

**Kas ja kuidas avameretuulikud kõrgusega kuni umbes 300 m  
võivad mõjutada lindude rännet?**

Lepingulise töö aruanne

Tellijal  
Rahandusministeerium

Täitjal  
Eesti Ornitoloogiaühing

Koostajad  
Andrus Kuus  
Veljo Volke  
Leho Luigujõe

Tartu 2021

## Sissejuhatus

Eesti mereala planeeringus on valitud tuuleenergia arendusalad. Need ei kattu lindude jaoks sensitiivsete aladega. Arvestades tuuleenergia tehnoloogia kiiret arengut on prognoositav, et arendusaladele kavandatavates tuuleparkides hakatakse kasutama kõige kaasaegsemaid tuulikuid, mille mõõtmed on seni kasutusel olevatest oluliselt suuremad. Planeeringus tuuakse lähtekohana välja tuulikute maksimaalse laba tipu kõrgusena umbes 300 m.

Tulenevalt tuulikute kõrguspiiri sätestamisest tuleb vastata küsimusele, kuidas suurte tuulikute kasutamine võib mõjutada linnustikku – lindude lennukäitumist, võimalikku barjääriefekti avaldumist või selle nõrgenemist ja lindude hukkumisriski. Teine oluline küsimus lähteülesandes oli, et kui linnud peavad Eesti mereala planeeringus määratud tuuleenergia tootmiseks sobilikes alades (tuulikute kõrgusest tulenevalt) oma lennukoridori muutma, siis kas ja kus saavad nad lennata. Eeldus on see, et lindudele kõige olulisemad alad, sh kindlad rände koondumisalad on planeeringus tuuleenergia tootmiseks sobilike alade hulgast välja jäetud, kuid lindude ränne mere kohal kulgeb ka mujal. Töö lähteülesanne on esitatud lisas 1.

Töös esitatakse olemasolevate Euroopa avamere tuuleparkide uuringutes saadud asjakohane kogemus, kasutades allikatena nii avaldatud teadusartikleid kui uuringuaruandeid. Lennukõrguste peatükis kasutatakse ka Eesti uuringutes saadud tulemusi.

Töö koostajad tänavad Urmas Sellist Kotkaklubist, kes võimaldas kasutada GPS-GSM saatjatega kotkaste ja must-toonekurgede rändeandmeid.

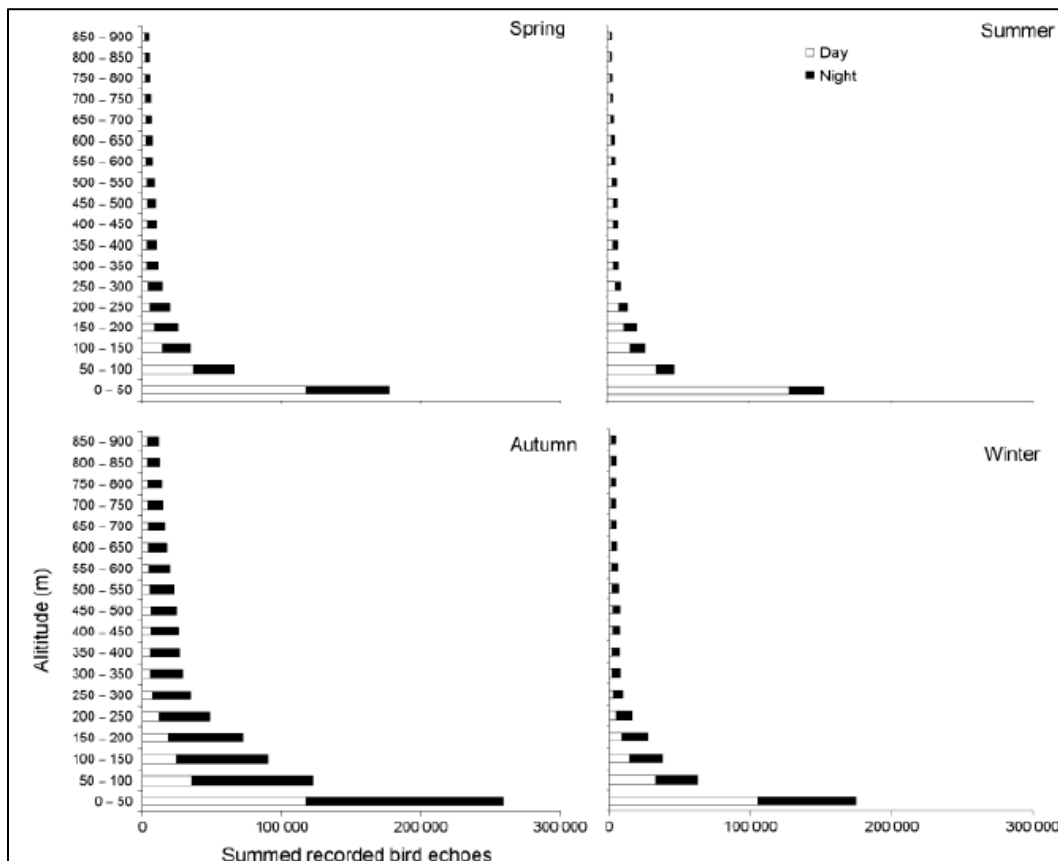
# 1. Lennukõrgus

## 1.1. Lennukõrguste sagedusjaotus

Lindude lennukõrgused ulatuvad rohkem kui ühe kilomeetri kõrgusele. Valitseb üldine seaduspärasus: kõrguse suurenemisel lendavate lindude arv väheneb.

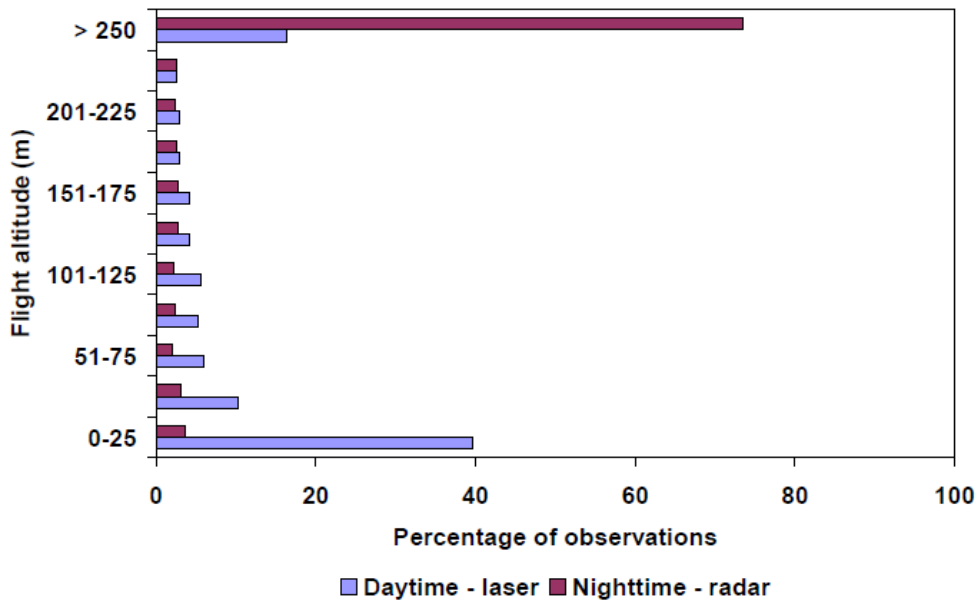
Konkreetsed lennukõrguste jaotused on erinevates uurimistöodes erinevad, sõltudes nii kohast kui ka uurimismeetodist. Radaruuringud kipuvad alahindama kõige madalamate, visuaalvaatlused aga suuremate lennukõrguste osakaalu. Lennukõrguste iseloomustamisel kasutatakse erinevates töodes erineva suurusega kõrgusvahemikke; sageli on lennukõrguste kirjeldamisel pööratud põhitähelepanu kindlatele kõrgusvahemikele, mis vastavad konkreetsete tuuleparkide rootorite töötsooni kõrgusele.

