 28%; McClure et al., 2018).

Another image-based system is **DTBird** ([www.dtbird.com](http://www.dtbird.com)), developed to detect flying birds and to take programmed actions to reduce avian collisions. The system includes four modules, each of which has a specific function: 1) Detection and warning (continuously monitors the surveillance area and detects flying birds in real time); 2) Dissuasion (emits warning or dissuasion signals as long as birds are detected flying in moderate or high collision risk areas around the wind turbine); 3) Turbine stop control (sends a stop signal to the wind turbine when birds of medium to big size, including most raptor species, are detected flying to collision risk areas); 4) Collision control (records potential collisions with wind turbine of medium to large birds, including most raptor species).

May et al. (2012) evaluated how well the DTBird system is able to detect birds in the vicinity of a wind turbine and assessed to which extent it can be utilized to study near-turbine bird flight behaviour and possible deterrence<sup>45</sup>. The evaluation was based on the video

sequences recorded with the DTBird systems installed at 2 turbines at the Smøla wind farm (Norway), together with GPS telemetry data on white-tailed eagles and avian radar data. The average false positive rate was 1.2 per day, and during daytime the DTBird system recorded between 76% and 96% of all bird flights in the vicinity of the turbines. Visually estimated distances of recorded bird flights in the video sequences were in general assessed to be farther from the turbines compared to the distance settings used within the software configuration to define the moderate (warning) and high (dissuasion) collision risk area. This led to a high rate of triggered warning/dissuasion signals which could lead to the habituation of individuals if it occurs frequently on non-risk occasions.

**IdentiFlight** and **DTBird** are two of the most employed and tested image-based systems, which advantages and limitations are compiled in **Table 3**. There are other image-based systems that have been, or are currently, under development, including: 1) **Thermal Animal Detection System** (TADS) which is an infrared (thermal) imaging system; 2) **Visual Automated Recording System** (VARS) which uses motion detection infrared (active infrared) video cameras together with infrared lamps; and 3) **Acoustic/Thermographic Offshore Monitoring System** (ATOM) which comprises infrared video cameras and microphones that record both audible and ultrasonic sound, which has been applied for bats <sup>39-41,46</sup>. The advantage of the infrared imaging systems is that they enable detection during darkness and periods of poor visibility. However, they have high false-positive detection rate (up to 97% <sup>40</sup>), they have a limited field of view, and they require human interpretation which may be time consuming if the number of events is high. Moreover, the main limitation of all the above-mentioned systems is that their effectiveness has rarely been evaluated, they are in very early stages of development, and they lack specific shutdown modules.

**Table 3.** Advantages and limitations of image- and radar-based systems.

	<b>Advantages</b>	<b>Limitations</b>
<b>Image-based</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Can be used in areas with restrictions on the use of radar</li> <li>• May provide information on both micro-avoidance and collisions.</li> <li>• Resolution of visual light cameras likely to provide good images for use in species recognition.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficulty to detect low-flying, small and fast flying birds and with a range of backgrounds uncertain.</li> <li>• Detection events require human interpretation to conclude whether collision occurred. Depending on the number of detections, this may be time costly.</li> <li>• Only suitable for daytime use</li> <li>• Limited field of view and distance. Multiple systems might be needed for multiple turbines to prevent large-scale unnecessary shutdowns</li> <li>• Costs required for maintenance and servicing such as for cleaning cameras in harsh environments</li> </ul>
<b>Radar-based</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Can provide information on micro-avoidance both during day and night</li> <li>• Coverage of multiple turbines</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No information on species or absolute numbers</li> <li>• Requires time for initial setup and fine-tuning of radar and settings</li> </ul>
<b>Image- and radar-based</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operates continuously</li> <li>• Fully automated shutdown</li> <li>• Can be accessed remotely</li> <li>• Images can be saved for validation or reference and can feed back into analytical algorithms and shutdown criteria</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Initial costs for system and installation</li> <li>• May be desirable to run parallel validation with independent observers</li> <li>• Detection might be limited during periods of poor visibility (i.e., rain or fog)</li> </ul>

#### 4.1.3 Radar-based systems

The **Merlin Avian Radar system** ([www.detect-inc.com](http://www.detect-inc.com)) has been developed by DeTect, Inc. and it uses advanced avian radar technology to detect and track birds and bats in real time using simultaneous vertical and horizontal scanning radars. This radar system can be programmed with a rule set based on high strike risk conditions specific to a wind farm. When this rule set is satisfied during operation, MERLIN software uses the industry standard Modbus communication protocol to communicate with the wind farm SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) system to initiate a variety of response actions, ranging from alerting wind farm operators to direct instruction of a turbine or groups of turbines <sup>47</sup>.

May et al. (2017) evaluated the detection capabilities of the Merlin Avian Radar<sup>48</sup>. They concluded a 0.5 detection probability within a range of 2,340 m from the radar. However, they observed that this detection range varied as a function of atmospheric conditions, the environment (e.g., topography), the spatial distribution of birds, and bird size, since small birds may be detected up to 0.5 – 1 km, whereas large species may be detected up to 1.5 – 2 km from the radar. Similar thresholds have been given in other studies addressing the detection probability of this and other radar-based systems. For instance, Gerringer et al. (2016) observed that most of the raptors observed within 3-4 km of the radar were detected by the **Merlin avian radar**, but they were tracked during less than 30% of the time observed<sup>49</sup>. Similarly, Beason et al. (2010) observed that the **Accipiter® eBirdRad** ([www.accipiterradar.com](http://www.accipiterradar.com)) had a 0.5 detection probability within 5.5 km<sup>50</sup>, but observed that only 15% (142 out of 972) of the sightings of individual birds or flocks of birds were tracked by radars and all were located at less than 4.8 km<sup>51</sup>. Lastly, the **Robin 3D Flex Bird Radar** had a 0.5 detection probability within 1.5 km<sup>52</sup>. Other radar-based systems are **STRIX Birdtrack®** ([www.strixinternational.com](http://www.strixinternational.com)), **Swiss Birdradar** ([www.swiss-birdradar.com](http://www.swiss-birdradar.com)), as well as other X-band marine radars<sup>53</sup>. Lastly, the employment of weather surveillance radar networks can inform siting and mitigation measures of wind energy development to minimize exposure risk of nocturnally migrating birds<sup>38,54,55</sup>. However, their link to automatic turbine shutdown has not been developed yet. The advantages and limitations of radar-systems as compared to image-based systems are presented in **Table 3**.

#### 4.1.4 Biotelemetric-based systems

Sheppard et al. (2015) suggested a system to mitigate bird collision impacts in wind turbines using avian GPS-tags and real-time virtual fences (geofences)<sup>56</sup>. A geofence is a virtual boundary delineated around an area of interest that trigger an automated alert when the target animal crosses the boundary edge. Geofences can be delimited around a threshold distance from wind turbines, and the system will automatically send a SMS alert to a user. The main limitation of the autonomous GPS geofence alert system is that the individuals need to be tagged with GPS and thus, a previous sampling effort is needed to capture the individuals. Moreover, foreign individuals visiting the study area which are not GPS-tagged will pass undetected and thus, the collision risk will not be mitigated in these situations. Lastly, although these technologies create an autonomous alert when specific boundaries around the turbines have been exceeded by the individuals, it does not trigger an automatic shutdown of turbines.

## 4.2 Deterrence

Deterrent mitigation measures aim to alarm and frighten birds and other wildlife in order to prevent them from entering a specific area (e.g., wind farm). Here we present the deterrent mitigation measures based on acoustic, electromagnetic and visual approaches.

### 4.2.1 Acoustic, electromagnetic, and visual approaches

Deterrent devices have been widely used as tools for wildlife management<sup>28,32,57,58</sup>. Three types of deterrents have been used so far: acoustic, electromagnetic fields and visual (light and lasers).

The employment of a specific deterrent should be based on the biology and ecology of the target species, and they can be activated through human observation or by automated real-time monitoring systems as a first deterrent measure prior to turbine shutdown (see, for instance, DTBird in section 4.1 Curtailment: turbine shutdown). The main concern associated with the employment of deterrent devices is the eventual habituation of wildlife, which would lead to the loss its effectiveness, as well as the hazards that it may have on wildlife, and even on humans<sup>29</sup>.

**Acoustic deterrents** are considered more effective than light or electromagnetic deterrents, especially when they have biological significance, although their long-term use has been proven to be ineffective due to wildlife habituation<sup>31,57,59</sup>. Distress calls, predator sounds, pyrotechnics, and sounds of gunfire can be highly effective for birds<sup>29</sup>, whereas ultrasonic devices can be useful for bats (Arnett et al., 2013; Romano et al., 2019; Weaver, 2019). Long Range Acoustic Devices (LRAD) have been proven in a wind farm in Cádiz (Spain), where 60% of the Griffon vultures had strong reactions to the device, although their efficacy depended on the distance to the device<sup>63</sup>. Acoustic deterrents have been also tested in offshore wind farms to deter marine mammals and reduce the risk of acoustic traumata during the construction phase<sup>64-66</sup>.

**Electromagnetic deterrents** consist in the use of microwave signals, magnets, or electromagnetic waves<sup>29</sup>. These deterrents have been tested in bats and suggested for birds due to its advantages: it is useful during day and night, and it can penetrate fog and clouds. However, there are important concerns about their potential effects on the development, reproduction, and physiology of wildlife<sup>67-69</sup>.

Lastly, **visual deterrents** such as lights, shiny devices and lasers have also been suggested as relevant tools to deter birds<sup>28,58</sup>. The main limitation of this type of deterrents is that they are useful during night, but not with daylight. Moreover, these deterrents have been barely evaluated, and their effectiveness in this kind of infrastructures is unknown<sup>29</sup>.

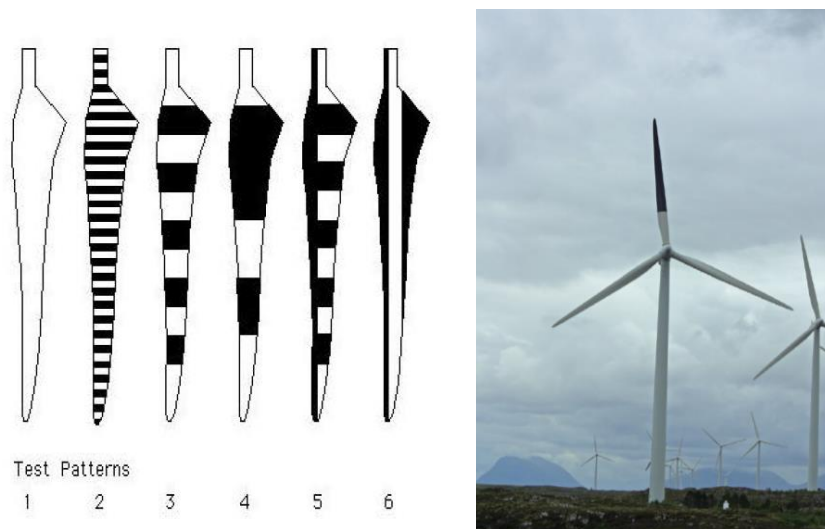
### 4.3 Attraction avoidance

As compared to the deterrent mitigation measures, the strategies exposed here do not aim to alarm or frighten wildlife, but to avoid bringing wildlife within the wind farm area through actions such as increasing the visibility of the turbines (lighting, painting the blades) or applying habitat management actions aiming to reduce the attractiveness of the habitat surrounding the turbines for the target species.

#### 4.3.1 Increasing turbine visibility

One of the most common measures to minimize collision is to increase the conspicuity of wind turbine blades to ensure that birds (or bats) can detect the blades in time to avoid the wind farm, ultimately reducing collision fatalities. Turbine visibility can be increased by painting patterns on wind turbine blades in order to break with the uniformity in the off-white blades, or by adapting aircraft warning lights in colour and intensity.

McIsaac (2000) carried out different studies addressing the raptor visual acuity and the capacity of raptors to see wind-turbine blades, using the American kestrel (*Falco sparverius*) and the Red-tailed Hawk (*Buteo jamaicensis*) as model species <sup>70</sup>. Moreover, they tested different blade-pattern conspicuity for the American kestrel. The authors conclude that raptors may not clearly see turbine blades under some environmental conditions, and that applying high-contrast patterns to turbine blades may increase the conspicuity of the blades. In particular, blade patterns with components running across the width of the blades tended to be more conspicuous than either those with components running the length of the blades and those with uniformly coloured blades (patterns 2 to 4 in **Figure 1**). However, the authors of these studies did not address the efficacy of these blade-patterns on minimizing collision fatalities.



**Figure 1.** Left: Stimulus blade patterns. Obtained from McIsaac (2000). Right: Wind turbine with painted rotor blade. Obtained from <sup>71</sup>.

More recently, May et al. (2020) have tested the efficacy of contrast painting one rotor blade black (**Figure 1**), to reduce avian collisions <sup>71</sup>. Results of this study suggest that annual fatality rate decreased at the turbines with a painted blade by over 70%, reducing collision risk for a range of birds. However, the results showed that the annual fatality rates fluctuated considerably between and within years, so the authors stress the need of long-term studies in order to obtain robust and conclusive results. Similarly, ultraviolet-reflective paint has been suggested for increasing blade visibility, but their effectiveness has not been tested at wind turbines and it seems that it is not a method that works for the most vulnerable species such as vultures <sup>31</sup>.

On the other hand, adapting aircraft warning lights in colour and intensity has been suggested as a potential effective measure. For instance, Gehring et al. (2009) observed that towers with only flashing lights were involved in fewer avian fatalities, and they suggest removing non-flashing lights to reduce avian fatalities at communication towers <sup>72</sup>. Results from this study suggest that towers equipped with flashing light might be more visible for birds than those equipped with non-flashing lights. However, the only study carried out at wind farms suggest that there are not differences on avian collision rates between turbines equipped with flashing red lights as opposed to turbines without lighting <sup>73</sup>. Moreover, turbines with lights

seem to have a higher risk of collision for some birds, especially nocturnal migrant passerines that seem to be attracted to these lights<sup>74</sup>. Therefore, the limited work available hinder to obtain solid conclusions about the effectiveness of this mitigation measure to reduce avian collisions, and further research is need on this topic before its implementation.

#### **4.3.2 Habitat intervention: on-site and off-site**

Habitat intervention falls into two major approaches, one that is aimed at making areas inside a wind farm less attractive to birds, and another that is aimed at making areas outside a wind farm more attractive to birds. Habitat-intervention measures are regarded as having a high potential to reduce collision risk in sensitive species with marked habitat preferences<sup>75</sup>. A common drawback of habitat intervention studies is that they are often based on short-term data, low sample size, and limited study area. Also, the effectiveness of habitat intervention is likely site- and species-specific (and requires further investigation), thus the implementation of a given mitigation measure needs to be done on a case-by-case basis.

Top avian predators are known to be attracted to areas of high prey density, and if such areas occur within or near wind farms, there is an increased risk of collision. If these areas can be identified, it is possible to try to modify bird behaviour and reduce bird exposure to collision by avoiding risky crossings within the wind farm. Along this line, several studies have proposed habitat-targeted measures aimed at reducing prey density within wind farms. Therefore, the goal of this type of habitat intervention is to reduce bird activity within the wind farm area, shifting that activity to areas outside of the project footprint. Understanding the needs of species in terms of space use, habitat requirements and food resources is essential for the success of any habitat-related intervention.

In Spain, Pescador et al. (2019) studied the effectiveness of a simple and inexpensive habitat intervention measure to address collision mortality concerns in the lesser kestrel (*Falco naumanni*)<sup>76</sup>. In three different wind farms (totalling 99 turbines), the soil around the base of a selected number of turbines was tilled superficially to remove herbaceous vegetation. This measure was intended to reduce the abundance of insects potentially used for feeding by lesser kestrels, and thus reduce the attractiveness of turbine surroundings. A comparison between tilled and non-tilled turbines revealed a 75-100% reduction in collisions in the three wind farms, with no registered collision in turbines with a tilled surrounding.

Mammen et al. (2011) studied the movement patterns of red kites (*Milvus milvus*) breeding in the vicinity of five wind farms installed within agricultural fields in Germany<sup>77</sup>. To reduce the risk of collision in this species, the authors recommended, in addition to a buffer of 1000 m, to limit agricultural management activities within the wind farms (e.g., by avoiding mowing before mid-July). This would limit red kite activity within the wind farm area, as this species forages primarily in open areas<sup>78</sup>.

Habitat intervention that occurs outside of the wind farm area aims at drawing sensitive species away from turbine surroundings. This type of habitat intervention involves creating more feeding opportunities or better foraging habitats in the enhancement area than in the facility area, thereby helping to decrease the risk of collision by shifting species activity to less

dangerous areas <sup>29</sup>. Off-site habitat intervention requires joint management efforts between wind farms and enhancement areas and can be applied in combination with on-site habitat intervention.

In a multi-year study (1997-2004) involving a pair of golden eagles in Scotland, Walker et al. (2005) reported on the avoidance behaviour of this species in relation to a 46-turbine wind farm (255 ha) <sup>23</sup>. The wind farm was built within the home range of the eagles (distance to the nearest nest not provided). The study was based on pre- and post-construction phases. The authors observed that the eagles appeared to avoid the wind farm (thus changing their previous space use), flying over the wind farm only when other eagles entered their territory. Part of their space use overlapped with the wind farm, but not the core area (which encompassed the nest sites). An area of forest plantation (ca. 280 ha) was felled as part of a habitat intervention plan, with the aim of increasing prey abundance for the eagles (e.g., Willow Ptarmigan *Lagopus lagopus scoticus* and Black Grouse *Tetrao tetrix*) and reducing the risk of collision. This area was located near the wind farm. After the trees were felled, this area was used by the eagles three times more often than previously, and the shift in the eagles' space use was away from the wind farm and towards the felled area. A major drawback of the study, apart from the low sample size, is that tree clearance approximately coincided with wind farm construction. This makes it difficult to understand the extent to which the eagles responded to habitat enhancement and/or wind farm construction. However, field observations before construction suggest that the site selected for construction was not within any major flight path of the eagles, which perhaps helps to explain the avoidance of the wind farm area and the attraction towards an area with new feeding opportunities.

In Portugal, an experimental field study, based on four golden eagles, was conducted to assess the feasibility of habitat restoration or enhancement as a mitigation measure for reducing the risk of collision for this species at wind farms <sup>79</sup>. Efforts were made to restore rabbit populations (which are key a resource for a range of endangered top predators, including the golden eagle) in two study areas, and habitat management ensured the areas were kept suitable for their prey. Comparisons were made between managed areas and control areas during three years. The control areas were close to power lines, which served in this study as the threat source to the eagles. As the managed areas provided better feeding opportunities (due to targeted action), all the eagles used these areas intensively, with only a reduced use of the control areas. Following the favourable results of this study, this measure started to be applied at a wind farm in Portugal (with no further reported details).

In Scotland, a habitat enhancement area (235 ha) was established as part of a mitigation plan to address the potential impacts of a 35-turbine wind farm on a pair of hen harriers (*Circus cyaneus* <sup>80</sup>). The habitat enhancement area was created (before wind farm construction) through commercial forestry felling, and its use by hen harriers increased considerably after the wind farm was built. However, the hen harriers continued to use the wind farm area consistently, as their flight activity within the wind farm area was not different before and after construction, and many nesting attempts occurred within 500 m of operational turbines. This lack of displacement effects probably reflects similar feeding opportunities offered by the enhance area



and the wind farm area (as no action was taken to reduce prey availability within the wind farm area).

In Portugal, after long-term monitoring at a wind farm, high mortality estimates of common kestrels (*Falco tinnunculus*) were revealed, with a potential to harm the local population of this species. The common kestrels were shown to frequently forage in the open areas around wind turbines, as opposed to a scrubland in the surroundings. A combination of on-site and off-site habitat interventions were regarded as the best option to reduce fatalities, in an effort to shift flight activity away from the wind farm area. Thus, the interventions included planting scrub species at turbine surroundings, and clearing scrub areas located outside the wind farm area via goat grazing. The effectiveness of this mitigation plan was not verified during the study <sup>81</sup>.