Lääne-Euroopa kirjanduse ülevaates on märgitud, et enamus merelindudest lendab alumises 20 meetri kõrguses õhukihis ja tuulikute rootorite töötsooni kõrgusele ulatuvad lennukõrgused peamiselt ainult kajakatel (Jongbloed, 2016). Helgolandis rändas 88% kõigist lindudest (s.h. üle 90% kauridest, sukelpartidest, kajakatest ja tiirudest) vähem kui 50 m kõrgusel (Dierschke & Daniels, 2003). Teistes, s.h. Eestis läbi viidud uuringutes on hinnatud lennukõrgusi suuremateks. Hollandi Põhjamereel asuvas Egmond aan Zee tuulepargis toimus ligi 50% lendudest madalamal kui 115 m (joonis 1; Fijn et al., 2015).



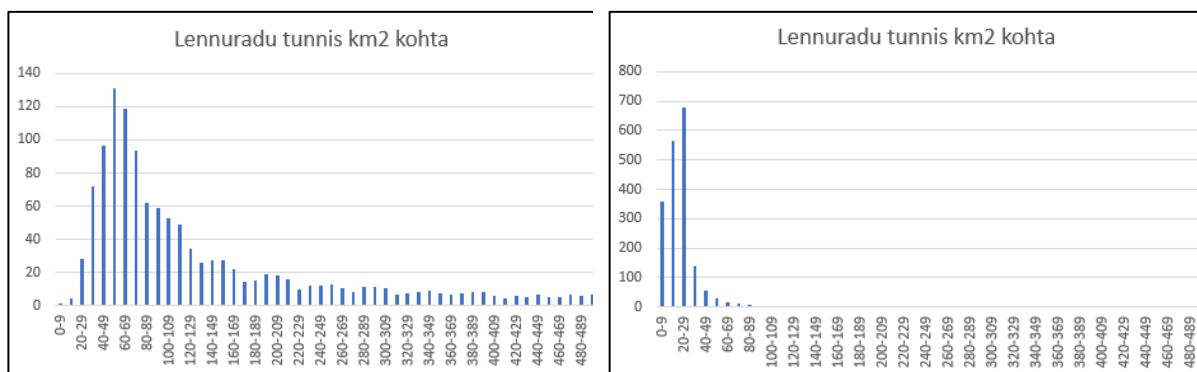
Joonis 1. Lindude lennukõrguste sagedusjaotus Hollandi Egmond aan Zee tuulepargis Põhjamereel juuni 2007 kuni mai 2010 läbi viidud lennukõrguste automatiseeritud seirel vertikaalaradariga (n= 2,2 M). Joonistel on esitatud lennukõrguste sagedusjaotus aastaegade ja päeva (valge tulp) ning ööperioodi (must tulp) lõikes (Fijn et al., 2015).

Põhjamere uurimisplatvormi lindude kevad- ja sügisrände uurimisel leiti, et ligi pool läbirändavates lindudest lendas kuni 200m kõrgusel merepinnast (Hüppop et al., 2006), Saksamaa majandusvööndis asuvate tuuleparkide radaruuringu järgi hinnati kuni 200 m kõrgusel lendavate lindude osakaaluks 35% (Welcker, 2019). Pesitsusaegsetel toitumislendudel ning toitumispaika vahetavate lindude lennukõrgused jäävad enamasti madalamal kui 100 m (Exo et al., 2003). Eestis Suure Väina piirkonnas tehtud kevadrände aegsete radarvaatluste ja laserbinokliga mõõdistuste andmetel lendas ligi kaks kolmandikku kõigist lindudest kuni 150 m kõrgusel (joonis 2; Leito, 2009). 1974. aastal Pärnus ja Virtsus läbi viidud vaatluste andmetel oli rändekõrgus pimedas radari järgi valdavalt 0,5-1,5 km, päevasel ajal visuaalvaatluste järgi (enamus vaerad ja aulid) 100-500 m (Jacoby, 1983).



Joonis 2. Lindude kõrgusmõõtmistulemuste jaotumine 11 kõrgusklassi Suures Väinas 2009.a. kevadel 6.-24. maini. Horisontaalteljel vaatluste arv protsentides ja vertikaalteljel lennukõrgus (m). Sinised tulbad tähistavad laserkõrgusmõõtjaga päeval, punased tulbad radariga öösel teostatud vaatluste tulemusi. N=15 712 kaja (Leito, 2009).

Väikesel väinal toimunud uuringus elektriliini mõju selgitamiseks saadi lennukõrguste kohta tulemusi nii radari kui laserbinokli abil (joonis 3).



Joonis 3. Keskmine lennuradade arv (vertikaalteljel) 1 km<sup>2</sup> suuruse pinna kohta tunnis 10 m suuruste kõrgusvahemike (horisontaalteljel) kaupa. Vasakpoolne graafik: vertikaalselt töötava radari andmetel, n = 21284; parempoolne graafik: visuaalvaatluste tulemusel, n = 13349 (Väike väin; november 2019 – oktoober 2020; käesoleva töö eesmärke arvestades on arvestatud ainult kõrgustega kuni 500 m; (uued graafikud Volke et al., 2020 algandmete järgi).

## 1.2. Lennukõrgust mõjutavad tegurid

Lindude lennukõrgus sõltub paljudest erinevatest teguritest (näiteks Fijn et al., 2015; Jongbloed, 2016; Kahlert et al., 2012, Volke et al., 2020):

### 1.2.1. Linnuliik

Erinevad liigid eelistavad erinevaid lennukõrgusi. Sõltuvalt konkreetsetest oludest võib liigirühmade järjekord lennukõrguse järgi olla erinev. Lääne-Euroopas on avamerel keskmiselt kõige väiksema lennukõrgusega linnurühmadena nimetatud alkasi ja sukelparte, veidi suurem on lennukõrgus tiirudel ja kauridel ning kõige kõrgemal lendavad keskmiselt kajakad (Krijgsveld et al., 2005, Bradbury et al., 2014, Johnston et al., 2014). Eesti uuringutes on vastupidi leitud, et kajakad ja tiirud kuuluvad kõige väiksema lennukõrgusega liikide hulka, arvukaimate sukelpartide keskmised lennukõrgused võivad aga ulatuda mitmesaja meetri kõrgusele (Leito, 2009; Volke et al., 2020).

Kuigi värvuliste ränne toimub valdavalt kõrgel, esineb neil kõrge intensiivsusega rändepäevi madalamates, tuulikute rootorite töösoonidega kattuvates õhukihtides (Krijgsveld et al., 2015). Saksamaa üldistavas uuringus analüüsiti öösel mere kohal rändavate värvuliste lennukõrgusi kuni 1000 m kõrguseni ja leiti, et selles vahemikus lendas 35% kõigist värvulistest madalamal kui 200 m (Welcker, 2019). Näited erinevate linnurühmade ja linnuliikide lennukõrgustes on toodud tabelites 1 ja 2 ning joonistel 4 ja 5.