### 4.3.3 Other habitat-related measures

A number of other habitat-related measures have been applied to wind energy contexts with a considerable or promising degree of success. In Spain, the closure of a dumpsite intensively used by vultures (in proximity to wind turbines) contributed to a shift in their space use, thus reducing the risk of collision mortality <sup>82</sup>. Martínez-Abraín et al. (2012) recommended that feeding stations, which provide essential supplementary food to griffon vultures in Spain, be sited away from problematic (high fatality rate) wind turbines <sup>83</sup>. Supplementary feeding is a common conservation measure that aims to support the population of scavenging species, including species that rely on such resources during periods of food scarcity, e.g., during the winter months. In Finland, the successful recovery of the white-tailed eagle population was aided by winter feeding stations, which remained active until recently, when the conservation status of the species improved considerably <sup>84</sup>. In Finland, the golden eagle is also a scavenging species during the winter. Similarly, the removal of animal carcasses from high-risk areas, that is, areas within or near wind farms, can play a major role in preventing collision among scavenging birds. In Spain, one of the most effective measures to prevent collision of griffon vultures is the removal of carcasses of livestock grazing in wind farm surroundings <sup>85</sup>. Lastly, knowledge of habitat quality and associated species productivity can influence the buffer zone between wind turbines and known nests. In northern Sweden, high-quality territories were found to be responsible for a large share of total productivity of golden eagles <sup>86</sup>. It is essential that such territories are identified in areas targeted for wind energy and prioritised in conservation practice. High-quality territories should have a greater degree of protection than less productive ones, e.g., by having a larger buffer zone around identified golden eagle nests. In Sweden, the buffer zone for high-quality golden eagle territories increases from 2 km to 4 km.

## 4.4 Repowering

Repowering wind farms (i.e., replacing old turbines by more efficient and powerful models) has been suggested as a potential measure to mitigate the impacts associated with wind turbines, as it leads to a reduction in the number of turbines <sup>29,87,88</sup>. Similarly, removing harmful or potentially hazardous turbines can be especially beneficial if the turbines in consideration have

unacceptable fatality rates. However, whenever possible, the two measures should be applied during the initial phase of development in order to avoid potential impacts on local bird populations, extra and unnecessary costs to wind energy companies.

Studies addressing the differences on raptor and bird fatality rates between a repowered wind farm and an old-generation turbine area found that fatality rates did not differ significantly<sup>89,90</sup>. Gaedicke et al. (2013) observed that collision risk for raptors increases at modern turbines due to the rotor size, but as the rotational speed is lower the probability of collision is lower<sup>88</sup>. However, several researchers have argued that although repowering could have beneficial effects for bird populations, it could have important effects on bats and nocturnal migrant passerines<sup>31,69,91,92</sup>. Future studies should address the effect of repowering on fatality rates across all taxa, as well as on the impacts associated to the newer taller turbines.

#### **4.5 Off-site compensation**

Off-site compensation can be described as any measure that aims at ensuring that unpredicted or unavoidable impacts at a wind facility are offset by a net neutral or positive outcome elsewhere, thus achieving no-net loss for wildlife populations. For example, if the construction of a wind farm reduces the availability of habitat for a sensitive species, action needs to be taken in order to offset the original impact and benefit that species somewhere else, e.g., by habitat-targeted measures. Following Arnett and May (2016), compensatory measures may involve, but are not limited to, actions such as 1) habitat creation, restoration or expansion; 2) invasive species removal; 3) supplementary feeding or prey fostering; and 4) predator control<sup>7</sup>.

To offset wind energy impacts in a compensation framework, it is first necessary to understand the threats faced by a target species. In Finland, the threats faced by the golden eagle, for example, fall within four broad categories (that apply also to other Finnish species, not only the golden eagle) as defined in the 2019 Red List of Finnish Species: 1) “disturbance and traffic”; 2) “reduction of old-growth forests and the decreasing number of large trees”; 3) “trapping, hunting, fishing and illegal killing, including non-target animals being caught in fishing gear”; 4) “construction (on the land): construction relating to housing, business, traffic and recreation, road construction, earthmoving and disposal operations relating to construction”. It is plausible then that compensatory measures for the golden eagle should tackle one or more of the above threats, which would also benefit similar species that face the same threats.

Nest management is often proposed as a simple and inexpensive compensatory measure<sup>36</sup>, and may include the building of artificial nests to facilitate breeding<sup>87</sup> or the use of artificial shade structures to address mortality caused by heat stress<sup>93</sup>. Other recommendations include protection of large trees by landowners (via paid compensation) and establishment of suitable habitats for future nesting<sup>87</sup>. In addition, Mojica et al. (2021) found that the identification and retrofitting of high-risk power poles, as a means to reduce electrocutions, has a potential to compensate for other sources of human-induced mortality in golden eagles<sup>94</sup>. In Norway, Cole and Dahl (2013) made detailed calculations on how to compensate for the collision-induced loss of white-tailed eagles at Smøla wind farm via electrocution prevention measures<sup>95</sup>. This

was regarded as a plausible option to offset the severe damage already caused (and projected to cause) to white-tailed eagles by a poorly-sited wind farm.

It should be noted that a major challenge of compensatory measures has to do with mortality. Here, the difficulty is that it is unknown how much of any conservation measure, or a suite of measures, is required to compensate mortality. Sensitive species (e.g., long-lived raptors with low reproductive output, such as the golden eagle) with a high cumulative mortality at wind farms can complicate the situation even further. For such species, habitat offsets (e.g., habitat creation) could be very demanding and unlikely to compensate for high, sustained mortality at existing and new wind facilities <sup>7</sup>. Thus, the effectiveness of compensatory measures specifically to mortality remains largely unproven and requires further investigation.

## 5 CONCLUSIONS

Effective post-construction mitigation strategies are urgently needed to reduce predicted or unforeseen impacts of wind facilities in a scenario of worldwide wind energy expansion. However, these mitigation strategies should not be applied without first implementing rigorous comprehensive planning and independent environmental assessments aiming to avoid potential impacts. Once the first step of the hierarchical process of impact prevention has been completed (i.e., large-scale site selection), mitigation measures should be designed and implemented based on a case-by-case basis. Mitigation may involve sensory (audible and optical), aerodynamic, and habitat-specific factors, and thus their effectiveness is expected to be species- and site-specific. A better understanding of all these aspects is crucial for developing novel and more effective mitigation strategies to reconcile wind energy production with the protection of the environment, and bird biodiversity.

The implementation of mitigation measures aiming to reduce collision risk and avian mortality rates should always be accompanied by adequate methodological protocols to validate the applied systems and provide further information on their effectiveness and to assess whether additional mitigation is needed. Progress in this direction would help to establish more reliable and cost-effective detection and deterrent systems. Lastly, coordinated action across multiple wind energy projects is needed to overcome the scarcity of data on post-construction mortality data, benefitting research and conservation practice. Below we provide directions to the questions that were posed to us:

### 5.1 What are the available mitigation systems or strategies to address bird collision? How do they work?

Several mitigation measures have been proposed to avoid or reduce collision risk. The most applied and tested measure is the **shutdown of turbines** during periods of increased collision risk, which can be either determined by field observers, automated sensors such as cameras (image-based) or radar (radar-based systems), or by the employment of avian GPS-tags (biotelemetric-based systems). Secondly, **deterrent measures** aim to alarm or frighten birds, and prevent them from approaching wind turbines. These deterrents may be based on acoustic (e.g., predator sounds, alarm calls or sounds of gunfire), electromagnetic or visual approaches

(e.g., lights or lasers), and are commonly applied based on knowledge of the biology and ecology of the target species. **Attraction avoidance** measures aim to avoid bringing wildlife within the wind farm area. Strategies such as painting one rotor blade black can increase turbine visibility for birds, thus reducing collision risk by avoidance action. Moreover, habitat interventions can be applied with the aim of making areas inside and outside a wind farms less or more attractive to birds, respectively, and thus promoting the displacement of individuals outside the wind farm area. **Repowering** consists of replacing a number of old turbines by a lower number of taller and more efficient and powerful models. This has been suggested as a valuable mitigation measure, which can be implemented during the design of a wind energy project, or at the end of a turbine's operational life (*ca.* 20 years). Several researchers have argued that repowering could have beneficial effects for bird populations, since the reduction of turbine number decreases the risk of collision. Lastly, **off-site compensation**, although not a direct minimisation or corrective measure, can be designed during the planning phase to counter on-site impacts by ensuring a no-net loss for wildlife populations elsewhere. Compensatory measures include habitat creation, restoration or expansion, invasive species removal, supplementary feeding, prey fostering, predator control, among others.

## 5.2 What are the latest technologies?

Technological development has been mainly focused on those mitigation measures related with turbine shutdown. Several patents have been approved in this field, but **IdentiFlight** and **DTBird** are two of the most employed and tested image-based systems for turbine curtailment. In particular, **IdentiFlight** has been installed in 150 wind farms across 5 countries: Australia, France, Germany, Sweden, and United States. Similarly, **DTBird** has been operating since 2009 and has been installed in a total of 80 wind farms across 14 countries: Austria, China, France, Germany, Greece, Italy, the Netherlands, Norway, Poland, Spain, Sweden, Switzerland, the United Kingdom and the United States. In addition, several radar-based systems have been developed during the last years such as **Merlin avian radar**, **Accipiter® eBirdRad**, **Robin 3D Flex Bird Radar**, **STRIX Birdtrack®**, or **Swiss Birdradar**. It is important to emphasize that in this report we have focused on the technologies most supported by scientific studies. Undoubtedly, new and more novel technologies have been developed in recent years, but these still require scientific studies to support their effectiveness in reducing collision impacts.

## 5.3 What is their effectiveness?

There is a great lack of knowledge about the effectiveness of mitigation measures applied to date at wind farms. For this reason, we stress the importance of wind energy projects to be accompanied by adequate methodological protocols (*i.e.*, parallel validation with independent observers) to validate the applied systems and provide further information on their effectiveness, as well as to assess whether additional mitigation is needed. The effectiveness of **image-based monitoring** systems for turbine curtailment has been addressed in a few studies. **IdentiFlight**, for instance, reduced the number of collision fatalities by 82% (75%-89%) in the sites with automated curtailment as compared to the control site. On the other hand, **DTBird** has been demonstrated to record between 76% and 96% of all bird flights in the vicinity of the

turbines, but, to our knowledge, there are no studies addressing its effectiveness on minimizing collision rates. Similarly, several studies have been carried out to assess the detection probability and distance of **radar-based systems**, but not on collision rates.

Regarding the **deterrence devices** aiming to scare birds away wind farms, acoustic deterrents have been suggested to be more effective than visual or electromagnetic devices. For instance, in an experiment carried out in Spain, 60% of the griffon vultures had strong reactions to acoustic deterrents. However, there is an important lack of evidence about their effectiveness, and also about the potential habituation of birds and the loss of effectiveness in the long-term. Similarly, **attraction avoidance** measures, such as increasing turbine visibility by painting one rotor blade black have been demonstrated to reduce annual fatality rate by over 70%. Again, there is a great lack of scientific evidence in this regard since only one study is available up to date, conducted on a single wind farm. Authors of this research stressed the need of long-term studies due to the high fluctuation of annual fatality rates, and the need to test this measure in other wind farms to obtain robust and conclusive results. Similar concerns arise from those measures related to habitat interventions on-site and off-site aiming to draw birds away from risk zones. Although many wind energy projects embrace such habitat intervention strategies, an actual evaluation of their effectiveness (if it is carried out) remains usually unpublished. **Off-site compensation** is regarded as a necessary measure to tackle the growing pressure of wind energy with targeted conservation action away from wind farm areas. Conceptually possible, off-site compensation is nevertheless rarely applied. Lastly, studies addressing the differences in bird fatality rates between **repowered wind farms** and old-generation turbines found inconsistent results. One study found that there were not significant differences on mortality rates between repowered and old turbines, whereas a different study found that the collision risk increased in repowered turbines, but the collision probability decreased. Moreover, several researchers have argued that repowering could have important impacts on bats and nocturnal migrant passerines. Therefore, future studies should address the effect of repowering on fatality rates across all taxa, as well as on the impacts associated to the newer taller turbines.

#### **5.4 Can they function properly under Finland's weather conditions?**

Finland's climate is continental, cold with long winters in the north and inland, and relatively milder along the western and southern coasts. Weather conditions are characterized by frequent precipitations distributed throughout the year, although not abundant (400 – 700 mm). The detection probability of **camera- and radar-based systems** for turbine curtailment has been suggested to be limited during periods of poor visibility, due to rain and fog; a similar reduction in efficiency is expected in visual deterrents. However, they are expected to work and endure local weather conditions, as they have been applied in countries with similar weather conditions such as Sweden and Norway (e.g., IdentiFlight or DTBird).

#### **5.5 What are the best options for Pontema wind farm?**

Based on the scientific literature reviewed here, there is no single best option for mitigating collision impacts associated with wind farms, as a combination of options is likely the best

approach. The use of camera- and radar-based systems for automatic turbine curtailment has been suggested by a few studies to be an effective mitigation approach, thus these systems could be promising to the Pontema wind farm. However, the effectiveness of these systems is likely to be enhanced when accompanied by other mitigation measures such as the installation of acoustic or visual deterrents, or by increasing the conspicuity of wind turbine blades (*i.e.*, by painting patterns on blades) to ensure that birds can detect them in time to avoid collision. The successful combination of these measures (*i.e.*, automatic turbine curtailment, deterrent and/or avoid attraction measures) will increase the likelihood that the collision impact is mitigated, but it will reduce also the costs associated with turbine curtailment. This is because by increasing the visibility of turbines or by the employment of deterrent devices to scare away sensitive species, the automatic turbine curtailment system will not be activated and consequently, total energy production will not be reduced.

Habitat interventions could also contribute to reduce collision risk by decreasing habitat attractiveness inside the wind farm area, and/or increasing habitat attractiveness outside this area. Such type of intervention requires, among other things, a good understanding and previous assessment of habitat use by the target species. Therefore, we cannot make specific suggestions at this point. Similarly, an off-site compensation plan requires the identification of existing threats faced by the target species, and modelling tools for estimating the compensation effort in relation to projected impacts. However, compensation is the last step of the mitigation hierarchy for supporting decision-makers, and it is only applicable when the avoidance and minimisation of impacts are not possible. Lastly, as emphasised previously, the mitigation measures that are eventually applied have to be accompanied by a monitoring protocol to assess their effectiveness during the operational phase, but also to be able to detect other impacts that are not being mitigated. Such data are fundamental to conservation practice.

## 6 REFERENCES

1. Lu, X., McElroy, M. B. & Kiviluoma, J. Global potential for wind-generated electricity. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **106**, 10933–10938 (2009).
2. Katzner, T. E. *et al.* Wind energy: An ecological challenge. *Science* **366**, 1206–1207 (2019).
3. Langston, R. H. W. & Pullan, J. D. *Wind farms and birds: an analysis of the effects of wind farms on birds, and guidance on environmental assessment criteria and site selection issues.* (Report T-PVS/Inf (2003) 12, by BirdLife International to the Council of Europe, Bern Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitats. RSPB/BirdLife in the UK, 2003).
4. Serrano, D. *et al.* Renewables in Spain threaten biodiversity. *Science* **370**, 1282–1283 (2020).
5. Pérez-García, J. M. *et al.* Priority areas for conservation alone are not a good proxy for predicting the impact of renewable energy expansion. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **119**, e2204505119 (2022).
6. Hutchins, M., Parr, M. & Schroeder, D. ABC's Bird-Smart Wind Energy Campaign: Protecting Birds from Poorly Sited Wind Energy Development. *Human–Wildlife Interact.* **10**, (2016).

7. Arnett, E. & May, R. Mitigating Wind Energy Impacts on Wildlife: Approaches for Multiple Taxa. *Human–Wildlife Interact.* **10**, (2016).
8. May, R., Masden, E. A., Bennet, F. & Perron, M. Considerations for upscaling individual effects of wind energy development towards population-level impacts on wildlife. *J. Environ. Manage.* **230**, 84–93 (2019).
9. Ministry of Economic Affairs and Employment. *Finland’s Integrated Energy and Climate Plan.* (2019).
10. Finnish Wind Power Association. Operating and dismantled wind turbines. <https://tuulivoimayhdistys.fi/en/wind-power-in-finland/wind-power-in-production-and-dismantled> [accessed on 10.9.2022].
11. Finnish Wind Power Association. Projects under planning. [https://tuulivoimayhdistys.fi/media/final-16.2-public-wind-power-pipeline-finland-1\\_2021.pdf](https://tuulivoimayhdistys.fi/media/final-16.2-public-wind-power-pipeline-finland-1_2021.pdf) [accessed on 10.9.2022].
12. McClure, C. J. W. *et al.* State of the world’s raptors: Distributions, threats, and conservation recommendations. *Biol. Conserv.* **227**, 390–402 (2018).
13. Wang, S. & Wang, S. Impacts of wind energy on environment: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **49**, 437–443 (2015).
14. Smallwood, K. S. & Thelander, C. Bird Mortality in the Altamont Pass Wind Resource Area, California. *J. Wildl. Manag.* **72**, 215–223 (2008).
15. de Lucas, M., Ferrer, M., Bechard, M. J. & Muñoz, A. R. Griffon vulture mortality at wind farms in southern Spain: Distribution of fatalities and active mitigation measures. *Biol. Conserv.* **147**, 184–189 (2012).
16. Dahl, E. L., Bevanger, K., Nygård, T., Røskaft, E. & Stokke, B. G. Reduced breeding success in white-tailed eagles at Smøla windfarm, western Norway, is caused by mortality and displacement. *Biol. Conserv.* **145**, 79–85 (2012).
17. Stokke, B. *et al.* *Langtidseffekter av Smøla vindpark på den lokale bestanden av havørn (Haliaeetus albicilla). Årsrapport 2021.* (2021).
18. Drewitt, A. L. & Langston, R. H. W. Assessing the impacts of wind farms on birds. *Ibis* **148**, 29–42 (2006).
19. Erickson, R. A. *et al.* Assessing local population vulnerability with branching process models: an application to wind energy development. *Ecosphere* **6**, 1–14 (2015).
20. Hedfors, R. Movement ecology of Golden eagles (*Aquila chrysaetos*) and risks associated with wind farm development. vol. 2014:16 (Swedish University of Agricultural Sciences, 2014).
21. Johnston, N. N., Bradley, J. E. & Otter, K. A. Increased Flight Altitudes among Migrating Golden Eagles Suggest Turbine Avoidance at a Rocky Mountain Wind Installation. *PLOS ONE* **9**, e93030 (2014).
22. Fielding, A. H. *et al.* Responses of dispersing GPS-tagged Golden Eagles (*Aquila chrysaetos*) to multiple wind farms across Scotland. *Ibis* **164**, 102–117 (2022).
23. Walker, D., McGrady, M., McCluskie, A., Madders, M. & McLeod, D. R. A. *Resident Golden Eagle ranging behaviour before and after construction of a windfarm in Argyll.* (2005).
24. Lehtikainen, A. *et al.* Birds. in *The 2019 Red List of Finnish Species* (eds. Hyvärinen, E., Juslén, A., Kemppainen, E., Uddström, A. & Liukko, U., -M) 263–312 (Ministry of the Environment & Finnish Environment Institute, 2019).

25. Directive 2009/147/EC. *DIRECTIVE 2009/147/EC of the European Parliament and of the Council on the conservation of wild birds.* (2009).
26. Tara J. Conkling, Christopher J.W. McClure, Sandra Cuadros, Scott R. Loss, & Todd E. Katzner. Limited rigor in studies of raptor mortality and mitigation at wind power facilities. *Biol. Conserv.* 109707- (2022) doi:10.1016/j.biocon.2022.109707.
27. Allison, T. D., Cochrane, J. F., Lonsdorf, E. & Sanders-Reed, C. A Review of Options for Mitigating Take of Golden Eagles at Wind Energy Facilities. *J. Raptor Res.* **51**, 319–333 (2017).
28. Cook, A. S. C. P. *et al.* *Identifying a range of options to prevent or reduce avian collision with offshore wind farms using a UK-based case study.* (The British Trust for Ornithology, AEA Group, the Met Office and the University of Birmingham Centre for Ornithology, 2011).
29. Gartman, V., Bulling, L., Dahmen, M., Geißler, G. & Köppel, J. Mitigation Measures for Wildlife in Wind Energy Development, Consolidating the State of Knowledge — Part 2: Operation, Decommissioning. *J. Environ. Assess. Policy Manag.* **18**, 1650014 (2016).
30. Gartman, V., Bulling, L., Dahmen, M., Geißler, G. & Köppel, J. Mitigation Measures for Wildlife in Wind Energy Development, Consolidating the State of Knowledge — Part 1: Planning and Siting, Construction. *J. Environ. Assess. Policy Manag.* **18**, 1650013 (2016).
31. Marques, A. T. *et al.* Understanding bird collisions at wind farms: An updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biol. Conserv.* **179**, 40–52 (2014).
32. May, R., Reitan, O., Bevanger, K., Lorentsen, S.-H. & Nygård, T. Mitigating wind-turbine induced avian mortality: Sensory, aerodynamic and cognitive constraints and options. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **42**, 170–181 (2015).
33. Watson, R. T. *et al.* Raptor Interactions With Wind Energy: Case Studies From Around the World. *J. Raptor Res.* **52**, 1–18 (2018).
34. Clocker, K., Hu, C., Roadman, J., Albertani, R. & Johnston, M. L. Autonomous Sensor System for Wind Turbine Blade Collision Detection. *IEEE Sens. J.* **22**, 11382–11392 (2022).
35. U.S. Fish & Wildlife Service. *U.S. Fish and Wildlife Service Land-Based Wind Energy Guidelines.* (2021).
36. U.S. Fish and Wildlife Service. *Eagle Conservation Plan Guidance. Module 1 – Land-based Wind Energy. Version 2.* (2013).
37. Liechti, F., Guélat, J. & Komenda-Zehnder, S. Modelling the spatial concentrations of bird migration to assess conflicts with wind turbines. *Biol. Conserv.* **162**, 24–32 (2013).
38. Aschwanden, J. *et al.* Bird collisions at wind turbines in a mountainous area related to bird movement intensities measured by radar. *Biol. Conserv.* **220**, 228–236 (2018).
39. Hayes, M. A. *et al.* A smart curtailment approach for reducing bat fatalities and curtailment time at wind energy facilities. *Ecol. Appl.* **29**, e01881 (2019).
40. Collier, M. P., Dirksen, S. & Krijgsveld, K. L. *A review of methods to monitor collisions or micro-avoidance of birds with offshore wind turbines.* (2011).
41. Birdlife International. *Review and guidance on use of “shutdown-on-demand” for wind turbines to conserve migrating soaring birds in the Rift Valley/Red Sea Flyway.* (2015).
42. May, R. *et al.* Collision risk in white-tailed eagles. Modelling collision risk using vantage point observations in Smøla wind-power plant. (2010).
43. McClure, C. J. W. *et al.* Eagle fatalities are reduced by automated curtailment of wind turbines. *J. Appl. Ecol.* **58**, 446–452 (2021).



44. McClure, C. J. W., Martinson, L. & Allison, T. D. Automated monitoring for birds in flight: Proof of concept with eagles at a wind power facility. *Biol. Conserv.* **224**, 26–33 (2018).
45. May, R., Hamre, Ø., Vang, R. & Nygård, T. *Evaluation of the DTBird video-system at the Smøla wind-power plant: Detection capabilities for capturing near-turbine avian behaviour.* (2012).
46. Rabie, P. A. *et al.* Efficacy and cost of acoustic-informed and wind speed-only turbine curtailment to reduce bat fatalities at a wind energy facility in Wisconsin. *PLOS ONE* **17**, e0266500 (2022).
47. Kelly, T. A. & Fiedler, J. K. *A Framework for Mitigation of Bird and Bat Strike Risk at Wind Farms using Avian Radar and SCADA Interface.* (2008).
48. May, R., Steinheim, Y., Kvaløy, P., Vang, R. & Hanssen, F. Performance test and verification of an off-the-shelf automated avian radar tracking system. *Ecol. Evol.* **7**, 5930–5938 (2017).
49. Gerrerger, M. B., Lima, S. L. & Devault, T. L. Evaluation of an avian radar system in a midwestern landscape. *Wildl. Soc. Bull.* **40**, 150–159 (2016).
50. Beason, R. C., Humphrey, J. S., Myers, N. E. & Avery, M. L. Synchronous monitoring of vulture movements with satellite telemetry and avian radar. *J. Zool.* **282**, 157–162 (2010).
51. Phillips, A. C. *et al.* Efficacy of avian radar systems for tracking birds on the airfield of a large international airport. *Wildl. Soc. Bull.* **42**, 467–477 (2018).
52. Dokter, A. M., Baptist, M. J., Ens, B. J., Krijgsveld, K. L. & van Loon, E. E. Bird Radar Validation in the Field by Time-Referencing Line-Transect Surveys. *PLOS ONE* **8**, 9 (2013).
53. Tomé, R., Canário, F., Leitão, A. H., Pires, N. & Repas, M. Radar Assisted Shutdown on Demand Ensures Zero Soaring Bird Mortality at a Wind Farm Located in a Migratory Flyway. in *Wind Energy and Wildlife Interactions: Presentations from the CWW2015 Conference* (ed. Köppel, J.) 119–133 (Springer International Publishing, 2017). doi:10.1007/978-3-319-51272-3\_7.
54. Cohen, E. B. *et al.* Using weather radar to help minimize wind energy impacts on nocturnally migrating birds. *Conserv. Lett.* **15**, e12887 (2022).
55. Liechti, F. *et al.* Cross-calibration of different radar systems for monitoring nocturnal bird migration across Europe and the Near East. *Ecography* **42**, 887–898 (2019).
56. Sheppard, J. K., McGann, A., Lanzone, M. & Swaisgood, R. R. An autonomous GPS geofence alert system to curtail avian fatalities at wind farms. *Anim. Biotelemetry* **3**, 43 (2015).
57. Bishop, J., McKay, H., Parrott, D. & Allan, J. *Review of international research literature regarding the effectiveness of auditory bird scaring techniques and potential alternatives.* (Department of Environment, Food and Rural affairs, UK., 2003).
58. Gilsdorf, J. M., Hygnstrom, S. E. & VerCauteren, K. C. Use of Frightening Devices in Wildlife Damage Management. *Integr. Pest Manag. Rev.* **7**, 29–45 (2002).
59. Dooling, R. *Avian Hearing and the Avoidance of Wind Turbines.* NREL/TP-500-30844, 15000693 (2002) doi:10.2172/15000693.
60. Arnett, E. B., Hein, C. D., Schirmacher, M. R., Huso, M. M. P. & Szewczak, J. M. Evaluating the Effectiveness of an Ultrasonic Acoustic Deterrent for Reducing Bat Fatalities at Wind Turbines. *PLOS ONE* **8**, e65794 (2013).
61. Romano, W. B. *et al.* Evaluation of an acoustic deterrent to reduce bat mortalities at an Illinois wind farm. *Wildl. Soc. Bull.* **43**, 608–618 (2019).

62. Weaver, S. P. Understanding wind energy impacts on bats and testing reduction strategies in South Texas. (Texas State University, 2019).
63. Smith, A., Vidao, J., Villar, S., Quillen, J. & Davenport, J. Evaluation of long-range acoustic device (LRAD) for bird dispersal at el Pino Wind Farm, Spain. in *Proceedings of the Conference on Wind Energy and Wildlife Impacts, 2–5 May 2011* (Trondheim, Norway, 2011).
64. Brandt, M. J. *et al.* Seal scarers as a tool to deter harbour porpoises from offshore construction sites. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **475**, 291–302 (2013).
65. Dähne, M., Tougaard, J., Carstensen, J., Rose, A. & Nabe-Nielsen, J. Bubble curtains attenuate noise from offshore wind farm construction and reduce temporary habitat loss for harbour porpoises. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **580**, 221–237 (2017).
66. McGarry, T., Boisseau, O., Stephenson, S. & Compton, R. *Understanding the Effectiveness of Acoustic Deterrent Devices (ADDs) on Minke Whale (Balaenoptera acutorostrata), a Low Frequency Cetacean.* (2017).
67. Nicholls, B. & Racey, P. A. Bats Avoid Radar Installations: Could Electromagnetic Fields Deter Bats from Colliding with Wind Turbines? *PLoS ONE* **7** (2007).
68. Nicholls, B. & Racey, P. A. The Aversive Effect of Electromagnetic Radiation on Foraging Bats—A Possible Means of Discouraging Bats from Approaching Wind Turbines. *PLoS ONE* **4**, 10 (2009).
69. Voigt, C. C., Lehnert, L. S., Petersons, G., Adorf, F. & Bach, L. Wildlife and renewable energy: German politics cross migratory bats. *7* (2015).
70. McIsaac, H. Raptor Acuity and Wind Turbine Blade Conspicuity. in *Proceedings of the National Avian-Wind Power Planning Meeting IV* (2000).
71. May, R. *et al.* Paint it black: Efficacy of increased wind turbine rotor blade visibility to reduce avian fatalities. *Ecol. Evol.* **10**, 8927–8935 (2020).
72. Gehring, J., Kerlinger, P. & Manville II, A. M. Communication towers, lights, and birds: successful methods of reducing the frequency of avian collisions. *Ecol. Appl.* **19**, 505–514 (2009).
73. Kerlinger, P. *et al.* Night Migrant Fatalities and Obstruction Lighting at Wind Turbines in North America. *Wilson J. Ornithol.* **122**, 744–754 (2010).
74. Drewitt, A. L. & Langston, R. H. W. Collision Effects of Wind-power Generators and Other Obstacles on Birds. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **1134**, 233–266 (2008).
75. Marques, A. T. *et al.* Understanding bird collisions at wind farms: An updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biol. Conserv.* **179**, 40–52 (2014).
76. Pescador, M., Gómez Ramírez, J. I. & Peris, S. J. Effectiveness of a mitigation measure for the lesser kestrel (*Falco naumanni*) in wind farms in Spain. *J. Environ. Manage.* **231**, 919–925 (2019).
77. Mammen, U., Mammen, K., Heinrichs, N. & Resetaritz, A. Red kite (*Milvus milvus*) fatalities at wind turbines – why do they occur and how they are to prevent? in *Conference on Wind energy and Wildlife impacts* (2011).
78. Zawadzka, D. Feeding habits of the black kite *Milvus migrans*, red kite *Milvus milvus*, white-tailed eagle *Haliaeetus albicilla* and lesser spotted eagle *Aquila pomarina* in Wigry National Park (NE Poland) (1999).
79. Paula, A. *et al.* Managing habitat for prey recovery – an off-site mitigation tool for wind farms’ impacts on top avian predators. in *Conference on Wind energy and Wildlife impacts* (2011).

80. Forrest, J., Robinson, C. & Hommel, C. Flight activity and breeding success of hen harrier at Paul's Hill wind farm in north east Scotland. in *Conference on Wind energy and Wildlife impacts* (2011).
81. Bioinsight. *Parque Eólico da Serra dos Candeeiros. Medidas de Mitigação e Compensação dirigidas ao Peneireiro (Falco tinnunculus)*. (2017).
82. Camiña, A. The effect of wind farms on vultures in northern Spain – fatalities behaviour and correction measures. in *Conference on Wind energy and Wildlife impacts* (2011).
83. Martínez-Abraín, A. *et al.* Effects of wind farms and food scarcity on a large scavenging bird species following an epidemic of bovine spongiform encephalopathy. *J. Appl. Ecol.* **49**, 109–117 (2012).
84. WWF. *Merikotkien puolesta - WWF:N merikotkatyöryhmän vuosikymmententaiva*. (2016).
85. Perrow, M. *Wildlife and Wind Farms - Conflicts and Solutions: Onshore: Potential Effects*. (Pelagic Publishing Ltd, 2017).
86. Hipkiss, T., Moss, E. & Hörnfeldt, B. Variation in quality of Golden Eagle territories and a management strategy for wind farm projects in northern Sweden. *Bird Study* **61**, 444–446 (2014).
87. Johnson, G. D., Strickland, M. D., Erickson, W. P. & Young, D. P. Use of data to develop mitigation measures for wind power development impacts to birds. in *Birds and Wind Farms, Risk Assessment and Mitigation* (Quercus, 2007).
88. Gaedicke, L., Loske, K. & Bergen, F. Effects of repowering wind turbines on collision risk of raptor species. in *Naturvardsverket p.136 Rapport 6546* (2013).
89. Krijgsveld, K. L., Akershoek, K., Schenk, F., Dijk, F. & Dirksen, S. Collision Risk of Birds with Modern Large Wind Turbines. *Ardea* **97**, 357–366 (2009).
90. Smallwood, K. S. & Karas, B. Avian and Bat Fatality Rates at Old-Generation and Repowered Wind Turbines in California. *J. Wildl. Manag.* **73**, 1062–1071 (2009).
91. Rydell, J. *et al.* Bat Mortality at Wind Turbines in Northwestern Europe. *Acta Chiropterologica* **12**, 261–274 (2010).
92. Smallwood, K. S. *Assessment of three proposed adaptive management plans for reducing raptor fatalities in the altamont pass wind resource area*. (SRC document, 2010).
93. Kochert, M. N., Steenhof, K. & Brown, J. L. Effects of Nest Exposure and Spring Temperatures on Golden Eagle Brood Survival: An Opportunity for Mitigation. *J. Raptor Res.* **53**, 91–97 (2019).
94. Mojica, E. K., Eccleston, D. T. & Harness, R. E. Importance of Power Pole Selection When Retrofitting for Eagle Compensatory Mitigation. *J. Fish Wildl. Manag.* **13**, 286–294 (2021).
95. Cole, S. G. & Dahl, E. L. Compensating white-tailed eagle mortality at the Smøla wind-power plant using electrocution prevention measures. *Wildl. Soc. Bull.* **37**, 84–93 (2013).

**Katsaus rakentamisen jälkeisiin lieventämisstrategioihin, joilla vähennetään tuulienergian tuotannon vaikutuksia petolintuihin, kiinnittäen erityistä huomiota maakotkaan (*Aquila chrysaetos*)**

Valmistanut:

**Julia Gómez-Catasús, tohtori**

**Fabio Balotari-Chiebao, tohtori**

Yrkehögskolan Novia, Raseborgsvägen 9, 10600 Tammisaari



Tuulipuisto Pontema Oy:n toimeksiannosta.

Käännös Etha Wind, englanti-suomi, 2023.

**Syyskuu 2022**

## Sisällysluettelo

1 JOHDANTO .....	3
1.1 Tuulienergia: taustaa, laajentumista ja ekologisia haasteita .....	3
1.2 Tuulivoima Suomessa: nykyinen ja tuleva kehitys .....	3
1.3 Tuulienergia ja petolinnut: yleiskatsaus .....	4
2 TAVOITTEET .....	5
3 MATERIAALIT JA MENETELMÄT .....	5
4 TULOKSET JA PÄÄTELMÄT .....	7
4.1 Voimaloiden käytön rajoittaminen .....	9
4.1.1 Tarkkailijat maastossa .....	9
4.1.2 Kuvapohjaiset tai akustiset järjestelmät .....	9
4.1.3 Tutkapohjaiset järjestelmät .....	11
4.1.4 Biotelemetriset järjestelmät .....	12
4.2 Pelotevaikutus .....	12
4.2.1 Akustiset, sähkömagneettiset ja visuaaliset lähestymistavat .....	12
4.3 Vetovoiman välttäminen .....	13
4.3.1 Voimalan näkyvyyden parantaminen .....	13
4.3.2 Luontotyyppiin liittyvät toimet: laitosalueella ja sen ulkopuolella .....	15
4.3.3 Muut luontotyyppiin liittyvät toimenpiteet .....	17
4.4 Uuden voimalasukupolven asentaminen .....	17
4.5 Toimet tuulivoima-alueen ulkopuolella .....	17
5 PÄÄTELMÄT .....	19
5.1 Mitkä ovat käytettävissä olevat lieventämisjärjestelmät tai -strategiat lintujen törmäyksiin puuttumiseksi? Miten ne toimivat? .....	19
5.2 Mitkä ovat uusimmat tekniikat? .....	20
5.3 Mikä on niiden tehokkuus? .....	20
5.4 Toimivatko ne oikein Suomen sääolosuhteissa? .....	21
5.5 Mitkä ovat parhaat vaihtoehdot Ponteman tuulivoimapuistolle? .....	21
6 LÄHDELUETTELO .....	22

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tuulienergia: taustaa, laajentumista ja ekologisia haasteita

Tuulienergiaa pidetään lupaavimpana uusiutuvana energialähteenä ilmastonmuutoksen haasteisiin vastaamiseksi tuulivoiman tuotannon maailmanlaajuisen potentiaalin vuoksi <sup>1</sup>. Tämä tosiasia on vauhdittanut tuulienergian innovointia, kehittämistä ja soveltamista maailmanlaajuisesti, mikä herättää myös useita ekologisia huolenaiheita <sup>2</sup>. Suuri haaste on, että tuulienergian laajenemisvauhti on nopeampi kuin suojelututkijoiden kyky todentaa sen ympäristö- ja villieläinvaikutuksia ja toteuttaa tehokkaita toimenpiteitä tällaisten vaikutusten lieventämiseksi <sup>3,4</sup>. Tuulivoiman todellisista vaikutuksista on siis suurta epävarmuutta, ja tämä puolestaan asettaa haasteen poliittisille päättäjille, päätöksentekijöille ja suunnittelijoille. Tässä skenaariossa tutkijat korostavat tiukan kattavan suunnittelun ja riippumattomien ympäristöarviointien toteuttamisen tärkeyttä <sup>4,5</sup>. Lisäksi tarvitaan lisää sääntely- ja hallintastandardeja (esim. rakentamisen jälkeisten kuolemantapaustietojen kerääminen ja raportointi), jotta toimivat tuulipuistot voidaan sovittaa yhteen ympäristön, biologisen monimuotoisuuden ja ekosysteemipalvelujen suojelun kanssa <sup>6</sup>.