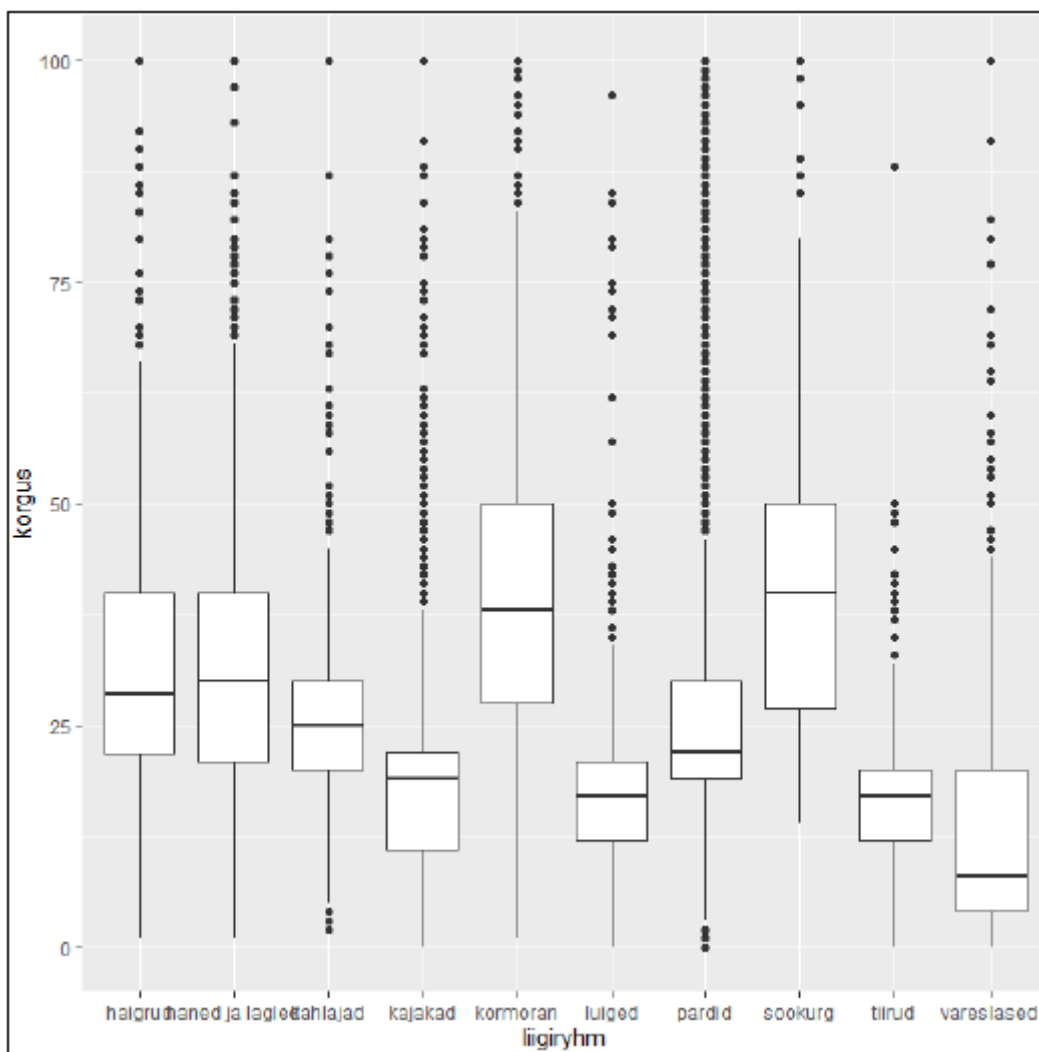
Tabel 1. Tavalisemate linnuliikide ja –rühmade lennukõrguste põhinäitajad Virtsu vaatluspunktis 2009.a. mais (Leito, 2009).

Linnuliik	Keskmine	Alumine 95% usaldus-nivoo	Ülemine 95% usaldus-nivoo	Miinumum	Maksimum	Valim, N
Aul	282	258	306	0	791	281
Valgepõsk-lagle	77	68	86	0	404	268
Mustvaeras	221	201	240	0	1181	226
Kormoran	17	13	20	0	171	149
Punakurk-kaur	102	89	114	2	634	126
Tõmmuvaeras	187	164	211	2	530	94
Järvekaur	103	88	117	3	269	83
Merivart	21	15	27	0	109	75
Aul / vaeras	316	275	356	42	691	59
Määramata kaur	73	54	93	5	373	52
Sõtkas	17	12	23	0	72	43
Hahk	4	2	5	0	24	41
Rohukoskel	10	6	14	0	60	38
Hõbekajakas	39	27	51	1	150	34
Tutt-tiir	12	10	15	1	39	31
Randtiir	8	6	9	1	15	29
Jõgi- või randtiir	6	4	9	0	19	22
Mustlagle	23	4	41	0	155	20
Hallhaigur	41	10	71	0	246	19
Jõgitiiir	9	3	14	1	33	12
Määramata vaeras	264	176	353	108	412	10

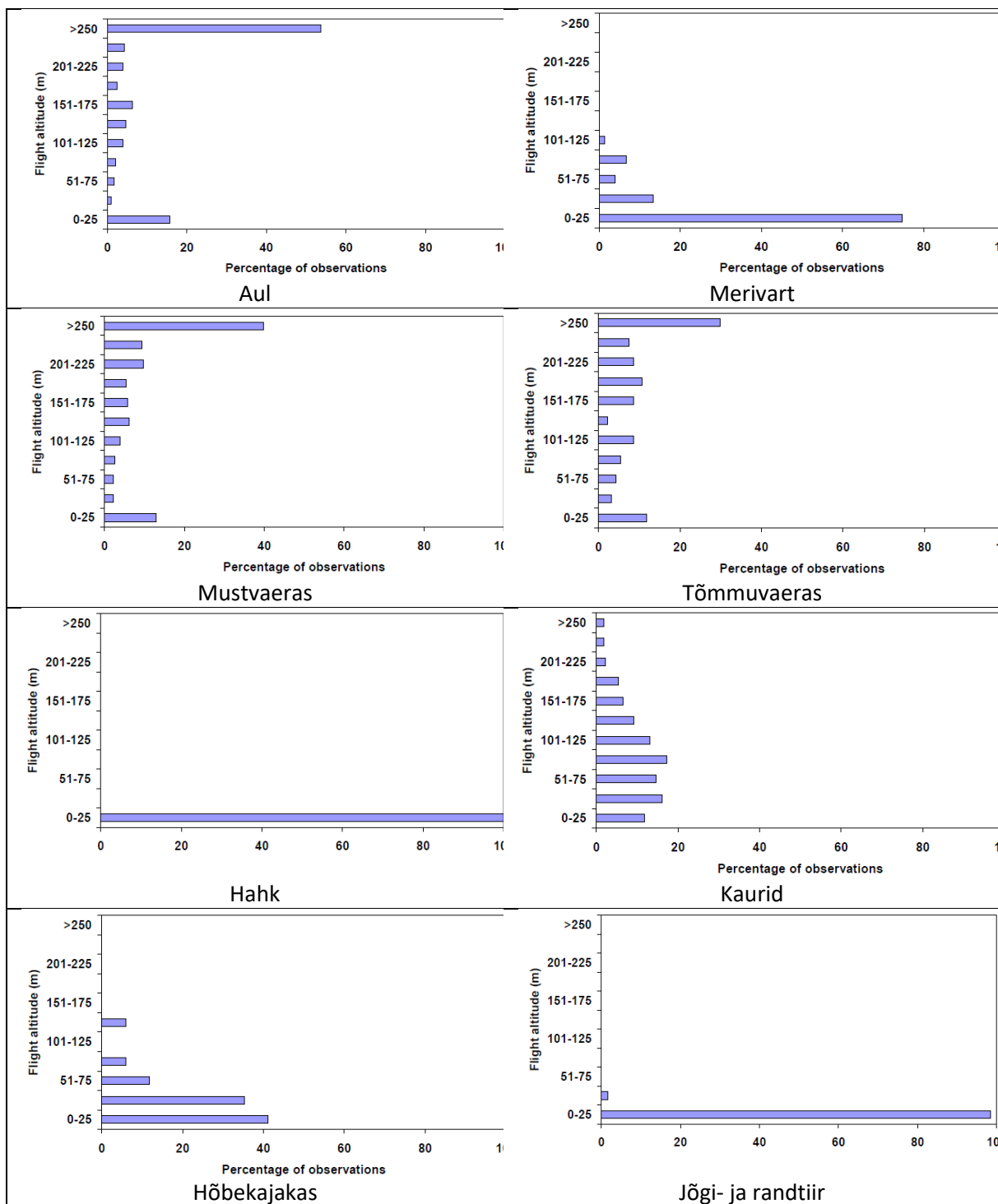
Tabel 2. Keskmine merelindude lennukõrgus Meetpost Noordwijk-s (Krijgsveld et al., 2005 järgi):