Tuulivoimaloihin törmääviä lintuja pidetään yleensä yhtenä suurimmista konfliktikysymyksistä tuulienergian kehittämisessä. Siitä lähtien, kun tuulipuistojen asentaminen alkoi ja ensimmäiset onnettomuudet havaittiin, lukuisat tutkijat, konsultit ja johtajat ovat työskennelleet näiden laitosten aiheuttamien vaikutusten ehkäisemiseksi ja korjaamiseksi. Vuosien varrella kertyneen kokemuksen avulla on luotu hierarkkinen prosessi päätöksentekijöiden tukemiseksi. Tämä prosessi koostuu kolmesta peräkkäisestä vaiheesta: 1) välttä, 2) minimoi ja 3) kompensoi <sup>7</sup>. Näin ollen, minimointiin tai korjaaviin toimenpiteisiin törmäysten minimoimiseksi ei pitäisi tukeutua arvioimatta ensin vahinkojen ehkäisemistä tuulipuiston sijainnin eri vaihtoehtojen kattavan suunnittelu- ja ympäristöarviointiprosessin avulla, mukaan lukien rakentamaton vaihtoehto. Kun tuulipuistot on rakennettu, ennustettujen vaikutusten minimointivaihtoehdot on mukautettava lajien tarpeisiin tietyllä alueella <sup>7</sup>. Jos vaikutusten ennustetaan olevan hallittavissa, on tarpeen määrittää, mitä minimointitoimenpiteitä (esim. automatisoituja laitteita tai elinympäristön hoitoa) voitaisiin käyttää vaikutusten vähentämiseksi hyväksyttävälle tasolle. Minimointitoimenpiteet kohdistuvat yleensä tiettyihin lajeihin, joten ihannetapauksessa olisi harkittava useita eri vaihtoehtoja. On huomioitava, että vaikutuksia on odotettavissa kaikissa tuulivoimahankkeissa ja että monissa laitoksissa vaikutuksia, jotka jatkuvat minimointitoimenpiteiden toteuttamisen jälkeen (joita kutsutaan jäännösvaikutuksiksi), on käsiteltävä kompensointimuodossa, joka on lieventämishierarkian viimeinen vaihe. On tärkeä tiedostaa, että korvaavat toimenpiteet tuulienergiakuolemien torjumiseksi ovat haastavia, ja niiden tehokkuutta on vielä testattava. Yhteenvedon voidaan todeta, että lieventäviin toimenpiteisiin liittyy tällä hetkellä paljon epävarmuutta, joten on tärkeää investoida niiden tehokkuuden ymmärtämiseen erilaisissa ympäristöissä, eri lajeissa ja siihen, miten toimenpiteitä yhdistelemällä voitaisiin parhaiten vähentää vaikutuksia. Tuulienergian todellisissa vaikutuksissa on todennäköisesti edelleen epävarmuutta, mutta mukautuvaa hallintaa (toteuttamalla tehokkaita korjaavia toimenpiteitä nykyisissä ja uusissa laitoksissa) on tuettava täysimääräisesti lintujen suojelussa, erityisesti kun otetaan huomioon kumulatiiviset vaikutukset yksittäisten laitosten vaikutusten sijaan <sup>8</sup>.

## 1.2 Tuulivoima Suomessa: nykyinen ja tuleva kehitys

Tuulivoima on kiinteä osa Suomen kansallista energia- ja ilmastostrategiaa <sup>9</sup>, jolla on potentiaalia helpottaa energijärjestelmän muutosta ilmastonmuutoksen edessä. Euroopan unionin ilmasto- ja energiatavoitteiden mukaisesti Suomi aikoo hyödyntää laajasti tuulivarojaan, jotta uusiutuvien energialähteiden osuus energian kokonaiskulutuksesta olisi 51 prosenttia vuoteen 2030 mennessä <sup>9</sup>. Vuoden 2022 lopussa Suomessa oli yhteensä 1112 voimalaa, joiden kumulatiivinen kapasiteetti oli 4037 MW <sup>10</sup>. Maaliskuussa 2022 rakenteilla oli 741 tuulivoimalaa ja aiemmissa kehitysvaiheissa 5527 tuulivoimalaa (tunnistetusta projektista/esiselvityksestä täysin luvitettuun), yhteensä 44466 MW lisäkapasiteettia <sup>11</sup>. Tuulienergian lisääntyessä tarvitaan huolellista aluesuunnittelua, jotta vältetään ristiriidat linnuston kanssa.

### 1.3 Tuulienergia ja petolinnut: yleiskatsaus

Petolinnut ovat olleet tuulivoimatutkimuksen kohteena useassa maassa, sillä ne ovat sekä usein uhanalaisia<sup>12</sup> että haavoittuvimpia linturyhmiä voimaloiden törmäykselle<sup>13</sup>. Merkittäviä esimerkkilajeja tuulivoimaloista johtuvasta korkeasta kuolleisuudesta ovat maakotka (*Aquila chrysaetos*) Yhdysvalloissa<sup>14</sup>, griffonkorppikotka (*Gyps fulvus*) Etelä-Espanjassa<sup>15</sup> ja merikotka (*Haliaeetus albicilla*) Norjassa<sup>16,17</sup>. Erityisen huolestuttavaa on se, että monet petolintulajit, kuten edellä mainitut, kehittyvät hitaasti, niillä on pitkät sukupolvet ja alhainen lisääntyminen, joten kuolleisuus voimalatörmäyksistä (yhdistettynä muihin ihmisen aiheuttamiin paineisiin) voi osoittautua haitalliseksi populaation pysyvyydelle<sup>18,19</sup>.

Maakotkaan, jota käsitellään yksityiskohtaisemmin tässä katsauksessa, kohdistuu vakavia huolenaiheita nykyisten ja tulevien tuulipuistojen mahdollisista vaikutuksista. Törmäyksen (joka on ensisijainen huolenaihe) lisäksi voimalat syrjäyttävät usein maakotkia, mikä muuttaa niiden lentokorkeuskäyttäytymistä (lentää korkeammalla voimaloiden yläpuolella;<sup>20,21</sup> ja reviirikäyttäytyminen<sup>22,23</sup>). Muuttamalla reviirikäyttäytymistä maakotkat käytännössä menettävät esimerkiksi ruokailualueita tuulipuistoalueella, joissakin tapauksissa ilman merkkejä totumisesta edes vuosia voimala-asennuksen jälkeen<sup>22</sup>. Tuulienergian haitalliset vaikutukset voivat aiheuttaa lupiin liittyviä haasteita tuulivoimayhtiöille, mikä saattaa estää tällaisen kehityksen alueilla, joilla maakotkan reviiri-alueet ovat päällekkäisiä tuulienergialle suotuisten alueiden kanssa. Maakotka on tällä hetkellä luokiteltu uhanalaiseksi (VU) lajiksi Suomessa<sup>24</sup>, ja se on mukana Euroopan unionin (EU) lintudirektiivin<sup>25</sup> liitteessä I, siten suojeltu Suomen ja EU:n lainsäädännössä.

Petolintujen kohtaamista riskeistä huolimatta tuulipuistoja operoidaan usein ottamatta asianmukaisesti huomioon niiden mahdollisia vaikutuksia ja lieventämisvaihtoehtoja. Tuoreessa katsauksessa (321 tuulipuistoa 12 maasta) korostettiin, että tiukka tiedonkeruu tuulienergian vaikutuksista petolintuihin on harvinaista ja että toimia kielteisten vaikutusten lieventämiseksi toteutetaan harvoin<sup>26</sup>. Näin ollen tehokas ohjeistus tuulipuiston sijoittamiseen, käyttöön ja vaikutusten lieventämiseen on ensisijainen suojeluprioriteetti.

## 2 TAVOITTEET

Tässä katsauksessa keskitymme rakentamisen jälkeisiin lieventämistoimenpiteisiin, pääasiassa minimointi- tai korjaaviin toimenpiteisiin, ja käsittelemme myös korvaavia toimenpiteitä ja niihin liittyviä esimerkkejä. Tarkastelemme aiheeseen liittyvää olemassa olevaa kirjallisuutta ja tarjoamme käsityksen nykyisistä lieventämisvaihtoehdoista ja niiden tunnetuista tehokkuuksista ja rajoitteista. Keskitymme toimenpiteisiin, joilla puututaan erityisesti petolintuihin kohdistuviin vaikutuksiin (jotka ovat usein yksi tuulivoimasuunnittelun kannalta merkittävimpiä lajeja), kiinnittäen erityistä huomiota törmäysriskiin ja maakotkaan. Rakentamista edeltävät lieventävät toimenpiteet (esim. ylätasen tuulipuiston sijoitussuunnittelu) eivät sisälly tähän. Lisäksi katsauksessamme pyrittiin vastaamaan tai antamaan ohjeita meille esitettyihin kysymyksiin: (a) Mitkä ovat käytettävissä olevat lieventämisjärjestelmät tai -strategiat lintujen törmäysten käsittelemiseksi? b) Mitkä ovat uusimmat tekniikat? c) Miten ne toimivat? d) Mikä on niiden tehokkuus? e) Toimivatko ne kunnolla Suomen sääolosuhteissa? f) Mitkä ovat parhaat vaihtoehdot Ponteman tuulipuistolle?

## 3 MATERIAALIT JA MENETELMÄT

Yleiskatsaus mahdollisista rakentamisen jälkeisistä lieventämistoimenpiteistä perustuu olemassa oleviin katsauksiin aiheesta <sup>7,27-33</sup>, avainsanahakuihin ISI Web of Sciencessä, Google Scholarissa ja Internet-sivustoilla sekä ottamalla suoraan yhteyttä kansainvälisiin asiantuntijoihin (tutkijat sekä teollisuuden että valtion virastojen edustajat). Tätä laajaa lähestymistapaa pidettiin tarkoituksenmukaisena haettaessa mahdollisimman paljon tietoa sekä tieteellisestä (vertaisarvioitua lehdet, kirjat) että harmaasta kirjallisuudesta (raportit, artikkelit, verkkosivustot). Tarkistimme myös verkkosivuston Conservation Evidence (<https://www.conservationevidence.com/>), joka tarkastelee ja tiivistää tieteellisen kirjallisuuden suojelutoimien vaikutuksia. **Taulukossa 1** esitetään yhteenveto tässä katsauksessa käytettyjen tutkimusten määrästä kunkin rakentamisen jälkeisen tai operatiivisen lieventämistoimenpiteen osalta.



Taulukko 1. Tässä katsauksessa havaitut tutkimukset jokaista operatiivista lieventämistoimenpidettä kohti. Kunkin toimenpiteen osalta ilmoitetaan tutkimusten lukumäärä, maat, joissa tutkimukset on tehty, ja viitteet. Yleisiä katsauksia rakentamisen jälkeisistä lieventämistoimenpiteistä ei ole tässä.

	<b>Tutkimusten lukumäärä</b>	<b>Maat</b>	<b>Viittaukset</b>
<b>Käytön rajoitukset: voimalan sammutus</b>			
<i>Tarkkailijat maastossa</i>	2	Australia, Norja, Portugali, Espanja, Sveitsi	15,37,41,42
<i>Kuvapohjaiset järjestelmät</i>	7	Norja, Yhdysvallat	39–41,43–46
<i>Tutkapohjaiset järjestelmät</i>	13	Belgia, Ranska, Israel, Espanja, Sveitsi, Alankomaat, Norja ja Yhdysvallat	38–41,47–55
<i>Biotelemetria-järjestelmät</i>	1	Yhdysvallat	56
<b>Karkotusmenetelmät</b>			
<i>Akustiset, sähkömagneettiset ja visuaaliset menetelmät</i>	15	Tanska, Saksa, Islanti, Espanja, Iso-Britannia, Yhdysvallat, Norja	28,32,57–69
<b>Vetovoiman vähentäminen</b>			
<i>Voimalan näkyvyyden parantaminen</i>	4	Kanada, Norja, Yhdysvallat	70–73
<i>Elinympäristön interventio</i>	6	Espanja, Saksa, Skotlanti, Portugali	23,76,77,79–81
<i>Muut luontotyyppiin liittyvät toimenpiteet</i>	4	Espanja, Ruotsi	82,83,85,86
<b>Repowering – Voimaloiden uusiminen</b>			
<i>Repowering</i>	7	Ranska, Saksa, Ruotsi, Alankomaat, Sveitsi, Iso-Britannia, Yhdysvallat	69,87–92
<b>Kompensaatio eri sijainnissa</b>			
<i>Kompensaatio eri sijainnissa</i>	4	Yhdysvallat, Norja	87,93–95

## 4 TULOKSET JA PÄATELMÄT

Tuulipuistoinfrastruktuuriin liittyvien törmäysvaikutusten minimoimiseksi on olemassa useita lieventäviä toimenpiteitä. Näitä toimenpiteitä ovat: 1) voimaloiden sammutus, kun lintujen törmäysriski on suuri; 2) lintujen karkottaminen tuulipuistoalueelta törmäysvaaran minimoimiseksi; 3) voimala-alueen vetovoiman vähentäminen lisäämällä lapojen näkyvyyttä ja yksilöiden houkuttelemine muille alueille reviiirin houkuttelevuutta lisäävillä toimenpiteillä; 4) tuulivoimaloiden uusiminen korvaamalla useita vanhoja turbiineja pienemmällä määrällä korkeampia ja tehokkaampia malleja; ja 5) kompensatio, jotta villieläinpopulaatioille ei aiheutuisi nettotappiota. Nämä toimenpiteet ovat paikka- ja lajikohtaisia, minkä vuoksi niiden täytäntöönpanon olisi perustuttava kohdelajeista saatavilla olevaan tietoon ja alueen erityispiirteisiin. Niitä on sovellettu eri Euroopan maissa (muun muassa Belgiassa, Ranskassa, Saksassa, Norjassa, Ruotsissa), Oseaniassa (Australia) ja Amerikassa (Yhdysvallat), mutta niiden tehokkuutta ei ole juurikaan arvioitu. Kansainvälisesti ollaan yhtä mieltä siitä, että yksi tuulienergian laajentamisen suurimmista haasteista on suunnitella riittävät menetelmät ja käytännöt, joita käytetään rakentamisen jälkeisessä seurannassa (joita voitaisiin tukea automaattisilla lapojen törmäysten havaitsemisjärjestelmillä<sup>34</sup>), joiden avulla voidaan arvioida toteutettujen lieventämistoimenpiteiden tehokkuutta. Näin voitaisiin ehkäistä nykyistä tiedon puutetta aiheesta ja tukea päätöksiä, joita tehdään tulevissa tuulivoimahankkeissa.

Maakotkiin liittyen, yksityiskohtaisimmat ohjeet tuulienergian lieventämisstrategioista antaa Yhdysvaltain viranomaisen (US Fish and Wildlife Service, USFWS). Tämä kappale perustuu dokumentaatioon, jossa esitellään ja käsitellään perusteellisesti vaihtoehtoja Yhdysvalloissa käytetyn niin sanotun maakotkien "kaatamisen" (eng. "Take") lieventämiseksi, jotka tarjoavat hyödyllisiä oivalluksia ja toteutusmahdollisuuksia Suomelle ja muille maille. Yhdysvalloissa maakotka on laillisesti suojeltu laji, joten tämän lajin "kaataminen" (termi, joka sisältää "jahdata, ampuu, ampuu kohti, myrkyttää, haavoittaa, tappaa, vangita, ansoittaa, kerätä, ahdistella tai häiritä") on kielletty<sup>35</sup>. Tietyissä olosuhteissa on kuitenkin olemassa lupamääräyksiä, jotka voivat sallia satunnaisen (ei-tarkoituksenmukaisen) kaatamisen. Tällaisten lupien myöntämiseksi erityisesti maatuulivoimalle USFWS laati Eagle Conservation Plan (ECP) -ohjeet<sup>36</sup>. Tämä on yksityiskohtainen ohjeistus tuulivoimaloiden kotkiin kohdistuvien riskien arvioimiseksi ja lieventämiseksi, ja tuulienergian kehittäjien tulisi toimia sen mukaisesti, kun hankealueella havaitaan mahdollisesti vaarantuvia kotkia. Kehys perustuu samaan kolmivaiheiseen lieventämishierarkiaan, josta on keskusteltu yllä, mutta se tarjoaa vaihtoehtoja ja yksityiskohtia, jotka ovat ominaisia maakotkalle. **Taulukko 2** on sovellettu Allison ym. (2017) mukaan, jossa tarkasteltiin lieventämishierarkian kuhunkin vaiheeseen liittyviä mahdollisia vaihtoehtoja. Tuulivoimaloissa toteutettavien minimointi- ja vastatoimien käyttöön liittyy monia haasteita. Esimerkiksi ennustettujen tai ilmoitettujen kuolemantapausten määrä yksittäisissä voimaloissa on tyypillisesti pieni (mikä heijastaa myös lajin harvinaisuutta), mikä vaikeuttaa lieventävien toimien tehokkuuden arviointia. Allison ym. (2017) päättelivät, että näiden toimenpiteiden vaikuttavuutta tukevia tietoja ei yleensä ole, mikä tarkoittaa, että niiden todellista tehokkuutta, ja siten luotettavuutta, ei tunneta. Tämä haaste voitaisiin ratkaista yhdistämällä tutkimustoimia ja koordinoituja toimia useiden tuulivoimahankkeiden välillä maakotkien ja myös vastaavien lajien eduksi. On todellakin olemassa uudempia tutkimuksia (katso alla olevat osiot), joissa raportoidaan lupaavista strategioista vaikutusten lieventämiseksi.

Taulukko 2. Alla olevassa taulukossa on esitetty useita lieventämisvaihtoehtoja, joita on virallisesti suositeltu tuulienergiavaikutusten välttämiseksi, minimoimiseksi tai kompensoimiseksi maakotkaan Yhdysvalloissa.

<b>Askel 1: Vältä 2: Minimoi 3: Kompensoi</b>	<b>Vaihtoehto</b>	<b>Kuvaus</b>
1	Voimaloiden sijoittelu	Vältä lintujen paljon käyttämiä alueita.
1	Voimaloiden lukumäärän vähentäminen	Vähennä voimaloiden määrää projektissa.
2	Haaskojen poisto	Vähennä saaliin saatavuutta yrittääksesi vähentää kotkan toimintaa projektialueella. Paranna saaliin saatavuutta projektialueen ulkopuolella (riittävän kaukana).
2	Linnunpelättimet	Asenna pelättimiä esimerkiksi tukivajereihin.
2	Pesän hallinta	Estä tuleva pesänrakennus muokkaamalla sopivia pesäpaikkoja (esim. poistamalla puita).
2	Voimaloiden käytön hallinta	Pysäytä voimalat silloin, kun törmäysriski on kasvanut.
2	Voimaloiden siirto	Siirrä voimalat, joiden lähellä kotka on aktiivinen. Tämä voidaan tehdä uudelleen asennuksen aikana, kun vanhat voimalat korvataan nykyaikaisilla.
2	Karkotusmenetelmät	Käytä karkotusmenetelmiä ja automatisoituja järjestelmiä sekä kotkan havaitsemiseen, että karkottamiseen voimaloiden läheisyydestä.
3	Voimajohdon siirto	Siirrä voimajohtoja törmäysten estämiseksi.
3	Raatojen poistaminen tieltä	Poista raatoja tieltä ajoneuvojen iskujen vähentämiseksi.
3	Saaliin elinympäristön parantaminen	Hallitse saalispopulaatioita kotkan tuottavuuden lisäämiseksi.

Alla olevissa osioissa kuvataan yksityiskohtaisesti rakentamisen jälkeiset lieventämistoimenpiteet, joita on sovellettu petolintuihin (mukaan lukien maakotka), jotka on luokiteltu viiteen lähimmäistapaan: 1) käytön rajoittaminen (voimalan sammutus); 2) karkotteet; 3) alueen vetovoiman heikentäminen; 4) voimaloiden uusiminen; ja 5) kompensoitio eri sijainnissa.

## 4.1 Voimaloiden käytön rajoittaminen

Eiiten sovellettu ja testattu toimenpide on voimaloiden sammuttaminen aikana, jolloin törmäysriski on kasvanut. Nämä ajanjaksot voidaan määritellä eri kriteerien mukaan: kausiluonteisuus (esim. massamuuton aikana; Liechi ym., 2013), sääolosuhteet (esim. sumu, tuuli tai sade; Ashwanden ym., 2018; Hayes ym., 2019) tai lajien esiintyminen ja käyttäytyminen (tiedyt lajit ovat alttiimpia törmäyksille, esimerkiksi petolinnut) <sup>29</sup>. Erityisesti lintujen havaitseminen voidaan suorittaa joko maastotarkkailijoilla, automaattisilla antureilla, kuten kameroilla tai mikrofoneilla (kuva- tai akustiset) tai tutkilla (tutkapohjaiset järjestelmät), tai käyttämällä lintujen GPS-tunnisteita (biotelemetriset järjestelmät). Alla esittelemme yleisimmät järjestelmät, joita on käytetty ja testattu lintujen toiminnan seurantaan tuulivoimaloiden lähellä ja voimaloiden automaattiseen sammuttamiseen. Kokoamme jokaiselle järjestelmälle tieteellisen näytön niiden tehokkuudesta (siten kun ne olivat olemassa), ja esitämme niiden edut ja rajoitukset, jotka on koonnut Collier ym. (2011) <sup>40</sup> ja BirdLife International <sup>41</sup>.