Linnurühm	Keskmine lennukõrgus (m)
kajakad	36,8
tiirud	27,6
suulad*	25,6
kormoranid	23,8
kaurid	19,0
sukelpardid	18,5
ännid	16,2
alklased	11,9
toruninalised*	11,3

\* rühmad, mille esindajad esinevad Eesti vetes ainult eksiküalistena



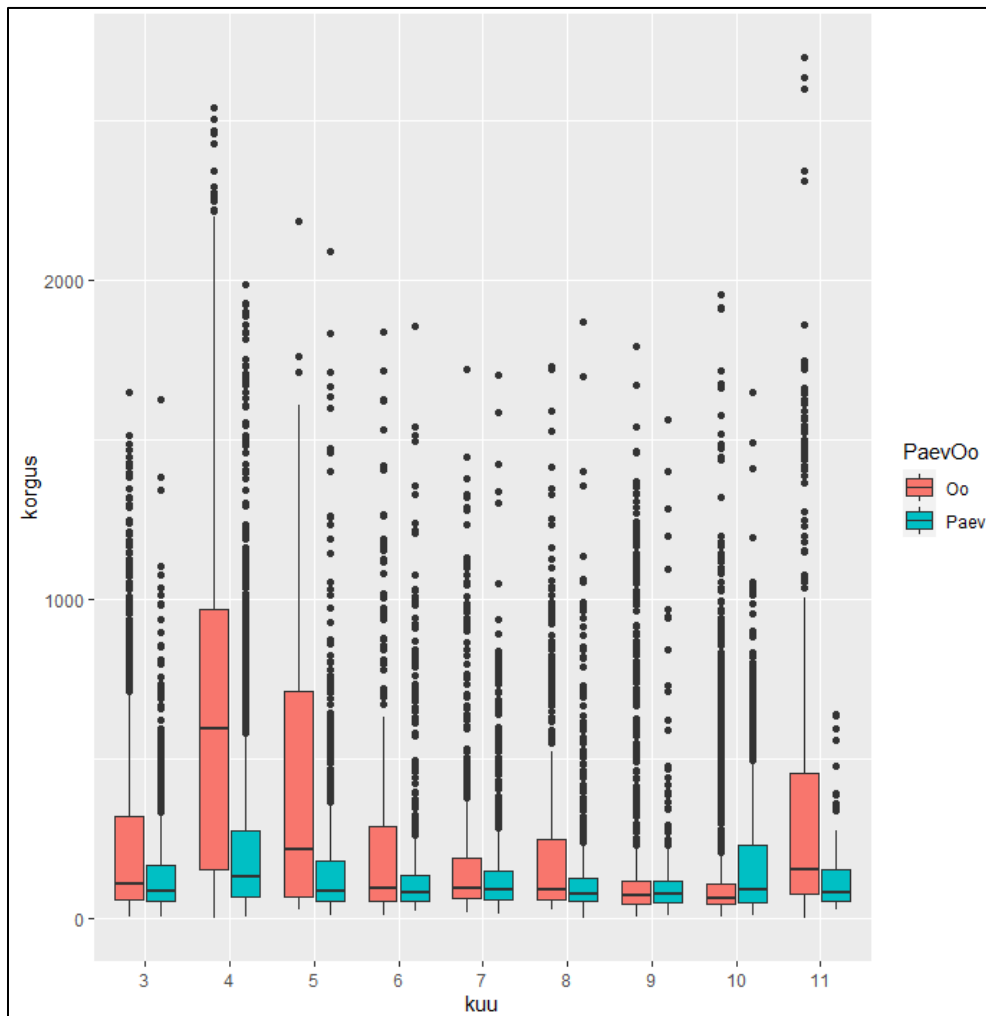
Joonis 4. Erinevate liigirühmade lennukõrgus Väikesel väinal november 2019 – oktoober 2020 (Volke et al., 2020)



Joonis 5. Näiteid tavalisemate merelindude lennukõrguste jaotumine 11 kõrgusklassi vahel Suurel väinal Virtsu vaatluspunktis 2009.a. mais. Horisontaalteljel vaatluste arv protsentides ja vertikaalteljel lennukõrgus (m) (Leito, 2009).

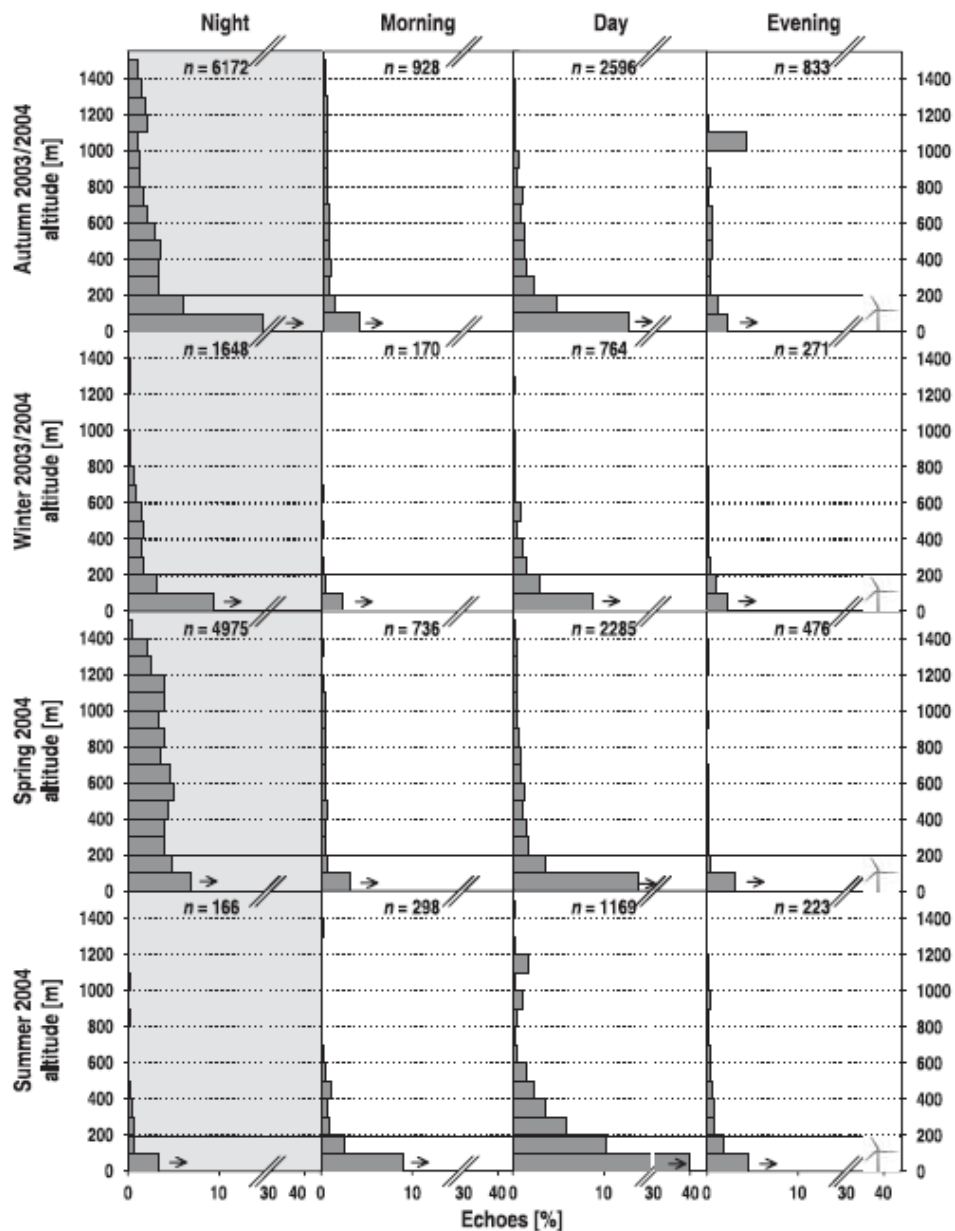
### 1.2.2. Aeg ja mere kohal lendamise põhjus