### 4.1.1 Tarkkailijat maastossa

Voimaloiden sammutusjaksojen määrittämiseen on palkattu ihmistarkkailijoita, jotka kommunikoivat tuulipuiston valvontatoimiston kanssa sammuttaakseen riskialttiit voimat. Tätä toimenpidettä on käytetty eri maissa, kuten Australiassa, Norjassa, Portugalissa, Espanjassa ja Sveitsissä <sup>37,41,42</sup>. Erityisesti sen on koettu olevan hyödyllinen Cádizissa (Espanja) vähentämällä korppikotkakuolleisuutta 50 %, minkä seurauksena energian kokonaistuotanto vähenee vain 0,07 % vuodessa <sup>15</sup>. Kenttätarkkailijoihin perustuvien lähestymistapojen tärkeimmät rajoitukset ovat se, että ne ovat työvoimavaltaisia, ne rajoittuvat hyvän näkyvyyden jaksoihin (eli päivänvaloon ja hyviin sääolosuhteisiin) ja ne edellyttävät tarkkailijoilta asiantuntemusta, jota ei ehkä aina ole saatavilla. Tämän seurauksena ihmistarkkailijat on viime aikoina korvattu automaattisilla järjestelmillä, jotka valvovat tuulipuiston ympäristöä tutkilla tai videokameroilla ja mikrofoneilla (kuvapohjaiset tai akustiset), ja pysäyttävät voimat reaaliajassa, kun he havaitsevat törmäysriskitilanteen.

### 4.1.2 Kuvapohjaiset tai akustiset järjestelmät

**IdentiFlight** ([www.identiflight.com](http://www.identiflight.com)) on kuvapohjainen valvontajärjestelmä, joka on myös automaattinen pysäytysjärjestelmä - kamerajärjestelmä, joka havaitsee lentävät kohteet, luokittelee ne ja päättää, rajoitetaanko yksittäisiä voimaloita mahdollisen törmäyksen välttämiseksi. McClure ym. (2021) havaitsi, että törmäyskuolemien määrä väheni 82 % (75 %-89 %) paikoissa, joissa oli automaattinen rajoitus, verrattuna tarkistuspaikkaan (ilman automaattista rajoittamista). Vaikka automaattinen rajoittaminen vähensi kuolemantapauksia tässä tutkimuksessa, ne eivät loppuneet kokonaan. Tämä voi johtua siitä, että IdentiFlight-järjestelmä ei pysty tunnistamaan lintulajeja tarkasti, koska esimerkiksi sen on testattu luokittelevan kotkia virheellisesti muiksi linnuiksi (väärä negatiivinen osuus 6 %) ja muita lintuja kotkiksi (väärin positiivisten osuus 28 %; McClure ym., 2018).

Toinen kuvapohjainen järjestelmä on **DTBird** ([www.dtbird.com](http://www.dtbird.com)), joka on kehitetty havaitsemaan lentäviä lintuja ja toteuttamaan ohjelmoituja toimia lintujen törmäysten vähentämiseksi. Järjestelmä sisältää neljä moduulia, joista jokaisella on erityinen toiminto: 1) Havaitseminen ja varoitus (valvoo jatkuvasti valvonta-aluetta ja havaitsee lentävät linnut reaaliajassa); 2) Varoitava vaikutus (antaa varoitus- tai häirintäsignaaleja niin kauan kuin lintujen havaitaan lentävän kohtalaisen tai suuren törmäysriskin alueilla tuulivoimalan ympärillä); 3) Voimalan pysäytysohjaus (lähettää pysäytysignaalin tuulivoimalalle, kun keskikokoisten tai suurten lintujen, mukaan lukien useimpien petolintujen, havaitaan lentävän törmäysriskialueille); 4) Törmäyksenhallinta (tallentaa keskikokoisten ja suurten lintujen, mukaan lukien useimpien petolintujen, mahdolliset törmäykset tuulivoimalan kanssa).

May ym. (2012) arvioi, kuinka hyvin DTBird-järjestelmä pystyy havaitsemaan lintuja tuulivoimalan läheisyydessä, ja arvioi, missä määrin sitä voidaan käyttää voimalan lähellä olevien lintujen lentokäyttäytymisen ja mahdollisen pelotteen tutkimiseen <sup>45</sup>. Arviointi perustui videojaksoihin, jotka oli tallennettu DTBird-järjestelmällä, jotka oli asennettu kahteen tuulivoimalaan Smølan tuulipuistossa (Norja), sekä merikotkien GPS-telemetriatietoihin ja lintututkatietoihin. Keskimääräinen väärin positiivisten tulosten määrä oli 1,2 päivässä, ja päiväsaikaan DTBird-järjestelmä kirjasi 76–96 % kaikista lintujen lennoista voimaloiden läheisyydessä. Videojaksoissa tallennettujen lintujen lentojen visuaalisesti arvioitujen etäisyyksien arvioitiin yleensä olevan kauempana voimaloista verrattuna etäisyysasetuksiin, joita käytettiin ohjelmistokokoonpanossa kohtalaisen (hälytys) ja korkean (varoitusta) törmäysriskialueen määrittämiseen. Tämä johti laukaistujen hälytys-/varoitusta signaalien suureen määrään, mikä voi johtaa yksilöiden tottumiseen, jos sitä esiintyy usein ei-riskitilanteissa.

IdentiFlight ja DTBird ovat kaksi eniten käytettyä ja testattua kuvapohjaista järjestelmää, joiden edut ja rajoitukset on koottu **Taulukkoon 3**. On olemassa myös muita kuvapohjaisia järjestelmiä, jotka ovat olleet tai ovat parhaillaan kehitteillä, mukaan lukien: 1) Thermal Animal Detection System (TADS), joka on infrapuna (terminen) kuvantamisjärjestelmä; 2) Visual Automated Recording System (VARS), joka käyttää liiketunnistuksen infrapuna (aktiivinen infrapuna) videokameroita yhdessä infrapunalamppujen kanssa; ja 3) Akustinen/termografinen offshore-valvontajärjestelmä (ATOM), joka koostuu infrapunavideokameroista ja mikrofoneista, jotka tallentavat sekä kuultavan että ultraäänen, jota on käytetty lepakoille <sup>39–41,46</sup>. Infrapunakuvausjärjestelmien etuna on, että ne mahdollistavat havaitsemisen pimeän ja huonon näkyvyyden aikana. Niillä on kuitenkin korkea väärin positiivisten havaitsemisaste (jopa 97 % <sup>40</sup>), niillä on rajallinen näkökenttä ja ne vaativat ihmisen tulkintaa, joka voi olla aikaa vievää, jos tapahtumien määrä on suuri. Lisäksi kaikkien edellä mainittujen järjestelmien pääasiallinen rajoitus on, että niiden tehokkuutta on harvoin arvioitu, ne ovat hyvin varhaisessa kehitysvaiheessa ja niiltä puuttuu erityisiä sammutusmoduuleja.

Taulukko 3. Kuva- ja tutkapohjaisten järjestelmien edut ja rajoitukset.

	Edut	Rajoitukset
Kuvapohjainen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voidaan käyttää alueilla, joilla on rajoituksia tutkan käytölle</li> <li>• Voi antaa tietoa sekä mikrovälittelystä että törmäyksistä.</li> <li>• Visuaalisten valokameroiden resoluutio, joka todennäköisesti tuottaa hyviä kuvia käytettäväksi lajien tunnistamisessa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vaikeus havaita matalalla lentäviä, pieniä ja nopeasti lentäviä lintuja, joiden erilaiset taustat ovat epävarmoja.</li> <li>• Havaitsemistapahtumat edellyttävät ihmisen tulkintaa sen päättelemiseksi, tapahtuiko törmäys. Havaintojen määrästä riippuen tämä voi olla aika kallista.</li> <li>• Soveltuu vain päiväkäyttöön</li> <li>• Rajoitettu näkökenttä ja etäisyys. Useita järjestelmiä saatetaan tarvita useille turbiineille suurten tarpeettomien seisokkien estämiseksi.</li> <li>• Ylläpito- ja huoltokustannukset, kuten kameroiden puhdistaminen ankarissa ympäristöissä.</li> </ul>
Tutkapohjainen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voi antaa tietoa mikrovälittelystä sekä päivällä että yöllä</li> <li>• Useiden voimaloiden kattavuus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ei tietoa lajeista tai absoluuttisista luvuista</li> <li>• Vaatii aikaa tutkan ja asetusten alkuasennukseen ja hienosäätöön</li> </ul>
Kuva- ja tutkapohjaiset	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toimii jatkuvasti</li> <li>• Täysin automatisoitu sammutus</li> <li>• Voidaan käyttää etänä</li> <li>• Kuvat voidaan tallentaa validointia tai viittausta varten, ja ne voidaan syöttää takaisin analyttisiin algoritmeihin ja sammutuskriteereihin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Järjestelmän ja asennuksen alkukustannukset</li> <li>• Voi olla toivottavaa suorittaa rinnakkainen validointi riippumattomien tarkkailijoiden kanssa</li> <li>• Havaitseminen voi olla rajoitettua huonon näkyvyyden aikana (esim. sade tai sumu)</li> </ul>

#### 4.1.3 Tutkapohjaiset järjestelmät

**Merlin Avian Radar -järjestelmän** ([www.detect-inc.com](http://www.detect-inc.com)) on kehittänyt DeTect, Inc., ja se käyttää edistynyttä lintututkatekniikkaa lintujen ja lepakoiden havaitsemiseen ja seuraamiseen reaaliajassa käyttämällä samanaikaisia pysty- ja vaakasuuntaisia skannaustutkia. Tämä tutkajärjestelmä voidaan ohjelmoida sääntöjoukolla, joka perustuu tuulipuistolle ominaisiin korkean törmäysriskin olosuhteisiin. Kun tämä sääntöjoukko täyttyy käytön aikana, MERLIN-ohjelmisto käyttää alan standardia Modbus-tiedonsiirtoprotokollaa kommunikoidakseen tuulipuiston SCADA-järjestelmän (Supervisory Control and Data Acquisition) kanssa käynnistääkseen erilaisia reagointitoimia, jotka vaihtelevat tuulipuiston operoijan varoittamisesta voimalan tai voimalaryhmien suoraan hallintaan

<sup>47</sup>. May ym. (2017) arvioi Merlin Avian Radar:n <sup>48</sup> havaitsemisominaisuuksia. He päättelivät 50 % havaitsemistodennäköisyyden 2 340 metrin säteellä tutkasta. He havaitsivat kuitenkin, että tämä havaintoalue vaihteli ilmakehän olosuhteiden, ympäristön (esim. topografian), lintujen alueellisen jakautumisen ja lintujen koon mukaan, sillä pieniä lintuja voidaan havaita 0,5–1 km etäisyydellä, kun taas suuria lajeja voidaan havaita jopa 1,5–2 km:n päässä tutkasta. Samanlaisia kynnysarvoja on annettu muissa tutkimuksissa, joissa käsitellään tämän ja muiden tutkapohjaisten järjestelmien havaitsemistodennäköisyyttä. Esimerkiksi Geringer ym. (2016) havaitsi, että Merlin-lintututka havaitsi suurimman osan 3-4 km:n säteellä tutkasta havaituista petolinnuista, mutta niitä pystyttiin seuraamaan alle 30 % havaitusta ajasta <sup>49</sup>. Samoin, Beason ym. (2010) havaitsivat, että **Accipiter® eBirdRadilla** ([www.accipiterradar.com](http://www.accipiterradar.com)) oli 50 % havaitsemisen todennäköisyys 5,5 km:n sisällä <sup>50</sup>, mutta havaitsi, että vain 15 % yksittäisten lintujen tai lintuparviin havainnoista (142 havaintoa 972:sta) seurattiin tutkilla ja kaikki sijaitivat alle 4,8 km:n päässä <sup>51</sup>. Viimeisenä, **Robin 3D Flex Bird -tutkan** havaitsemistodennäköisyys oli 50 % 1,5 km:n sisällä <sup>52</sup>. Muita tutkapohjaisia järjestelmiä ovat **STRIX Birdtrack®** ([www.strixinternational.com](http://www.strixinternational.com)), Swiss Birdradar ([www.swiss-birdradar.com](http://www.swiss-birdradar.com)) sekä muut X-kaistan meritutkat <sup>53</sup>. Lopuksi säävalvontatutkaverkkojen käyttö voi antaa tietoa tuulienergian kehityksen sijoitus- ja lieventämistoimenpiteistä yöllä liikkuvien lintujen törmäysriskin minimoimiseksi <sup>38,54,55</sup>. Niiden yhteyttä voimalan automaattiseen sammutukseen ei kuitenkaan ole vielä kehitetty. Tutkajärjestelmien edut ja rajoitukset verrattuna kuvapohjaisiin järjestelmiin on esitetty **Taulukossa 3**.

#### 4.1.4 Biotelemetriset järjestelmät

Sheppard ym. (2015) ehdotti järjestelmää lintujen törmäysvaikutusten lieventämiseksi tuulivoimaloissa käyttämällä lintujen GPS-tunnisteita ja reaaliaikaisia virtuaalirajaita (geofences) <sup>56</sup>. Geoaita on virtuaalinen raja, joka on rajattu kiinnostavan alueen ympärille ja joka laukaisee automaattisen hälytyksen, kun kohde-eläin ylittää rajan reunan. Geoaidat voidaan rajata kynnysetäisyydelle tuulivoimaloista, ja järjestelmä lähettää automaattisesti tekstiviestihälytyksen käyttäjälle. Autonomisen GPS-geofence-hälytysjärjestelmän suurin rajoitus on, että kohteet ovat pannaotettava GPS:llä, joten yksilöt tulee ottaa kiinni. Lisäksi tutkimusalueella vierailevat ulkopuoliset kohteet, joita ei ole GPS-merkitty, jäävät huomaamatta, joten törmäysriskiä ei lievennetä näissä tilanteissa. Lopuksi, vaikka nämä tekniikat luovat itsenäisen hälytyksen, kun yksilöt ovat ylittäneet voimaloiden ympärillä olevat tietyt rajat, se ei laukaise voimalan automaattista sammutusta.

## 4.2 Pelotevaikutus

Ehkäisevillä lieventävillä toimenpiteillä pyritään kiinnittämään lintujen huomio ja pelottamaan lintuja ja muita eläimiä, jotta estetään niiden pääsy tietyille alueille (esim. tuulipuistoon). Tässä esittelemme lieventämistoimenpiteet, jotka perustuvat akustisiin, sähkömagneettisiin ja visuaalisiin menetelmiin.

### 4.2.1 Akustiset, sähkömagneettiset ja visuaaliset lähestymistavat

Pelotelaitteita on käytetty laajalti villieläinten hallinnan työkaluina <sup>28,32,57,58</sup>. Tähän mennessä on käytetty kolmenlaisia pelotteita: akustisia, sähkömagneettisia kenttiä ja visuaalisia (valo ja laserit). Erityisen pelotteen käytön olisi perustuttava kohdelajien biologiaan ja ekologiaan, ja ne voidaan aktivoida ihmisen havainnoinnilla tai automaattisilla reaaliaikaisilla seurantajärjestelmillä ensimmäisenä pelotteena ennen voimalan sammuttamista (ks. esimerkiksi DTBird kohdassa 4.1 Curtailment: voimalan sammuttaminen). Suurin pelotelaitteiden käyttöön liittyvä huolenaihe on villieläinten mahdollinen tottuminen, mikä johtaisi sen tehokkuuden pienentymiseen sekä vaaroihin, joita sillä voi olla villieläimille ja jopa ihmisille <sup>29</sup>.

**Akustisia karkotteita** pidetään tehokkaampina kuin kevyitä tai sähkömagneettisia pelotteita, etenkin biologisesti merkittävässä tapauksissa, vaikka niiden pitkäaikainen käyttö on osoittautunut tehottomaksi villieläinten tottumisen vuoksi<sup>31,57,59</sup>. Hätkäksut, saalistajien äänet, pyrotekniikka ja ampumisen äänet voivat olla erittäin tehokkaita linnuille<sup>29</sup>, kun taas ultraäänilaitteet voivat olla hyödyllisiä lepakoille (Arnett ym., 2013; Romano ym., 2019; Weaver, 2019). Pitkän kantaman akustiset laitteet (LRAD) on testattu tuulipuistossa Cádizissa (Espanja), jossa 60 %:lla korppikotkista oli voimakkaita reaktioita laitteeseen, vaikka niiden tehokkuus riippui etäisyydestä laitteeseen<sup>63</sup>. Akustisia karkotteita on testattu myös merituulipuistoissa merinisäkkäiden karkottamiseksi ja akustisen traumareaktoriskin vähentämiseksi rakennusvaiheessa<sup>64–66</sup>.

**Sähkömagneettiset pelotteet** koostuvat mikroaaltosignaalien, magneettisten tai sähkömagneettisten aaltojen käytöstä<sup>29</sup>. Nämä pelotteet on testattu lepakoilla ja ehdotettu linnuille niiden etujen vuoksi: ne ovat hyödyllisiä päivällä ja yöllä, ja läpäisevät sumun ja pilvet. Huolenaiheina kuitenkin ovat niiden mahdolliset vaikutukset luonnonvaraisten eläinten kehitykseen, lisääntymiseen ja fysiologiaan<sup>67–69</sup>.

Viimeisenä, **visuaalisia pelotteita**, kuten valoja, kiiltäviä laitteita ja lasereita, on myös ehdotettu välineiksi lintujen karkottamiseen<sup>28,58</sup>. Tämäntyyppisten pelotteiden pääasiallinen rajoitus on, että ne ovat hyödyllisiä yöllä, mutta eivät päivänvalossa. Lisäksi näitä pelotteita ei ole juurikaan arvioitu, ja niiden tehokkuutta tällaisissa infrastruktuureissa ei tunneta<sup>29</sup>.

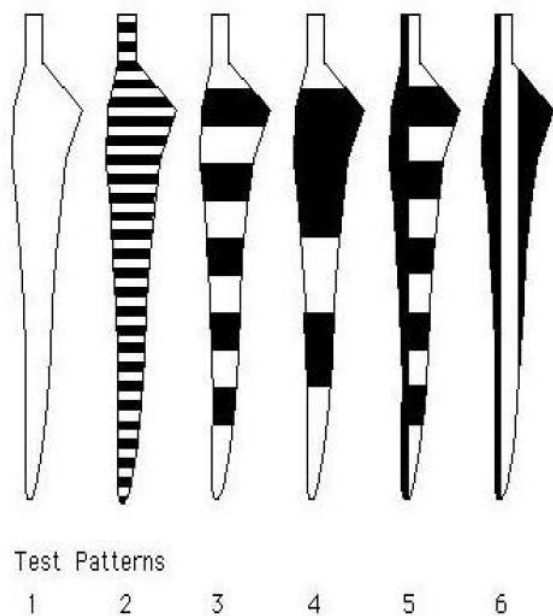
### 4.3 Vetovoiman välttäminen

Seuraavaksi esitetyillä strategioilla ei pyritä hälyttämään tai pelottamaan villieläimiä, vaan välttämään eläinten tuleamista tuulipuistoalueelle toimilla, kuten voimaloiden näkyvyyden lisäämisellä (valaistus, lapojen maalaus) tai soveltamalla elinympäristön hoitotoimia, joilla pyritään vähentämään turbiineja ympäröivän elinympäristön houkuttelevuutta kohdelajien kannalta.