Lennukõrgus varieerub nii sesoonselt kui ka ööpäeva jooksul (joonis 6, 7, 8). Sageli seostuvad lennukõrguse ajalised erinevused mere kohal lendamise põhjusega (toituvad või transiitselt ülelendavad linnud, kohalikud linnud või läbirändajad). Läbirändavate lindude lennukõrgus on tavaliselt suurem kui kohalike lindude lennukõrgus. Seoses sellega on lennukõrgus kevadel ja sügisel (domineerivad läbirändajad) suurem kui suvel ja talvel. Eestis läbi viidud uuringutes oli lennukõrgus öösel suurem kui valgel ajal; eriti märgatavad olid lennukõrguste erinevused rändeperioodidel. Toituvate veelindude lennukõrgus on madalam kui transiitselt üle lendavatel lindudel.

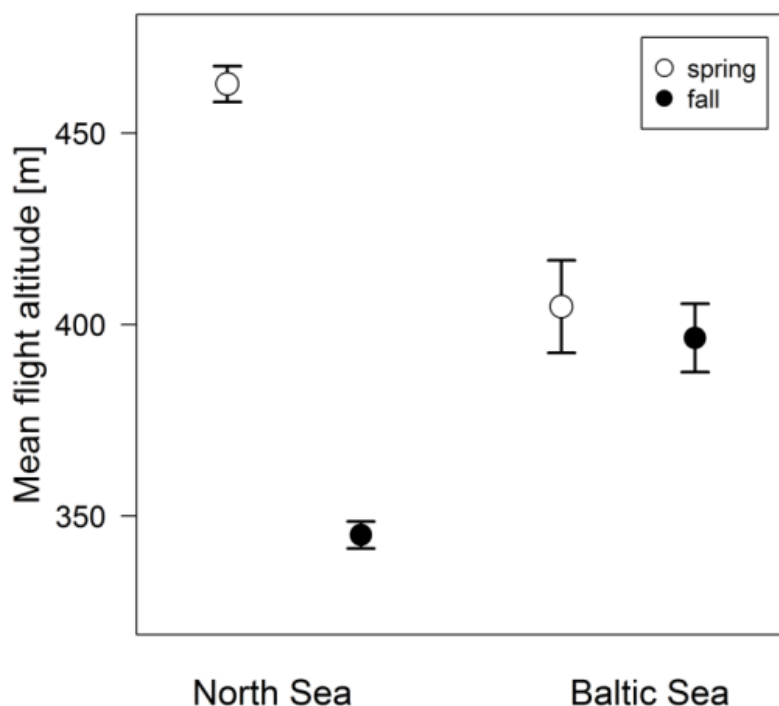


Joonis 6. Näide lennukõrguse ajalistest erinevustest (Väike väin 2019-2020; Volke et al., 2020).





Joonis 7. Näide lennukõrguse ajalistest erinevustest (Hüppop et al., 2006). Lennukõrgused (parandatud kajade protsent kõrguskihi kohta,  $n$  = parandamata kajade arv) erinevatel aasta- ja päevaegadel Põhjameres asuval uurimisplatvormil ( $54^{\circ}01'N$ ,  $06^{\circ}35'E$ ). Hooajaline summa = 100%. Madalalt lendavate lindude kaja ei saa lahutada merepinna peegeldustest. Seega rõhutavad nooled, et kajade osakaal 0 kuni 100 m kõrguses kihis on eeldatavasti suurem.



Joonis 8. Öörandurite keskmine lennukõrguse (m;  $\pm$ SE) aastaajaline (kevad, sügis) võrdlus Põhjamerel ja Läänemerel Welcker (2019) järgi.

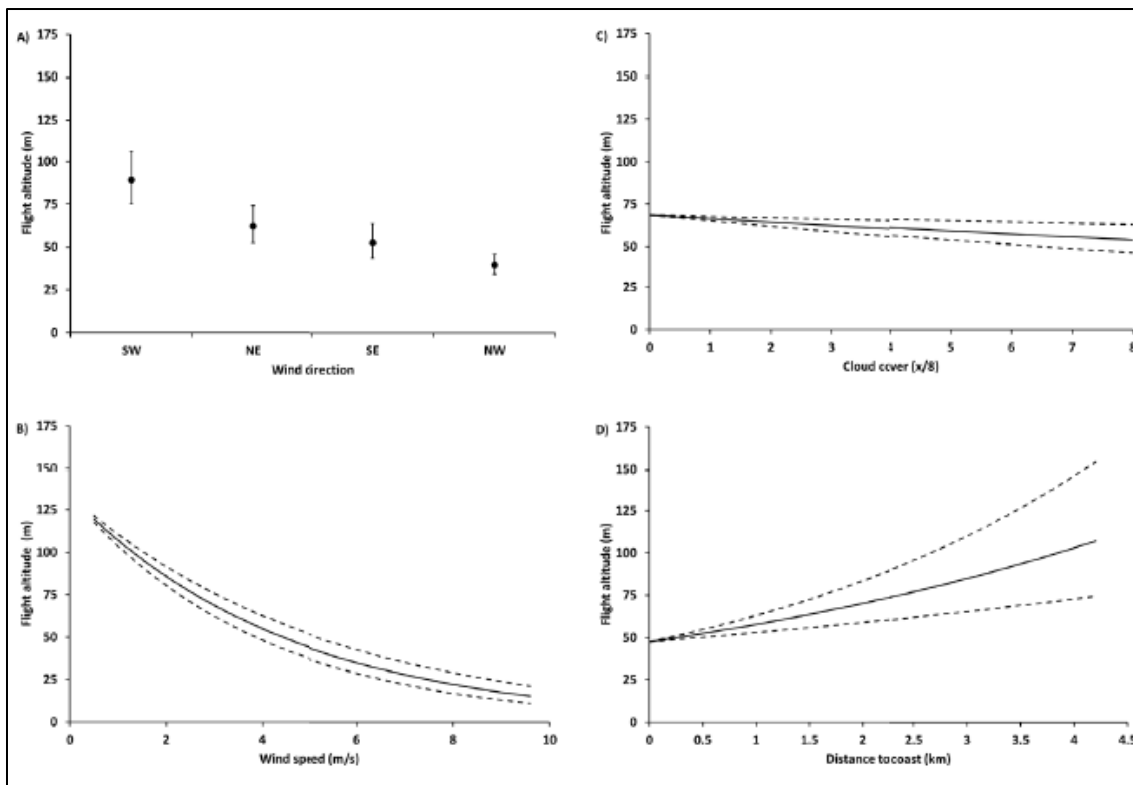
### 1.2.3. Maastiku iseloom

Linnud lendavad neile omase maastiku kohal madalamal ja suurendavad võõra maastiku kohale välja lennates oma lennukõrgust. Maismaalinnud püüavad merealad ületada suurel kõrgusel. Veelindude lennukõrgus vastupidi on avamere kohal tavaliselt väiksem kui maismaa kohal. Veelindude lennukõrguse seos kaugusega rannajoonest on siiski varieeruv ja võib sõltuda liigist ning kohalikest oludest. Näiteks Suurel väinal täheldati lennukõrguse suurenemist kauguse suurenemisel rannajoonest, mille võimaliku põhjusena nimetatakse ranna lähedal olevaid peatumisalasid.

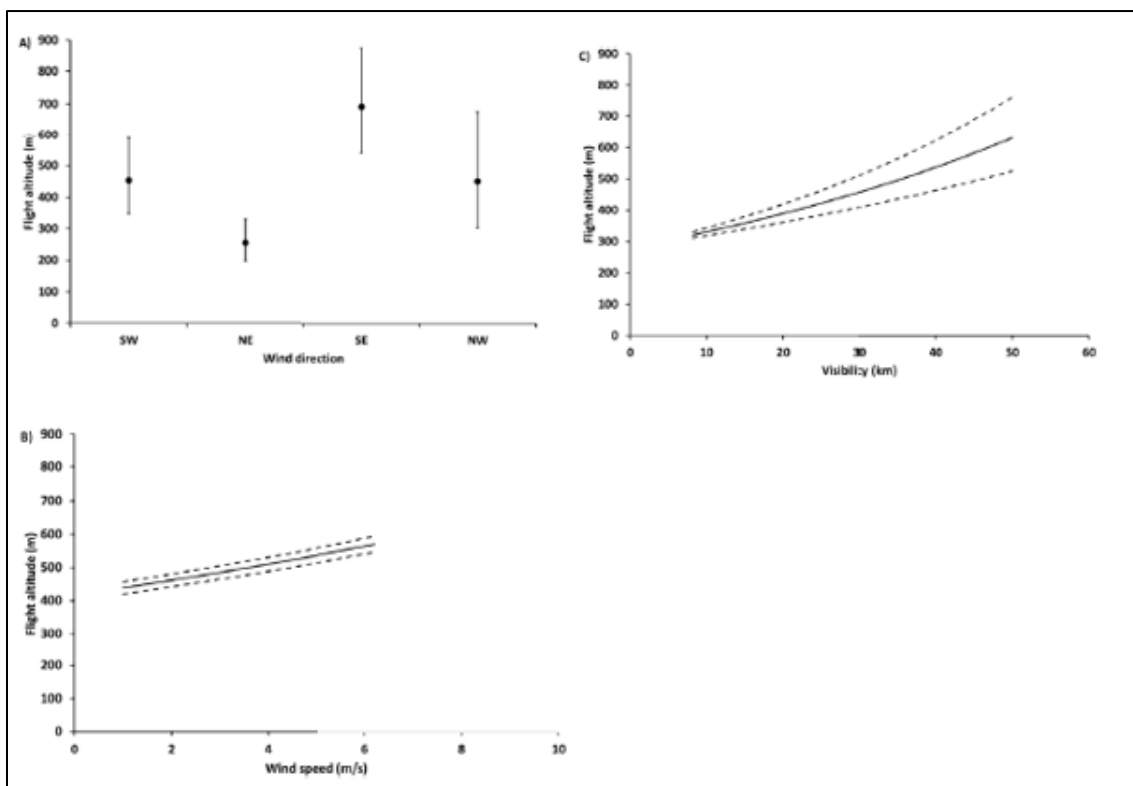
### 1.2.4. Ilmastikutingimused

Peamiseks lennukõrgust mõjutavaks ilmastikuteguriks peetakse tuult. Vastutuule korral on lennu kõrgus üldjoontes väiksem kui taganttuule korral. Seaduspära - mida tugevam vastutuul, seda madalam lennukõrgus - on näidatud ka veelindude puhul (Krüger, Garthe, 2001). Tugeva tuule korral on lennukõrgus väiksem. Mõõdukate tuule kiiruste korral võib esineda ka vastupidine olukord, kus tuule kiiruse suurenemine maapinnast kõrgemal on rändavatele lindudele soodne.

Mõnedes töödes ja mõnede liikide puhul on leitud seoseid lennukõrguse ja sademete, nähtavuse ning pilvisuse vahel (joonis 9, 10). Sademete korral on lennukõrgus üldiselt väiksem, tugeva vihma või rahe ajal võivad linnud laskuda veepinnale. Öösel võib lennukõrgus olla suurem parema nähtavuse korral, päeval väiksem lauspilvituse korral (Kahlert et al., 2012).



Joonis 9. Näide lennukõrguse ning tuule suuna (A), tuule kiiruse (B), pilvisuse (C) ja rannast kauguse (D) vahelisest seosest valgel ajal (Suur väin, mai 2009; Kahlert et al., 2012).



Joonis 10. Näide lennukõrguse ning tuule suuna (A), tuule kiiruse (B) ja nähtavuse (C) vahelisest seosest öösel (Suur väin, mai 2009; Kahlert et al., 2012).

### 1.2.5. Tuuleparkide olemasolu

Tuuleparkide mõju lennukõrgusele on varieeruv (lennukõrgus võib suurened, väheneda või jääda muutumatuks) ja sõltub liigist. Näiteks on täheldatud tiirudel ja hahal lennukõrguse vähenemist, kajakatel lennukõrguse suurenemist ja kormoranil mõju puudumist tuuleparki sisenemisel (Petersen et al., 2006; Camphuysen, 2011, Krijgsveld et al., 2011). Öörandurite lennukõrgust võib vähendada tuulikute tähistamiseks kasutatavate tulede ligimeelitav mõju (Drewitt, Langston, 2008).

## **2. Kokkupõrkerisk**

Avamerel on tuulikutega toimunud kokkupõrgete fikseerimine raskendatud, näiteks ei saa seal loendada tuulikute all hukkunud lindude jäänuseid (Degraer et al. 2020). Kokkupõrkeriski kirjeldamiseks kasutatakse mudeleid, kus püütakse arvestada võimalikult paljude kokkupõrkeriski mõjutada võivate teguritega. Kõige sagedamini kasutatavaks mudeliks on nn. Bandi mudel (Band, 2012) ja selle hilisemad edasiarendused (Masden, Cook, 2016; McGregor et al., 2018). Viimastes on arendatud peamiselt modelleerimisel tekkiva määramatuse kirjeldamise meetodikat. Mudel on rakendatav internetipõhiselt ([https://dmpstats.shinyapps.io/avian\\_stochcrm/](https://dmpstats.shinyapps.io/avian_stochcrm/)). Kokkupõrkeriski modelleerimise selgitus on toodud lisa 2.

Lindude lennukõrgused mere kohal ulatuvad üle kilomeetri. Võimatu on leida selliseid tuulikute mõõtmeid, mille puhul kokkupõrkerisk lindudega oleks täielikult välistatud.