#### 4.3.1 Voimalan näkyvyyden parantaminen

Yksi yleisimmistä toimenpiteistä törmäysten minimoimiseksi on lisätä tuulivoimaloiden lapojen näkyvyyttä, jotta linnut (tai lepakot) voivat havaita siivet ajoissa välttääkseen tuulipuistoalueen, mikä lopulta vähentää törmäyskuolemia. Voimalan näkyvyyttä voidaan parantaa maalaamalla tuulivoimaloiden lapoihin kuvioita, jotta voidaan rikkoa luonnonvalkoisten lapojen tasavärisyys, tai mukauttamalla lentoestevaloja väriltään ja voimakkuudeltaan. McIsaac (2000) teki erilaisia tutkimuksia, joissa käsiteltiin petolintujen näöntarkkuutta ja kykyä nähdä tuulivoimaloiden lapoja, käyttäen amerikantuulihaukkaa (*Falco sparverius*) ja punahäntähaukkaa (*Buteo jamaicensis*) mallilajeina<sup>70</sup>. Lisäksi he testasivat erilaista lapakuviosta näkyvyyttä amerikantuulihaukalle. Kirjoittajat päättelivät, että petolinnut eivät välttämättä näe selvästi voimalan lapoja joissakin olosuhteissa ja että suurikontrastisten kuvioiden soveltaminen voimalan lapoihin voi lisätä lapojen näkyvyyttä. Erityisesti lapakuviot, joissa osat kulkevat lapojen leveydellä, olivat yleensä näkyvämpiä kuin ne, joissa on lapojen pituuden mittaisia muotoja, ja ne, joissa on tasaväriset lavat (kuviot 2–4 **Kuviossa 1**). Näiden tutkimusten tekijät eivät kuitenkaan käsitelleet lapakuvioiden tehokkuutta törmäyskuolemien minimoinnissa.





**Kuvio 1.** Vasen: Ärsykelapakuviot. Saatu Mclsaacilta (2000). Oikealla: Tuulivoimala maalatulla roottorin lavalla <sup>71</sup>.

Uudehkossa tutkimuksessa, May ym. (2020) ovat testanneet kontrastimaalauksen tehokkuutta maalaamalla yhden roottorin lavoista mustaksi (**Kuvio 1**) lintujen törmäysten vähentämiseksi <sup>71</sup>. Tämän tutkimuksen tulokset viittaavat siihen, että vuotuinen kuolleisuus väheni maalatulla lavalla varustetuissa voimaloissa yli 70 %, mikä vähensi useiden lintujen törmäysriskiä. Tulokset osoittivat kuitenkin, että vuotuiset kuolleisuusluvut vaihtelivat huomattavasti vuosien välillä ja sisällä, joten kirjoittajat korostavat pitkäaikaisten tutkimusten tarvetta vankkojen ja vakuuttavien tulosten saamiseksi. Samoin ultraviolettiheijastavaa maalia on ehdotettu lapojen näkyvyyden lisäämiseksi, mutta niiden tehokkuutta ei ole testattu tuulivoimaloissa, ja näyttää siltä, että se ei ole menetelmä, joka toimii haavoittuvimmille lajeille, kuten korppikotkille <sup>31</sup>.

Toisaalta lentoestevalojen mukauttamista väriltään ja voimakkuudeltaan on ehdotettu mahdolliseksi tehokkaaksi toimenpiteeksi. Esimerkiksi Gehring ym. (2009) havaitsivat, että torneissa, joissa oli vain vilkkuvia valoja, oli vähemmän lintujen kuolemantapauksissa, ja he ehdottavat vilkkumattomien valojen poistamista lintujen kuolemantapausten vähentämiseksi tietoliikennetorneissa <sup>72</sup>. Tämän tutkimuksen tulokset viittaavat siihen, että vilkkuvalla valolla varustetut tornit saattavat olla linnuille näkyvämpiä kuin ne, jotka ovat varustettu vilkkumattomilla valoilla. Ainoa tuulipuistoissa tehty tutkimus viittaa kuitenkin siihen, että lintujen törmäysnopeuksissa ei ole eroja vilkkuvilla punaisilla valoilla varustettujen voimaloiden välillä verrattuna voimaloihin, joissa ei ole valaistusta <sup>73</sup>. Lisäksi voimaloilla, joissa on valot, näyttää olevan suurempi törmäysriski joillekin linnuille, erityisesti yöllisille muuttolinnuille, joita nämä valot näyttävät houkuttelevan <sup>74</sup>. Sen vuoksi käytettävissä olevan työn rajallisuus estää luotettavien johtopäätösten tekemisen tämän lieventävän toimenpiteen tehokkuudesta lintujen törmäysten vähentämisessä, ja tästä aiheesta tarvitaan lisätutkimuksia ennen sen täytäntöönpanoa.

#### 4.3.2 Luontotyyppiin liittyvät toimet: laitosalueella ja sen ulkopuolella

Elinympäristöä koskevat toimenpiteet jakautuvat kahteen päälähestymistapaan, joista ensimmäisen tarkoituksena on tehdä tuulipuiston sisäisistä alueista vähemmän houkuttelevia linnuille ja toisen, jonka tarkoituksena on tehdä tuulipuiston ulkopuolisista alueista houkuttelevampia linnuille. Luontotyyppitoimenpiteillä katsotaan olevan suuri potentiaali vähentää törmäysriskiä herkillä lajeilla, joilla on huomattavat luontotyyppimieltymykset <sup>75</sup>. Elinympäristön interventiotutkimusten yleinen hahtapuoli on, että ne perustuvat usein lyhytaikaisiin tietoihin, pieneen otoskokoan ja rajalliseen tutkimusalueeseen. Lisäksi luontotyyppitoimien tehokkuus on todennäköisesti paikka- ja lajikohtaista (ja edellyttää lisätutkimuksia), joten tietyn lieventävän toimenpiteen täytäntöönpano on tehtävä tapauskohtaisesti.

Suurimpia petolintuja tiedetään houkuttelevan alueet, joilla on suuri saalistiheys, ja jos tällaisia alueita esiintyy tuulipuistoissa tai niiden lähellä, törmäysriski on lisääntynyt. Jos nämä alueet voidaan tunnistaa, on mahdollista yrittää muuttaa lintujen käyttäytymistä ja vähentää lintujen altistumista törmäyksille välttämällä riskialttiita alueita tuulipuistossa. Saman suuntaisesti useissa tutkimuksissa on ehdotettu elinympäristöihin kohdennettuja toimenpiteitä, joilla pyritään vähentämään saalistihyettä tuulipuistoissa. Siksi tämäntyyppisen elinympäristöintervention tavoitteena on vähentää lintujen toimintaa tuulipuistoalueella ja siirtää tämä toiminta hankkeen vaikutusalueen ulkopuolisille alueille. Lajien tarpeiden ymmärtäminen tilankäytön, elinympäristön vaatimusten ja ravintovarojen suhteen on välttämätöntä kaikkien elinympäristöihin liittyvien toimenpiteiden onnistumisen kannalta.

Espanjassa Pescador ym. (2019) tutkivat yksinkertaisen ja edullisen elinympäristön interventiotimenpiteen tehokkuutta törmäyskuolleisuuteen pikkutuulihaukalle (*Falco naumanni*) <sup>76</sup>. Kolmessa eri tuulipuistossa (yhteensä 99 voimalaa) maa-ainesta muokattiin pinnallisesti tiettyjen voimaloiden pohjan ympärillä nurmikasvillisuuden poistamiseksi. Tämän toimenpiteen tarkoituksena oli vähentää pikkutuulihaukkojen ruokintaan mahdollisesti käytettävien hyönteisten runsautta ja siten vähentää voimalaympäristön houkuttelevuutta. Muokattujen ja muokkaamattomien voimaloiden vertailu paljasti, että törmäykset vähenivät 75–100 % kolmessa tuulipuistossa, eikä voimaloissa, joissa ympäristö muokattiin, havaittua törmäyksiä.

Mammen ym. (2011) tutkivat isohaarahaukkojen (*Milvus milvus*) liikeratoja viiden Saksassa maatalouspelloille asennetun tuulipuiston läheisyydessä <sup>77</sup>. Tämän lajin törmäysriskin vähentämiseksi kirjoittajat suosittelivat 1000 metrin puskurin lisäksi rajoittamaan maatalouden hoitotoimia tuulipuistoissa (esim. välttämällä niittoa ennen heinäkuun puoliväliä). Tämä rajoittaisi isohaarahaukkojen esiintymistä tuulipuistoalueella, koska tämä laji saalistaa pääasiassa avoimilla alueilla <sup>78</sup>.

Tuulipuistoalueen ulkopuolella tapahtuvilla elinympäristötoimenpiteillä pyritään vetämään herkkiä lajeja pois voimalaympäristöstä. Tämäntyyppisessä elinympäristöinterventiossa luodaan lisää ruokintamahdollisuuksia tai tehdään parannusalueen ravinnonhaku ympäristöistä parempia kuin laitosalueen, joka auttaa vähentämään törmäysriskiä siirtämällä lajien toimintaa vähemmän vaarallisille alueille <sup>29</sup>. Alueen ulkopuoliset elinympäristötoimet edellyttävät yhteisiä hoitotoimia tuulipuistojen ja parannusalueiden välillä, ja niitä voidaan soveltaa yhdessä laitosalueella toteutettavien elinympäristötoimien kanssa.

Walker ym. (2005) raportoivat monivuotisesta tutkimuksesta (1997–2004), jossa seurattiin maakotkaparia Skotlannissa, tämän lajin välttämiskäyttäytymisestä 46 voimalan tuulipuiston alueella (255 hehtaaria) <sup>23</sup>. Tuulipuisto rakennettiin kotkien reviirille (etäisyyttä lähimpään pesään ei annettu). Tutkimus perustui rakentamista edeltävään ja sen jälkeiseen vaiheeseen. Kirjoittajat

havaittiin, että kotkat näyttivät välttävän tuulipuistoa (muuttaen siten aiempaa tilankäyttöään) lentäen tuulipuiston yli vasta, kun muut kotkat saapuivat heidän alueelleen. Osa niiden tilankäytöstä oli päällekkäistä tuulipuiston kanssa, mutta ei ydinaluetta (joka kattoi pesäpaikat). Metsäistutusalue (n. 280 hehtaaria) kaadettiin osana elinympäristön interventiosuunnitelmaa, jonka tarkoituksena oli lisätä kotkien saaliiden runsautta (esim. nummiriekko *Lagopus scoticus* ja teeri *Tetrao tetrix*) ja vähentää törmäysriskiä. Tämä alue sijaitsi lähellä tuulipuistoa. Puiden kaatamisen jälkeen kotkat käyttivät tätä aluetta kolme kertaa aiempaa useammin, ja kotkien tilankäytön muutos oli pois päin tuulipuistosta. Tutkimuksen suuri haittapuoli pienen otoskoon lisäksi on se, että puiden raivaus osui suunnilleen samaan aikaan tuulipuiston rakentamisen kanssa. Tämän vuoksi on vaikea ymmärtää, missä määrin kotkat reagoivat elinympäristön parantamiseen ja/tai tuulipuiston rakentamiseen. Ennen rakentamista tehdyt kenttähavainnot viittaavat kuitenkin siihen, että rakentamiseen valittu paikka ei ollut millään kotkien päälentoreitillä, mikä ehkä auttaa selittämään tuulipuistoalueen välttämistä ja vetovoimaa alueelle, jolla on uusia ruokintamahdollisuuksia.

Portugalissa tehtiin neljään maakotkaan perustuva kokeellinen kenttätutkimus, jossa arvioitiin elinympäristön ennallistamisen tai parantamisen toteutettavuutta lieventävänä toimenpiteenä, jolla vähennetään tämän lajin törmäysriskiä tuulipuistoissa<sup>79</sup>. Kanipopulaatioita (jotka ovat keskeinen ravinto useille suurimmille uhanalaisille petolinnuille, mukaan lukien maakotka) pyrittiin palauttamaan kahdella tutkimusalueella, ja elinympäristön hoito varmisti, että alueet pidettiin sopivina saalislajeille. Hoitoalueita ja valvonta-alueita vertailtiin kolmen vuoden ajan. Valvonta-alueet olivat lähellä voimalinjoja, jotka toimivat tässä tutkimuksessa kotkien uhkalähteenä. Koska hoidetut alueet tarjosivat parempia ruokintamahdollisuuksia (kohdennetun toiminnan ansiosta), kaikki kotkat käyttivät näitä alueita intensiivisesti, ja valvonta-alueiden käyttö väheni. Tämän tutkimuksen myönteisten tulosten jälkeen tätä toimenpidettä alettiin soveltaa portugalilaisessa tuulipuistossa (tarkempia tietoja ei raportoitu).

Skotlannissa osana lieventämissuunnitelmaa perustettiin elinympäristön parannusalue (235 hehtaaria), jolla puututaan 35 voimalan tuulipuiston mahdollisiin vaikutuksiin kanalintuihin (*Circus cyaneus*)<sup>80</sup>. Elinympäristön parannusalue luotiin (ennen tuulipuiston rakentamista) talousmetsien hakkuilla, ja sen käyttö kanalintujen keskuudessa lisääntyi huomattavasti tuulipuiston rakentamisen jälkeen. Kanalinnut jatkoivat kuitenkin tuulipuistoalueen johdonmukaista käyttöä, koska niiden lentotoiminta tuulipuistoalueella ei ollut erilaista ennen rakentamista ja sen jälkeen, ja monet pesintäryitykset tapahtuivat 500 metrin säteellä toimivista voimaloista. Tämä siirtymävaikutusten puute heijastaa todennäköisesti samanlaisia ruokintamahdollisuuksia, joita parannusalue tarjoaa ja tuulipuistoalue (koska mitään toimia ei toteutettu saaliin saatavuuden vähentämiseksi tuulipuistoalueella).

Portugalissa tuulipuistossa suoritetun pitkäaikaisen seurannan jälkeen paljastui korkeita kuolleisuusarvioita tuulihaukalla (*Falco tinnunculus*), jotka voivat vahingoittaa tämän lajin paikallista populaatiota. Tuulihaukan osoitettiin usein saalistavan tuulivoimaloiden ympärillä olevilla avoimilla alueilla, ympäristön pensaikon sijaan. Sekä laitosalueella että sen ulkopuolella toteutettavien luontotyyppitoimenpiteiden yhdistelmää pidettiin parhaana vaihtoehtona kuolemantapausten vähentämiseksi, jotta lentotoiminta saataisiin siirrettyä pois tuulipuistoalueelta. Näin ollen toimenpiteisiin kuului pensaikkolajien istuttaminen voimalaympäristöön ja tuulipuistoalueen ulkopuolella sijaitsevien pensaikkoalueiden raivaaminen vuohen laiduntamisen avulla. Tämän lieventämissuunnitelman tehokkuutta ei varmistettu tutkimuksen aikana<sup>81</sup>.

#### 4.3.3 Muut luontotyyppiin liittyvät toimenpiteet

Useita muita luontotyyppeihin liittyviä toimenpiteitä on sovellettu tuulienergiayhteyksiin huomattavalla tai lupaavalla menestyksellä. Espanjassa korppikotkien intensiivisesti käyttämän kaatopaikan sulkeminen (tuulivoimaloiden läheisyydessä) vaikutti osaltaan niiden tilankäytön muutokseen ja vähensi siten törmäyskuolleisuuden riskiä<sup>82</sup>. Martínez-Abraín ym. (2012) suosittelevat, että ruokinta-asemat, jotka tarjoavat välttämätöntä lisäravintoa korppikotkille Espanjassa, sijoitetaan pois ongelmallisista (korkean kuolleisuusasteen) tuulivoimaloista<sup>83</sup>. Lisäruokinta on yleinen suojelutoimenpide, jolla pyritään tukemaan raadonsyöjälajien populaatiota, mukaan lukien lajit, jotka ovat riippuvaisia tällaisista resursseista ruoan niukkuuden aikana, esimerkiksi talvikuukausina. Suomessa merikotkakannan onnistunutta elpymistä auttoivat talviruokinta-asemat, jotka pysyivät aktiivisina viime aikoihin asti, jolloin lajin suojelun taso parani huomattavasti<sup>84</sup>. Suomessa maakotka on talvisin myös raadonsyöjälaji. Samoin eläinten ruhojen poistamisella riskialttiilta alueilta, eli tuulipuistoissa tai niiden läheisyydessä olevilta alueilta, voi olla suuri merkitys raadonsyöjälintujen törmäysten estämisessä. Espanjassa yksi tehokkaimmista toimenpiteistä korppikotkien törmäyksen estämiseksi on laiduntavan karjan ruhojen poistaminen tuulipuistoympäristöstä<sup>85</sup>. Lisäksi tieto elinympäristön laadusta ja siihen liittyvien lajien tuottavuudesta voi vaikuttaa tuulivoimaloiden ja tunnettujen pesien väliseen puskurivyöhykkeeseen. Pohjois-Ruotsissa korkealaatuisten alueiden todettiin mahdollistavan suuren osan maakotkien kokonaistuottavuudesta<sup>86</sup>. On olennaisen tärkeää, että tällaiset alueet yksilöidään tuulienergian kohdealueilla ja asetetaan etusijalle suojelukäytännöissä. Laadukkailla alueilla tulisi olla parempi suojataso kuin vähemmän tuottavilla alueilla, esimerkiksi siten, että tunnistettujen merikotkanpesien ympärillä on suurempi puskurivyöhyke. Ruotsissa korkealaatuisten maakotka-alueiden puskurivyöhyke kasvaa 2 km:stä 4 km:iin.

#### 4.4 Uuden voimalasukupolven asentaminen

Tuulivoimaloiden tehon nostamista (engl. *repowering*) (eli vanhojen voimaloiden korvaaminen uusilla tehokkaammilla malleilla) on ehdotettu mahdolliseksi toimenpiteeksi tuulivoimaloihin liittyvien vaikutusten lieventämisessä, sillä se johtaa voimaloiden määrän vähenemiseen<sup>29,87,88</sup>. Vastaavasti haitallisten tai mahdollisesti vaarallisten voimaloiden poistaminen voi olla erityisen hyödyllistä, jos tarkasteltavilla turbiineilla on liian korkeat kuolleisuusluvut. Näitä kahta toimenpidettä olisi kuitenkin mahdollisuuksien mukaan sovellettava kehityksen alkuvaiheessa, jotta vältetään mahdolliset vaikutukset paikallisiin lintukantoihin sekä ylimääräiset ja tarpeettomat kustannukset tuulivoimayhtiöille.

Tutkimuksissa, joissa käsiteltiin petolintujen ja lintujen kuolleisuuseroja uuden sukupolven tuulipuiston ja vanhan sukupolven voimala-alueen välillä, havaittiin, että kuolleisuusluvut eivät eronneet merkittävästi<sup>89,90</sup>. Gaedicke ym. (2013) havaitsivat, että petolintujen törmäysriski kasvaa nykyaikaisissa voimaloissa roottorin koon vuoksi, mutta koska pyörimisnopeus on pienempi, törmäyksen todennäköisyys on pienempi<sup>88</sup>. Useat tutkijat ovat kuitenkin väittäneet, että vaikka tehon nostamisella voisi olla hyödyllisiä vaikutuksia lintupopulaatioihin, sillä voi olla merkittäviä vaikutuksia lepakoihin ja yöllisiin lintulajeihin<sup>31,69,91,92</sup>. Tulevissa tutkimuksissa olisi käsiteltävä voimaloiden uusimisen vaikutusta kuolemantapauksiin kaikissa eliöryhmissä sekä uudempiin korkeampiin voimaloihin liittyviä vaikutuksia.