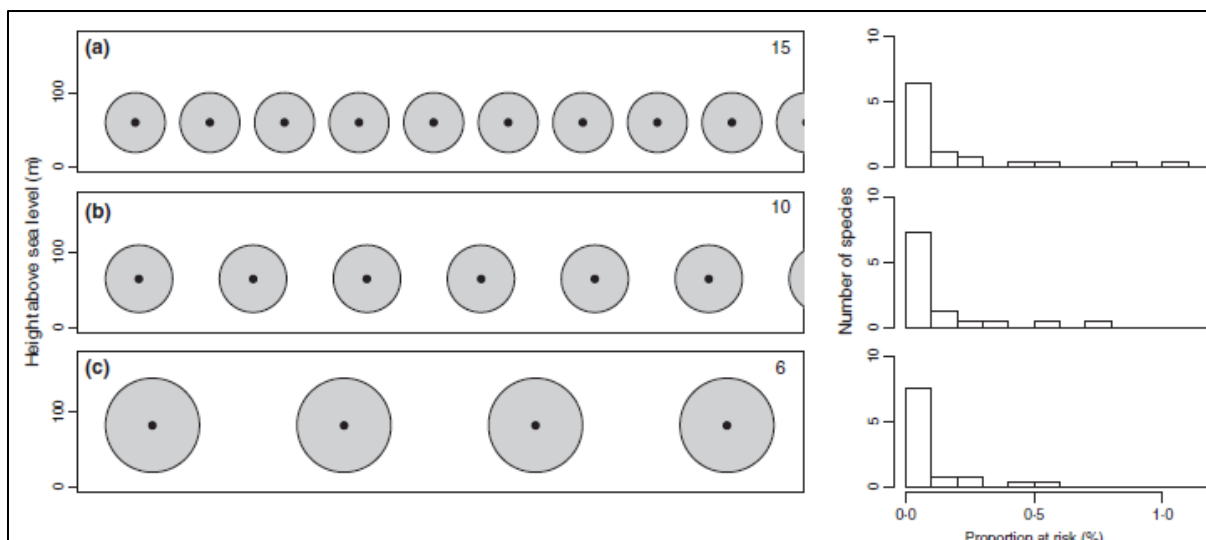
Üldiseks seaduspärasuseks on lindude lennu intensiivsuse vähenemine vastavalt kõrguse kasvule.

Konkreetne lennu intensiivsus ning kokkupõrkerisk mingis kõrgusvahemikus sõltub paljudest erinevatest teguritest ja varieerub nii ruumiliselt kui ajaliselt.

Kokkupõrkeriski seisukohast on tuulikud seda ohtlikumad, mida madalamale ulatub pöörleva rootori töötsooni alumine piir. Kõrguse suurenemisel lendavate lindude arv enamasti väheneb ja kõrgel pöörlevate rootorite korral lendab suur osa (vee-)lindudest allpool rootorite tööpiirkonda. Isegi lennukõrguste kattumisel rootorite tööpiirkondadega on kokkupõrkerisk tööpiirkondade allosas väiksem kui rootorite telgede kõrgusel.

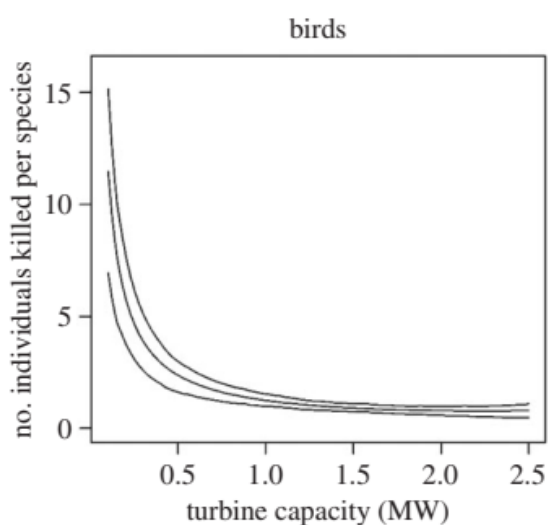
Kokkupõrkeriski seisukohast on tuulikud seda ohtlikumad, mida suurem on rootorite tööpiirkonna kogupindala. Üksiku tuuliku puhul kaasneb rootori raadiuse suurenemisega rootori tööpiirkonna pindala suurenemine; samas suureneb rootori raadiuse suurenemisel tuulikutevaheline kaugus ja väheneb tuulikute koguarv, mis kokkuvõttes võib vähendada kogu tuulepargi rootorite tööpiirkondade summat.

Näiteks on leitud, et rootorite läbimõõdu suurenemisel vähenes enamuse vaadeldud liikide kokkupõrkerisk tiivikutega (joonis 10, Johnston et al, 2014).



Joonis 10. Tiivikute läbimõõdu seos kokkupõrkeriskiga. Vasakul on skemaatiliselt kujutatud tuulikute komplekti, mis on vajalik 30 MV elektri tootmiseks (tuulikute arv ülemises paremas nurgas) (Johnston et al, 2014).

Sarnase modelleerimisülesande on läbi teinud ka Thaxter ja kolleegid (2017) hüpoteetilise 10 MW tuulepargi kohta (joonis 11).



Joonis 11. Keskmine lindude suremus (kõik liigid) hüpoteetilises 10 MW tuulepargis sõltuvalt ühe tuuliku nimivõimsusest (lisatud 95% usalduspiirid; Thaxter et al. 2017 järgi).

Belgia avamere tuuleparkide seire aruandes on järeldatud, et suurema merepinna ja rootori töötsiooni alumise piiri vahelise kaugusega turbiinid põhjustavad kokkupõrkehvrite väiksemat arvu ja suure turbiinide tihedusega kaasneb suurem kokkupõrgete arv (Degraer et al., 2020).

Põhjamere lõunaosa olemasolevate ja planeeritavate tuuleparkide poolt põhjustatud suremuse modelleerimisel kolme kajakaliigi (tõmmu-, meri- ja hõbekajakas) põhjal leiti, et täiendav aastane suremus moodustab PBR-ist (potential biological removal<sup>1</sup>) 100-160% ja soovitati negatiivse mõju

<sup>1</sup> Maksimaalne isendite arv (lisaks looduslikule suremusele), mida võib asurkonnast eemaldada ilma et see kahjustaks asurkonna optimaalse ja jätkusuutliku arvukuse säilimist või selle saavutamist.

vähendamiseks kasutada kavandatavates tuuleparkides vähem, aga suuremaid tuulegeneraatoreid (Ministry of Economic Affairs, 2015; Platteeuw et al., 2017).

Looduskaitseliselt olulisemate rändliikide (merepardid, kaurid, alklased) lennukõrguste sagedusjaotused on L-kujulised (merepinnale lähemal lendab rohkem linde). Rakendusliku järeldusena riigi mereplaneeringu tarbeks saab sätestada planeeringuga tuuleparkides merepinna ja rootori tötsooni alumise piiri (laba vähim kaugus merepinnast) minimaalse vahemaana 25 kõrvaltingimusega, et täpne vajalik tipukõrgus selgitatakse välja hoonestusloa menetluses kohapealse eeluuringu käigus. Praegusele lähedane soovitus (30-35 m) anti varem koostatud töös (Eesti Ornitoloogiaühing, 2016).

### 3. Barjääriefekt

Enamus uuringuid avamere tuuleparkides on keskendunud peatuvate lindude elupaigakasutuse vähenemisele tuulepargi alal ja selle ümbruses ja/või lindude hukkimisrisi ning hukkimissageduse modelleerimisele ja barjääriefektile ei ole piisavalt tähelepanu pööratud (Fox et al., 2006) ning selle uurimiseks on puudunud ka ühtne metoodika (Masden et al., 2009). Barjääriefektina mõistetakse lindude tuuleparki vältivat käitumisreaktsiooni, mille tõttu suureneb lindude lennu teepikkus. Ühelt poolt vähendab tuulepargi vältimine lindude hukkimisrisi, samas on paljude lindude rändeteekond energeetiliselt kulukas ning iga rändeteel oleva takistusega, näiteks tuulepargiga, millest tuleb mööda lennata, kaasneb rändeteekonna pikenedamine ja täiendav energiakulu. Olulisemaks võib täiendavat energiakulu pidada juhtudel, kui tuulepark paikneb lindude regulaarsete lendude teel, näiteks toitumis-, pesitsus- ja/või peatumisalade vahel. Tuulepargi vältimisega kaasnevat täiendavat energiakulu lindude regulaarsetel lendudel pesitsus- ja toitumisalade vahel on ka modelleeritud (Masden et al., 2010) ja näidatud, et üheksast veelinnuliigist oli suurim täiendav energiakulu jõgitiirudel, kes sooritavad päevas palju toitumislende ning kelle toitumisalad võivad asuda kuni 12 km kaugusel pesitsusaladest (Thaxter et al., 2012). See on ka üks põhjus, miks on tiirud ühed kokkupõrkealtimad linnud (Everaert, Stienen, 2007).