#### 4.5 Toimet tuulivoima-alueen ulkopuolella

Tuulivoima-alueen ulkopuolisella hyvityksellä voidaan kuvata toimenpiteitä, joilla pyritään varmistamaan, että tuulivoimalan ennakoimattomat tai väistämättömät vaikutukset kompensoidaan nettoneutraalilla tai positiivisella tuloksella muualla, jolloin luonnonvaraisten eläinten ja kasvien populaatioille ei aiheudu nettotappiota. Jos esimerkiksi tuulipuiston rakentaminen vähentää herkän

lajin elinympäristön saatavuutta, on ryhdyttävä toimiin alkuperäisen vaikutuksen kompensoimiseksi ja hyödyksi kyseiselle lajille jossain muualla, esimerkiksi luontotyyppiin kohdennetuilla toimenpiteillä. Arnettin ja Mayn (2016) mukaan korvaaviin toimenpiteisiin voi kuulua muun muassa toimia, kuten 1) elinympäristön luominen, ennallistaminen tai laajentaminen; 2) invasiivisten lajien poistaminen; 3) lisäruokinta tai saaliin kasvatus; ja 4) saalistajien hallinta <sup>7</sup>.

Tuulienergian vaikutusten kompensoimiseksi kompensatiokehyksessä on ensin ymmärrettävä kohdelajiin kohdistuvat uhat. Suomessa esimerkiksi maakotkaan kohdistuvat uhat jakautuvat neljään laajaan luokkaan (jotka koskevat myös muita suomalaisia lajeja, ei vain maakotkaa), jotka on määritelty vuoden 2019 suomalaisten lajien punaisessa kirjassa: 1) "häiriöt ja liikenne"; 2) "vanhojen metsien vähentäminen ja suurten puiden määrän väheneminen"; 3) "ansastus, metsästys, kalastus ja laitton tappaminen, mukaan lukien pyydyksiin pyydystetyt muut kuin kohde-eläimet"; 4) "rakentaminen (maalla): asumiseen, liiketoimintaan, liikenteeseen ja virkistykseen, tienrakennukseen, maansiirtoon ja rakentamiseen liittyvään loppusijoitukseen liittyvä rakentaminen". Silloin on uskottavaa, että maakotkaa koskevalla korvaavilla toimenpiteillä torjutaan yhtä tai useampaa edellä mainituista uhkista, mikä hyödyttäisi myös samankaltaisia lajeja, joilla on samat uhat.

Pesänhoitoa ehdotetaan usein yksinkertaisena ja edullisena korvaavana toimenpiteenä <sup>36</sup>, ja siihen voi sisältyä keinotekoisten pesien rakentamista lisääntymisen helpottamiseksi <sup>87</sup> tai keinotekoisten varjorakenteiden käyttö lämpöstressin aiheuttaman kuolleisuuden torjumiseksi <sup>93</sup>. Muita suosituksia ovat maanomistajien suurten puiden suojeleminen (maksetun korvauksen avulla) ja sopivien elinympäristöjen luominen tulevaa pesimistä varten <sup>87</sup>. Mojica ym. (2021) havaitsivat lisäksi, että suuririskisten voimajohtopylväiden tunnistaminen ja jälkikäteisäsentäminen keinona vähentää sähköiskuja voi kompensoida muita ihmisen aiheuttaman kuolleisuuden lähteitä maakotkissa <sup>94</sup>. Norjassa Cole ja Dahl (2013) tekivät yksityiskohtaisia laskelmia siitä, kuinka kompensoida törmäyksen aiheuttama merikotkien menetys Smølan tuulipuistossa sähköiskujen ehkäisytoimenpiteillä <sup>95</sup>. Tätä pidettiin lupaavana vaihtoehtona vakavien vahinkojen kompensoimisessa, jotka huonosti sijoitettu tuulipuisto on jo aiheuttanut (ja ennustetaan aiheuttavan) merikotkille.

On huomattava, että korvaavien toimenpiteiden suuri haaste liittyy kuolleisuuteen. Tässä vaikeus on, että ei tiedetä, kuinka paljon suojeletoimenpiteitä tai toimenpidetäkokonaisuuksia tarvitaan kuolleisuuden kompensoimiseksi. Herkät lajit (esim. pitkäikäiset petolinnut, joilla on alhainen lisääntymiskyky, kuten maakotka), joilla on korkea kumulatiivinen kuolleisuus tuulipuistoissa, voivat vaikeuttaa tilannetta entisestään. Tällaisten lajien osalta luontotyyppi-erityyppömmat (esim. elinympäristön luominen) voivat olla hyvin vaativia eivätkä todennäköisesti kompensoi korkeaa ja jatkuvaa kuolleisuutta nykyisissä ja uusissa tuulivoimaloissa <sup>7</sup>. Näin ollen erityisesti kuolleisuuteen kohdistuvien korvaavien toimenpiteiden tehokkuus on suurelta osin todistamatta ja vaatii lisätutkimuksia.

## 5 PÄÄTELMÄT

Tehokkaita rakentamisen jälkeisiä lieventämisstrategioita tarvitaan kiireellisesti tuulivoimaloiden ennustettujen tai odottamattomien vaikutusten vähentämiseksi skenaariossa, jossa tuulivoima laajenee maailmanlaajuisesti. Näitä hillitsemisstrategioita ei kuitenkaan pitäisi soveltaa ilman, että ensin toteutetaan tiukkaa kattavaa suunnittelua ja riippumattomia ympäristöarviointeja, joilla pyritään välttämään mahdolliset vaikutukset. Kun vaikutusten ehkäisemisen hierarkkisen prosessin ensimmäinen vaihe (eli laajamittainen sijaintipaikan valinta) on saatu päätökseen, lieventävät toimenpiteet olisi suunniteltava ja toteutettava tapauskohtaisesti. Lieventämiseen voi liittyä aistinvaraisia (kuultavia ja optisia), aerodynaamisia ja luontotyyppikohtaisia tekijöitä, ja niiden tehokkuuden odotetaan olevan laji- ja paikkakohtaista. Kaikkien näiden näkökohtien parempi ymmärtäminen on ratkaisevan tärkeää, jotta voidaan kehittää uusia ja tehokkaampia hillitsemisstrategioita tuulienergian tuotannon, ympäristönsuojelun ja lintujen biologisen monimuotoisuuden yhteensovittamiseksi.

Törmäysriskin ja lintukuolleisuuden vähentämiseen tähtäävien lieventämistoimenpiteiden täytäntöönpanoon olisi aina liitettävä asianmukaiset menetelmät, jotta voidaan varmistaa sovelletut järjestelmät ja antaa lisätietoja niiden tehokkuudesta sekä arvioida, tarvitaanko lisälieventämistä. Edistyminen tähän suuntaan auttaisi luomaan luotettavampia ja kustannustehokkaampia havaitsemis- ja karkotusjärjestelmiä. Lisäksi tarvitaan koordinoituja toimia useissa tuulivoimahankkeissa, jotta voidaan poistaa rakentamisen jälkeistä kuolleisuutta koskevien tietojen niukkuus, mikä hyödyttää tutkimusta ja suojelukäytäntöjä. Alla annamme ohjeet meille esitettyihin kysymyksiin:

### 5.1 Mitkä ovat käytettävissä olevat lieventämisjärjestelmät tai -strategiat lintujen törmäykseen puuttumiseksi? Miten ne toimivat?

Törmäysriskin välttämiseksi tai vähentämiseksi on ehdotettu useita lieventäviä toimenpiteitä. Eniten sovellettu ja testattu toimenpide on **voimaloiden sammuttaminen** lisääntyneen törmäysriskin aikana, jonka voivat määrittää joko kenttätarkkailijat, automaattiset anturit, kuten kamerat (kuvapohjaiset) tai tutkat (tutkapohjaiset järjestelmät), tai käyttämällä lintujen GPS-tunnisteita (biotelemetriset järjestelmät). Toiseksi **pelotetoimenpiteillä** pyritään hälyttämään tai pelottamaan lintuja ja estämään niitä lähestymästä tuulivoimaloita. Nämä pelotteet voivat perustua akustisiin (esim. saalistajan äänet, hälytyskutsut tai tulituksen äänet), sähkömagneettisiin tai visuaalisiin lähestymistapoihin (esim. valot tai laserit), ja niitä käytetään yleisesti kohdelajien biologian ja ekologian tuntemuksen perusteella. **Vetovoiman välttämistoimenpiteillä** pyritään välttämään petolintujen tuleamista tuulipuistoalueelle. Strategiat, kuten yhden roottorin siiven maalaaminen mustaksi, voivat lisätä voimalan näkyvyyttä linnuille, mikä vähentää törmäysriskiä välttämistoimilla. Lisäksi luontotyyppitoimenpiteitä voidaan soveltaa, jotta tuulipuistojen sisä- ja ulkopuolella olevista alueista tulisi vähemmän houkuttelevia linnuille ja edistettäisiin siten yksilöiden siirtymistä tuulipuistoalueen ulkopuolelle. **Uuden voimalasukupolven asennus** koostuu useiden vanhojen voimaloiden korvaamisesta pienemmällä määrällä korkeampia ja tehokkaampia malleja. Tätä on ehdotettu arvokkaaksi lieventäväksi toimenpiteeksi, joka voidaan toteuttaa tuulivoimahankkeen suunnittelun aikana tai voimalan käyttöänsä lopussa (n. 20 vuotta). Useat tutkijat ovat väittäneet, että uudella voimalasukupolvella voisi olla hyödyllisiä vaikutuksia lintupopulaatioihin, koska voimaloiden määrän väheneminen vähentää törmäysriskiä. Lopuksi toteamme, että vaikka **tuulivoima-alueen ulkopuolinen hyvitys** ei olekaan suora minimointi- tai korjaustoimenpide, se voidaan suunnitteluvaiheessa suunnitella siten, että sillä torjutaan paikan päällä ilmeneviä vaikutuksia varmistamalla, että muualla eläville eläimille ja kasveille ei aiheudu nettotappiota. Korvaavia

toimenpiteitä ovat muun muassa elinympäristön luominen, ennallistaminen tai laajentaminen, haitallisten vieraslajien poistaminen, lisäruokinta, saaliin kasvatus, petoeläinten torjunta.

## 5.2 Mitkä ovat uusimmat tekniikat?

Teknologinen kehitys on keskittynyt pääasiassa voimaloiden sammuttamiseen liittyviin lieventäviin toimenpiteisiin. Tällä alalla on hyväksytty useita patenteja, mutta **IdentiFlight** ja **DTBird** ovat kaksi eniten käytettyä ja testattua kuvapohjaista järjestelmää voimaloiden rajoittamiseen. Erityisesti **IdentiFlight** on asennettu 150 tuulipuistoon 5 maassa: Australiassa, Ranskassa, Saksassa, Ruotsissa ja Yhdysvalloissa. Samoin **DTBird** on toiminut vuodesta 2009 ja sitä on asennettu yhteensä 80 tuulipuistoon 14 maassa: Itävallassa, Kiinassa, Ranskassa, Saksassa, Kreikassa, Italiassa, Alankomaissa, Norjassa, Puolassa, Espanjassa, Ruotsissa, Sveitsissä, Yhdistyneessä kuningaskunnassa ja Yhdysvalloissa. Lisäksi viime vuosina on kehitetty useita tutkapohjaisia järjestelmiä, kuten **Merlin-lintututka**, **Accipiter® eBirdRad**, **Robin 3D Flex Bird Radar**, **STRIX Birdtrack®** tai **Swiss Birdradar**. On tärkeää korostaa, että tässä raportissa olemme keskittyneet teknologioihin, joita tieteelliset tutkimukset tukevat eniten. Viime vuosina on epäilemättä kehitetty uusia ja uudenlaisia tekniikoita, mutta ne edellyttävät vielä tieteellisiä tutkimuksia, jotka tukevat niiden tehokkuutta törmäysvaikutusten vähentämisessä.

## 5.3 Mikä on niiden tehokkuus?

Tuulivoimaloissa tähän mennessä sovellettujen lieventävien toimenpiteiden tehokkuudesta ei ole riittävästi tietoa. Tästä syystä korostamme, että on tärkeää, että tuulivoimahankkeisiin liitetään asianmukaiset metodologiset protokollat (eli rinnakkainen validointi riippumattomien tarkkailijoiden kanssa), jotta voidaan validoida sovelletut järjestelmät ja antaa lisätietoja niiden vaikuttavuudesta sekä arvioida, tarvitaanko lisälieventämistoimia. Kuvapohjaisten **valvontajärjestelmien** tehokkuutta voimaloiden rajoittamisessa on käsitelty muutamissa tutkimuksissa. Esimerkiksi **IdentiFlight** vähensi törmäyskuolemien määrää 82 % (75–89 %) automaattisella rajoittamisella varustetuissa kohteissa verrattuna vertailupaikkaan. Toisaalta **DTBirdin** on osoitettu tunnistavan 76–96 % kaikista lintulannoista voimaloiden lähistöllä, mutta tietojemme mukaan ei ole olemassa tutkimuksia, jotka osoittaisivat sen tehokkuuden törmäysten minimoinnissa. Lisäksi on tehty useita tutkimuksia, joissa on arvioitu **tutkapohjaisten järjestelmien** havaitsemistodennäköisyyttä ja etäisyyttä, mutta ei törmäysten määriä.

Mitä tulee **pelotelaitteisiin**, joilla pyritään pelottelemaan lintuja pois tuulipuistoista, akustisten pelotteiden on ehdotettu olevan tehokkaampia kuin visuaaliset tai sähkömagneettiset laitteet. Esimerkiksi Espanjassa tehdyssä kokeessa 60 prosentilla korppikotkista oli voimakkaita reaktioita akustisiin pelotteisiin. Niiden tehokkuudesta ja myös lintujen mahdollisesta tottumisesta ja tehokkuuden menetyksestä pitkällä aikavälillä ei kuitenkaan ole merkittävää näyttöä. Samoin **vetovoiman välttämistoimenpiteiden**, kuten voimalan näkyvyyden lisääminen maalaamalla yksi roottorin lapa mustaksi, on osoitettu vähentävän vuotuista kuolleisuusastetta yli 70 %. Tässäkin suhteessa on suuri puute tieteellisestä näytöstä, koska tähän mennessä on saatavilla vain yksi tutkimus, joka on tehty yhdellä tuulipuistolla. Tämän tutkimuksen tekijät korostivat pitkäaikaisten tutkimusten tarvetta vuotuisten kuolleisuuslukujen suuren vaihtelun vuoksi sekä tarvetta testata tätä toimenpidettä muissa tuulipuistoissa vankkojen ja vakuuttavien tulosten saamiseksi. Samanlaisia huolenaiheita aiheuttavat toimenpiteet, jotka liittyvät elinympäristötoimiin paikan päällä ja niiden ulkopuolella, joilla pyritään vetämään lintuja pois riskialueilta. Vaikka monet tuulivoimahankkeet sisältävät tällaisia elinympäristöihin liittyviä interventiostrategioita, niiden tehokkuuden todellista arviointia (jos se toteutetaan) ei yleensä julkaista. **Tuulivoima-alueen ulkopuolista hyvitystä** pidetään välttämättömänä toimenpiteenä, jolla voidaan puuttua tuulienergian kasvavaan paineeseen kohdennetuilla suojelutoimilla muualla kuin tuulipuistoalueilla.



Periaatteessa mahdollista tuulivoima-alueen ulkopuolista hyvitystä sovelletaan kuitenkin harvoin. Viimeisenä, tutkimuksissa, joissa käsiteltiin eroja lintujen kuolleisuusasteissa tuulivoimapuiston **uuden voimalasukupolven** ja vanhan sukupolven voimaloiden välillä, havaittiin epäjohdonmukaisia tuloksia. Eräässä tutkimuksessa havaittiin, että uuden voimalasukupolven ja vanhojen voimaloiden kuolleisuudessa ei ollut merkittäviä eroja, kun taas toisessa tutkimuksessa havaittiin, että törmäysriski kasvoi uuden voimalasukupolven voimaloissa, mutta törmäystodennäköisyys pieneni. Lisäksi useat tutkijat ovat väittäneet, että uuden voimalasukupolven asentamisella voi olla merkittäviä vaikutuksia lepakoihin ja yöllisiin lintulajeihin. Sen vuoksi tulevissa tutkimuksissa olisi käsiteltävä tehon nostamisen vaikutusta kuolemantapausten määrään kaikissa taksoneissa sekä uudempiin korkeampiin voimaloihin liittyviä vaikutuksia.

#### 5.4 Toimivatko ne oikein Suomen sääolosuhteissa?

Suomen ilmasto on mannermainen, pohjoisessa ja sisämaassa on kylmät ja pitkät talvet, kun taas länsi- ja etelärannikolla on hieman leudompaa. Sääolosuhteille on ominaista toistuvat sateet, jotka jakautuvat ympäri vuoden, vaikkakaan eivät ole runsaita (400–700 mm). Voimaloiden rajoittamiseen tarkoitettujen **kamera- ja tutkapohjaisten järjestelmien** havaitsemistodennäköisyyden on ehdotettu olevan rajallinen sateen ja sumun aiheuttaman huonon näkyvyyden aikana. Samanlaista tehokkuuden heikkenemistä odotetaan visuaalisten pelotteiden osalta. Niiden odotetaan kuitenkin toimivan ja kestäväen paikallisia sääolosuhteita, koska niitä on sovellettu maissa, joissa on samanlaiset sääolosuhteet, kuten Ruotsissa ja Norjassa (esim. IdentiFlight tai DTBird).

#### 5.5 Mitkä ovat parhaat vaihtoehdot Ponteman tuulivoimapuistolle?

Tässä tarkastellun tieteellisen kirjallisuuden perusteella ei ole olemassa yhtä parasta vaihtoehtoa tuulipuistoihin liittyvien törmäysvaikutusten lieventämiseksi, koska vaihtoehtojen yhdistelmä on todennäköisesti paras lähestyminen. Kamera- ja tutkapohjaisten järjestelmien käyttöä voimaloiden automaattiseen rajoittamiseen on ehdotettu muutamissa tutkimuksissa tehokkaaksi lieventäväksi lähestymistavaksi, joten nämä järjestelmät voivat olla lupaavia Ponteman tuulipuistolle. Näiden järjestelmien tehokkuus kuitenkin todennäköisesti paranee, kun niihin liittyy muita lieventäviä toimenpiteitä, kuten akustisten tai visuaalisten pelotteiden asentaminen, tai tuulivoimaloiden lapojen näkyvyyden lisääminen (eli maalaamalla kuvioita lapoihin) sen varmistamiseksi, että linnut voivat havaita ne ajoissa törmäysten välttämiseksi. Näiden toimenpiteiden onnistunut yhdistäminen (eli voimalan automaattinen rajoittaminen, pelote ja/tai vetovoiman välttäminen) lisää todennäköisyyttä, että törmäysvaikutusta lievennetään, mutta se vähentää myös voimalan rajoittamiseen liittyviä kustannuksia. Tämä johtuu siitä, että voimaloiden näkyvyyden lisääminen tai pelotelaitteiden käyttö herkkien lajien pelottamiseksi ei aktivoi voimaloiden automaattista rajoitusjärjestelmää eikä siten energian kokonaistuotantoa vähennetä.

Luontotyyppitoimenpiteet voisivat myös osaltaan vähentää törmäysriskiä vähentämällä elinympäristön houkuttelevuutta tuulipuistoalueella ja/tai lisäämällä elinympäristön houkuttelevuutta tämän alueen ulkopuolella. Tällainen interventio edellyttää muun muassa kohdelajien elinympäristön käytön hyvää ymmärtämistä ja aiempaa arviointia. Siksi emme voi tehdä erityisiä ehdotuksia tässä vaiheessa. Vastaavasti tuulivoima-alueen ulkopuolisessa hyvityssuunnitelmassa edellytetään kohdelajeihin kohdistuvien olemassa olevien uhkien tunnistamista ja mallintamismallineita kompensointitoimien arvioimiseksi suhteessa ennustettuihin vaikutuksiin. Kompensaatio on kuitenkin lieventämishierarkian viimeinen vaihe päätöksentekijöiden tukemisessa, ja sitä voidaan soveltaa vain silloin, kun vaikutusten välttäminen ja minimointi ei ole mahdollista. Kuten aiemmin korostettiin, lopulta sovellettaviin lieventäviin toimenpiteisiin on liitettävä seurantasuunnitelma, jotta voidaan arvioida niiden tehokkuutta operatiivisen vaiheen



aikana sekä myös havaita muita vaikutuksia, joita ei ole huomioitu lieventämistoimenpiteissä. Tällaiset tiedot ovat olennaisen tärkeitä suojelukäytännön kannalta.

## 6 LÄHDELUETTELO

1. Lu, X., McElroy, M. B. & Kiviluoma, J. Global potential for wind-generated electricity. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **106**, 10933–10938 (2009).
2. Katzner, T. E. *et al.* Wind energy: An ecological challenge. *Science* **366**, 1206–1207 (2019).
3. Langston, R. H. W. & Pullan, J. D. *Wind farms and birds: an analysis of the effects of wind farms on birds, and guidance on environmental assessment criteria and site selection issues.* (Report T-PVS/Inf (2003) 12, by BirdLife International to the Council of Europe, Bern Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitats. RSPB/BirdLife in the UK, 2003).
4. Serrano, D. *et al.* Renewables in Spain threaten biodiversity. *Science* **370**, 1282–1283 (2020).
5. Pérez-García, J. M. *et al.* Priority areas for conservation alone are not a good proxy for predicting the impact of renewable energy expansion. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **119**, e2204505119 (2022).
6. Hutchins, M., Parr, M. & Schroeder, D. ABC's Bird-Smart Wind Energy Campaign: Protecting Birds from Poorly Sited Wind Energy Development. *Human–Wildlife Interact.* **10**, (2016).
7. Arnett, E. & May, R. Mitigating Wind Energy Impacts on Wildlife: Approaches for Multiple Taxa. *Human–Wildlife Interact.* **10**, (2016).
8. May, R., Masden, E. A., Bennet, F. & Perron, M. Considerations for upscaling individual effects of wind energy development towards population-level impacts on wildlife. *J. Environ. Manage.* **230**, 84–93 (2019).
9. Ministry of Economic Affairs and Employment. *Finland's Integrated Energy and Climate Plan.* (2019).
10. Finnish Wind Power Association. Operating and dismantled wind turbines. <https://tuulivoimayhdistys.fi/en/wind-power-in-finland/wind-power-in-production-and-dismantled> [accessed on 10.9.2022].
11. Finnish Wind Power Association. Projects under planning. [https://tuulivoimayhdistys.fi/media/final-16.2-public-wind-power-pipeline-finland-1\\_2021.pdf](https://tuulivoimayhdistys.fi/media/final-16.2-public-wind-power-pipeline-finland-1_2021.pdf) [accessed on 10.9.2022].
12. McClure, C. J. W. *et al.* State of the world's raptors: Distributions, threats, and conservation recommendations. *Biol. Conserv.* **227**, 390–402 (2018).
13. Wang, S. & Wang, S. Impacts of wind energy on environment: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **49**, 437–443 (2015).
14. Smallwood, K. S. & Thelander, C. Bird Mortality in the Altamont Pass Wind Resource Area, California. *J. Wildl. Manag.* **72**, 215–223 (2008).
15. de Lucas, M., Ferrer, M., Bechard, M. J. & Muñoz, A. R. Griffon vulture mortality at wind farms in southern Spain: Distribution of fatalities and active mitigation measures. *Biol. Conserv.* **147**, 184–189 (2012).
16. Dahl, E. L., Bevanger, K., Nygård, T., Røskaft, E. & Stokke, B. G. Reduced breeding success in white-tailed eagles at Smøla windfarm, western Norway, is caused by mortality and displacement. *Biol. Conserv.* **145**, 79–85 (2012).
17. Stokke, B. *et al.* *Langtidseffekter av Smøla vindpark på den lokale bestanden av havørn (Haliaeetus albicilla). Årsrapport 2021.* (2021).

18. Drewitt, A. L. & Langston, R. H. W. Assessing the impacts of wind farms on birds. *Ibis* **148**, 29–42 (2006).
19. Erickson, R. A. *et al.* Assessing local population vulnerability with branching process models: an application to wind energy development. *Ecosphere* **6**, 1–14 (2015).
20. Hedfors, R. Movement ecology of Golden eagles (*Aquila chrysaetos*) and risks associated with wind farm development. vol. 2014:16 (Swedish University of Agricultural Sciences, 2014).
21. Johnston, N. N., Bradley, J. E. & Otter, K. A. Increased Flight Altitudes among Migrating Golden Eagles Suggest Turbine Avoidance at a Rocky Mountain Wind Installation. *PLOS ONE* **9**, e93030 (2014).
22. Fielding, A. H. *et al.* Responses of dispersing GPS-tagged Golden Eagles (*Aquila chrysaetos*) to multiple wind farms across Scotland. *Ibis* **164**, 102–117 (2022).
23. Walker, D., McGrady, M., McCluskie, A., Madders, M. & McLeod, D. R. A. *Resident Golden Eagle ranging behaviour before and after construction of a windfarm in Argyll*. (2005).
24. Lehtikoinen, A. *et al.* Birds. in *The 2019 Red List of Finnish Species* (eds. Hyvärinen, E., Juslén, A., Kemppainen, E., Uddström, A. & Liukko, U., -M) 263–312 (Ministry of the Environment & Finnish Environment Institute, 2019).
25. Directive 2009/147/EC. *DIRECTIVE 2009/147/EC of the European Parliament and of the Council on the conservation of wild birds*. (2009).
26. Tara J. Conkling, Christopher J.W. McClure, Sandra Cuadros, Scott R. Loss, & Todd E. Katzner. Limited rigor in studies of raptor mortality and mitigation at wind power facilities. *Biol. Conserv.* 109707- (2022) doi:10.1016/j.biocon.2022.109707.
27. Allison, T. D., Cochrane, J. F., Lonsdorf, E. & Sanders-Reed, C. A Review of Options for Mitigating Take of Golden Eagles at Wind Energy Facilities. *J. Raptor Res.* **51**, 319–333 (2017).
28. Cook, A. S. C. P. *et al.* *Identifying a range of options to prevent or reduce avian collision with offshore wind farms using a UK-based case study*. (The British Trust for Ornithology, AEA Group, the Met Office and the University of Birmingham Centre for Ornithology, 2011).
29. Gartman, V., Bulling, L., Dahmen, M., Geißler, G. & Köppel, J. Mitigation Measures for Wildlife in Wind Energy Development, Consolidating the State of Knowledge — Part 2: Operation, Decommissioning. *J. Environ. Assess. Policy Manag.* **18**, 1650014 (2016).
30. Gartman, V., Bulling, L., Dahmen, M., Geißler, G. & Köppel, J. Mitigation Measures for Wildlife in Wind Energy Development, Consolidating the State of Knowledge — Part 1: Planning and Siting, Construction. *J. Environ. Assess. Policy Manag.* **18**, 1650013 (2016).
31. Marques, A. T. *et al.* Understanding bird collisions at wind farms: An updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biol. Conserv.* **179**, 40–52 (2014).
32. May, R., Reitan, O., Bevanger, K., Lorentsen, S.-H. & Nygård, T. Mitigating wind-turbine induced avian mortality: Sensory, aerodynamic and cognitive constraints and options. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **42**, 170–181 (2015).
33. Watson, R. T. *et al.* Raptor Interactions With Wind Energy: Case Studies From Around the World. *J. Raptor Res.* **52**, 1–18 (2018).
34. Clocker, K., Hu, C., Roadman, J., Albertani, R. & Johnston, M. L. Autonomous Sensor System for Wind Turbine Blade Collision Detection. *IEEE Sens. J.* **22**, 11382–11392 (2022).
35. U.S. Fish & Wildlife Service. *U.S. Fish and Wildlife Service Land-Based Wind Energy Guidelines*. (2021).
36. U.S. Fish and Wildlife Service. *Eagle Conservation Plan Guidance. Module 1 – Land-based Wind Energy. Version 2*. (2013).

37. Liechti, F., Guélat, J. & Komenda-Zehnder, S. Modelling the spatial concentrations of bird migration to assess conflicts with wind turbines. *Biol. Conserv.* **162**, 24–32 (2013).
38. Aschwanden, J. *et al.* Bird collisions at wind turbines in a mountainous area related to bird movement intensities measured by radar. *Biol. Conserv.* **220**, 228–236 (2018).
39. Hayes, M. A. *et al.* A smart curtailment approach for reducing bat fatalities and curtailment time at wind energy facilities. *Ecol. Appl.* **29**, e01881 (2019).
40. Collier, M. P., Dirksen, S. & Krijgsveld, K. L. *A review of methods to monitor collisions or micro-avoidance of birds with offshore wind turbines.* (2011).
41. Birdlife International. *Review and guidance on use of “shutdown-on-demand” for wind turbines to conserve migrating soaring birds in the Rift Valley/Red Sea Flyway.* (2015).
42. May, R. *et al.* Collision risk in white-tailed eagles. Modelling collision risk using vantage point observations in Smøla wind-power plant. (2010).
43. McClure, C. J. W. *et al.* Eagle fatalities are reduced by automated curtailment of wind turbines. *J. Appl. Ecol.* **58**, 446–452 (2021).
44. McClure, C. J. W., Martinson, L. & Allison, T. D. Automated monitoring for birds in flight: Proof of concept with eagles at a wind power facility. *Biol. Conserv.* **224**, 26–33 (2018).
45. May, R., Hamre, Ø., Vang, R. & Nygård, T. *Evaluation of the DTBird video-system at the Smøla wind-power plant: Detection capabilities for capturing near-turbine avian behaviour.* (2012).
46. Rabie, P. A. *et al.* Efficacy and cost of acoustic-informed and wind speed-only turbine curtailment to reduce bat fatalities at a wind energy facility in Wisconsin. *PLOS ONE* **17**, e0266500 (2022).
47. Kelly, T. A. & Fiedler, J. K. *A Framework for Mitigation of Bird and Bat Strike Risk at Wind Farms using Avian Radar and SCADA Interface.* (2008).
48. May, R., Steinheim, Y., Kvaløy, P., Vang, R. & Hanssen, F. Performance test and verification of an off-the-shelf automated avian radar tracking system. *Ecol. Evol.* **7**, 5930–5938 (2017).
49. Geringer, M. B., Lima, S. L. & Devault, T. L. Evaluation of an avian radar system in a midwestern landscape. *Wildl. Soc. Bull.* **40**, 150–159 (2016).
50. Beason, R. C., Humphrey, J. S., Myers, N. E. & Avery, M. L. Synchronous monitoring of vulture movements with satellite telemetry and avian radar. *J. Zool.* **282**, 157–162 (2010).
51. Phillips, A. C. *et al.* Efficacy of avian radar systems for tracking birds on the airfield of a large international airport. *Wildl. Soc. Bull.* **42**, 467–477 (2018).
52. Dokter, A. M., Baptist, M. J., Ens, B. J., Krijgsveld, K. L. & van Loon, E. E. Bird Radar Validation in the Field by Time-Referencing Line-Transsect Surveys. *PLOS ONE* **8**, 9 (2013).
53. Tomé, R., Canário, F., Leitão, A. H., Pires, N. & Repas, M. Radar Assisted Shutdown on Demand Ensures Zero Soaring Bird Mortality at a Wind Farm Located in a Migratory Flyway. in *Wind Energy and Wildlife Interactions: Presentations from the CWW2015 Conference* (ed. Köppel, J.) 119–133 (Springer International Publishing, 2017). doi:10.1007/978-3-319-51272-3\_7.
54. Cohen, E. B. *et al.* Using weather radar to help minimize wind energy impacts on nocturnally migrating birds. *Conserv. Lett.* **15**, e12887 (2022).
55. Liechti, F. *et al.* Cross-calibration of different radar systems for monitoring nocturnal bird migration across Europe and the Near East. *Ecography* **42**, 887–898 (2019).
56. Sheppard, J. K., McGann, A., Lanzone, M. & Swaisgood, R. R. An autonomous GPS geofence alert system to curtail avian fatalities at wind farms. *Anim. Biotelemetry* **3**, 43 (2015).
57. Bishop, J., McKay, H., Parrott, D. & Allan, J. *Review of international research literature regarding the effectiveness of auditory bird scaring techniques and potential alternatives.* (Department of Environment, Food and Rural affairs, UK., 2003).

58. Gilsdorf, J. M., Hygnstrom, S. E. & VerCauteren, K. C. Use of Frightening Devices in Wildlife Damage Management. *Integr. Pest Manag. Rev.* **7**, 29–45 (2002).
59. Dooling, R. *Avian Hearing and the Avoidance of Wind Turbines*. NREL/TP-500-30844, 15000693 (2002) doi:10.2172/15000693.
60. Arnett, E. B., Hein, C. D., Schirmacher, M. R., Huso, M. M. P. & Szewczak, J. M. Evaluating the Effectiveness of an Ultrasonic Acoustic Deterrent for Reducing Bat Fatalities at Wind Turbines. *PLOS ONE* **8**, e65794 (2013).
61. Romano, W. B. *et al.* Evaluation of an acoustic deterrent to reduce bat mortalities at an Illinois wind farm. *Wildl. Soc. Bull.* **43**, 608–618 (2019).
62. Weaver, S. P. Understanding wind energy impacts on bats and testing reduction strategies in South Texas. (Texas State University, 2019).
63. Smith, A., Vidao, J., Villar, S., Quillen, J. & Davenport, J. Evaluation of long-range acoustic device (LRAD) for bird dispersal at el Pino Wind Farm, Spain. in *Proceedings of the Conference on Wind Energy and Wildlife Impacts, 2–5 May 2011* (Trondheim, Norway, 2011).
64. Brandt, M. J. *et al.* Seal scarers as a tool to deter harbour porpoises from offshore construction sites. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **475**, 291–302 (2013).
65. Dähne, M., Tougaard, J., Carstensen, J., Rose, A. & Nabe-Nielsen, J. Bubble curtains attenuate noise from offshore wind farm construction and reduce temporary habitat loss for harbour porpoises. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **580**, 221–237 (2017).
66. McGarry, T., Boisseau, O., Stephenson, S. & Compton, R. *Understanding the Effectiveness of Acoustic Deterrent Devices (ADDs) on Minke Whale (Balaenoptera acutorostrata), a Low Frequency Cetacean*. (2017).
67. Nicholls, B. & Racey, P. A. Bats Avoid Radar Installations: Could Electromagnetic Fields Deter Bats from Colliding with Wind Turbines? *PLoS ONE* **7** (2007).
68. Nicholls, B. & Racey, P. A. The Aversive Effect of Electromagnetic Radiation on Foraging Bats—A Possible Means of Discouraging Bats from Approaching Wind Turbines. *PLoS ONE* **4**, 10 (2009).
69. Voigt, C. C., Lehnert, L. S., Petersons, G., Adorf, F. & Bach, L. Wildlife and renewable energy: German politics cross migratory bats. *7* (2015).
70. McIsaac, H. Raptor Acuity and Wind Turbine Blade Conspicuity. in *Proceedings of the National Avian-Wind Power Planning Meeting IV* (2000).
71. May, R. *et al.* Paint it black: Efficacy of increased wind turbine rotor blade visibility to reduce avian fatalities. *Ecol. Evol.* **10**, 8927–8935 (2020).
72. Gehring, J., Kerlinger, P. & Manville II, A. M. Communication towers, lights, and birds: successful methods of reducing the frequency of avian collisions. *Ecol. Appl.* **19**, 505–514 (2009).
73. Kerlinger, P. *et al.* Night Migrant Fatalities and Obstruction Lighting at Wind Turbines in North America. *Wilson J. Ornithol.* **122**, 744–754 (2010).
74. Drewitt, A. L. & Langston, R. H. W. Collision Effects of Wind-power Generators and Other Obstacles on Birds. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **1134**, 233–266 (2008).
75. Marques, A. T. *et al.* Understanding bird collisions at wind farms: An updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biol. Conserv.* **179**, 40–52 (2014).
76. Pescador, M., Gómez Ramírez, J. I. & Peris, S. J. Effectiveness of a mitigation measure for the lesser kestrel (*Falco naumanni*) in wind farms in Spain. *J. Environ. Manage.* **231**, 919–925 (2019).
77. Mammen, U., Mammen, K., Heinrichs, N. & Resetaritz, A. Red kite (*Milvus milvus*) fatalities at wind turbines – why do they occur and how they are to prevent? in *Conference on Wind energy and Wildlife impacts* (2011).

78. Zawadzka, D. Feeding habits of the black kite *Milvus migrans*, red kite *Milvus milvus*, white-tailed eagle *Haliaeetus albicilla* and lesser spotted eagle *Aquila pomarina* in Wigry National Park (NE Poland) (1999).
79. Paula, A. *et al.* Managing habitat for prey recovery – an off-site mitigation tool for wind farms' impacts on top avian predators. in *Conference on Wind energy and Wildlife impacts* (2011).
80. Forrest, J., Robinson, C. & Hommel, C. Flight activity and breeding success of hen harrier at Paul's Hill wind farm in north east Scotland. in *Conference on Wind energy and Wildlife impacts* (2011).
81. Bioinsight. *Parque Eólico da Serra dos Candeeiros. Medidas de Mitigação e Compensação dirigidas ao Peneireiro (Falco tinnunculus)*. (2017).
82. Camiña, A. The effect of wind farms on vultures in northern Spain – fatalities behaviour and correction measures. in *Conference on Wind energy and Wildlife impacts* (2011).
83. Martínez-Abraín, A. *et al.* Effects of wind farms and food scarcity on a large scavenging bird species following an epidemic of bovine spongiform encephalopathy. *J. Appl. Ecol.* **49**, 109–117 (2012).
84. WWF. *Merikotkien puolesta - WWF:N merikotkatyöryhmän vuosikymmententaiva*. (2016).
85. Perrow, M. *Wildlife and Wind Farms - Conflicts and Solutions: Onshore: Potential Effects*. (Pelagic Publishing Ltd, 2017).
86. Hipkiss, T., Moss, E. & Hörnfeldt, B. Variation in quality of Golden Eagle territories and a management strategy for wind farm projects in northern Sweden. *Bird Study* **61**, 444–446 (2014).
87. Johnson, G. D., Strickland, M. D., Erickson, W. P. & Young, D. P. Use of data to develop mitigation measures for wind power development impacts to birds. in *Birds and Wind Farms, Risk Assessment and Mitigation* (Quercus, 2007).
88. Gaedicke, L., Loske, K. & Bergen, F. Effects of repowering wind turbines on collision risk of raptor species. in *Naturvardsverket p.136 Rapport 6546* (2013).
89. Krijgsveld, K. L., Akershoek, K., Schenk, F., Dijk, F. & Dirksen, S. Collision Risk of Birds with Modern Large Wind Turbines. *Ardea* **97**, 357–366 (2009).
90. Smallwood, K. S. & Karas, B. Avian and Bat Fatality Rates at Old-Generation and Repowered Wind Turbines in California. *J. Wildl. Manag.* **73**, 1062–1071 (2009).
91. Rydell, J. *et al.* Bat Mortality at Wind Turbines in Northwestern Europe. *Acta Chiropterologica* **12**, 261–274 (2010).
92. Smallwood, K. S. *Assessment of three proposed adaptive management plans for reducing raptor fatalities in the altamont pass wind resource area*. (SRC document, 2010).
93. Kochert, M. N., Steenhof, K. & Brown, J. L. Effects of Nest Exposure and Spring Temperatures on Golden Eagle Brood Survival: An Opportunity for Mitigation. *J. Raptor Res.* **53**, 91–97 (2019).
94. Mojica, E. K., Eccleston, D. T. & Harness, R. E. Importance of Power Pole Selection When Retrofitting for Eagle Compensatory Mitigation. *J. Fish Wildl. Manag.* **13**, 286–294 (2021).
95. Cole, S. G. & Dahl, E. L. Compensating white-tailed eagle mortality at the Smøla wind-power plant using electrocution prevention measures. *Wildl. Soc. Bull.* **37**, 84–93 (2013).