Lindude käitumuslikke reaktsioone tuuleparkide lähikonnas ja tuuleparkides on kõige enam uuritud veelindudel (sukelpardid, alklased, kajakad ja tiirud, kaurid jt). Vähem on andmeid maismaalindude kohta ja teenimatult vähe on tähelepanu pööratud värvuliste rändele (Fox & Petersen, 2019).

#### 3.1. Veelinnud

Veelindude rändeaegseid käitumuslikke reaktsioone on kõige rohkem analüüsitud Taani tuuleparkide põhjal. Horns Rev 1 ja Nystedi tuuleparkidele reageerisid rändel olevad veelinnud kuni viie kilomeetri kaugusel tuulikute (sinnani ulatuski radari tööraadius) ja tavaliselt muutsid kolme kilomeetri kaugusel pargist lennusuunda, et vältida parki sisenemist. Horn Rev tuulepargi puhul hinnati, et 71-86% linnuparvedest, mis suundusid algselt tuulepargi poole, kaldusid 1,5-2 km enne parki kõrvale, et sinna mitte siseneda (Petersen et al., 2006). Nysted'i tuulepargi puhul hinnati, et 78% rändel olevatest lindudest vältis tuuleparki lennutrajektoori muutmisega (op cit.). Võrreldes tuulepargis ja selle ümbruses lendavate lindude suhtarve öösel ja päeval, on leitud, et öösel siseneb tuuleparki suhteliselt vähem linde kui päeval (Krijgsveld et al., 2011; Petersen et al., 2006).

Utgrundeni tuulepargis Kalmari väinas (Rootsi) nähti hahkasid harva lendamas tuulikutele lähemal kui 500 m ja osad linnud muutsid oma lennusuunda juba 3-4 km enne tuuleparki (Pettersson, 2005). Nystedi tuulepargis vähendasid parki sisenenud veelinnud kokkupõrkeriski sellega, et lendasid turbiiniridade vahel, sageli võrdsel kaugusel kummastki tuulikureast, ühtlasi lennati madalamalt kui

enne parki sisenemist. Samuti muutsid linnud lennusuunda selliselt, et lühimat teed tuulepargist väljuda (Petersen et al., 2006).

Barjääriefekti suuruseks, see tähendab lennuteekonna piknemiseks tuulepargi tõttu, hinnati Nystedi tuulepargi puhul 500 m, mida peeti hahkade kogu rändetee 1400 km pikkuse juures väheoluliseks (Masden et al., 2009). Nystedi tuulepargi pindala on 24 km<sup>2</sup> (72 2,3 MW tuulikut). Suuremate tuuleparkide puhul pikeneb ka lindude lennuteekond enam. Autorid rõhutavad, et tulevikus võivad paljude uute tuuleparkide lisandumisega mõjud kuhjuda ja osutada oluliseks, eriti kui arvestada ka teisi inimtegevusest tulenevaid survetegureid (Drewitt, Langston, 2008).

OWEZ (Holland) tuulepargis toimunud uuringute järgi vältis sõltuvalt liigist 18-34% (keskmiselt 28%) lindudest tuuleparki sisenemist (radari poolt salvestatud lennuradade kõrvalekaldumist arvestades). Vähemalt 97,6% nendest lindudest, kes tuuleparki sisenesid, vältisid lendamist rootori töötsooni kõrgusvahemikus. Nii kõrge vältimismäär tähendab madalat kokkupõrkeriski. Lindude lennuteekonna piknemist (barjääriefekti) hinnati marginaalseks (Hartman et al., 2012).

Barjääriefekti suurust veelinnuliikidele on üldistanud Humphreys ja kolleegid (2015), eristades liigid, kellele barjääriefekt avaldab keskmist ja väikest mõju ning kelle kohta andmeid ei ole (tabel 2). Sukelpartidele, rohukosklale, kormoranile, kauridele ja alklastele on mõju hinnatud keskmiseks, teistele madalaks. Osade veelinnuliikide kohta andmed puuduvad. Tabelis toodud jaotusest tekitab kahtlust kormorani arvamine nende liikide hulka, kellele tuulepargid avaldavad keskmise suurusega barjääriefekti. Teistes uuringutes on näidatud, et tuulepargi ala võib liigi isenditele muutuda atraktiivsemaks kui see oli enne pargi ehitamist (näit. Lindeboom et al., 2011).

Tabel 2. Barjääriefekti mõju veelinnuliikidele (Humphreys et al., 2015 järgi). K-keskmine; V- väike; ? – andmeid ei ole.

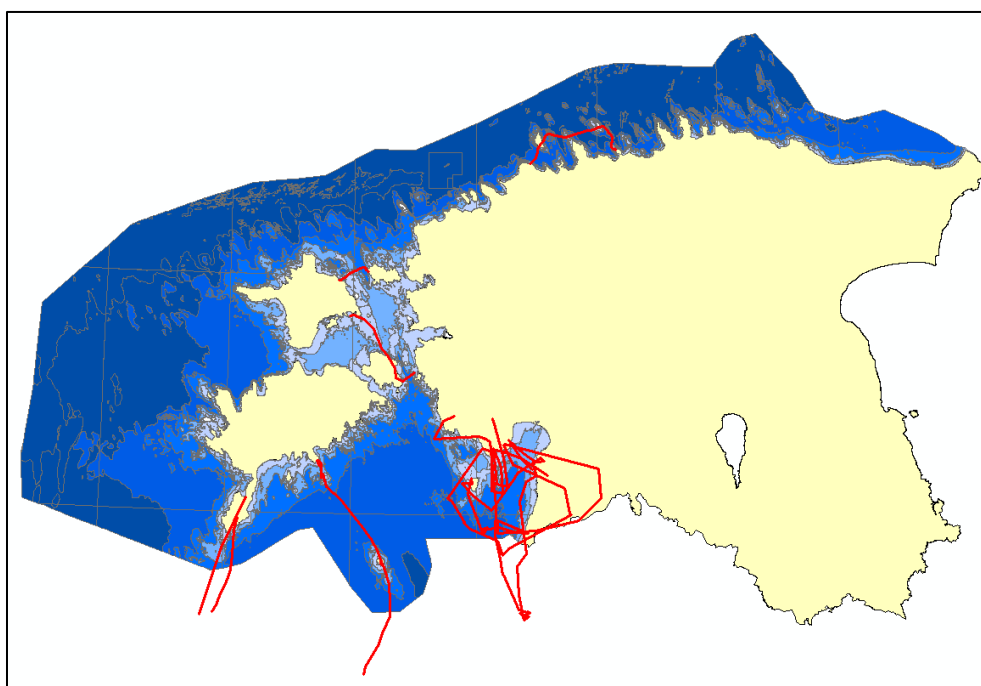
Liik	Barjääriefekti mõju
Merivart	K
Hahk	K
Aul	K
Mustvaeras	K
Tõmmuvaeras	K
Sõtkas	K
Rohukoskel	K
Jääkoskel	?
Punakurk-kaur	K
Järvekaur	K
Kormoran	K
Tuttpütt	?
Sarvikpütt	?
Naerukajakas	V
Väikekajakas	V
Kalakajakas	V
Tõmmukajaks	V
Höbekajakas	V
Merikajakas	V
Väiketiir	V

Mustviires	?
Tutt-tiir	V
Jõgitiir	V
Randtiir	V
Alk	K
Krüüsel	K

### 3.2. Röövlinnud ja must-toonekurg

Röövlinnud on pika eluea ja tihti väikeste asurkondadega nn K-strateegid, kelle puhul tuuleparkidest põhjustatud täiendav suremus võib mõjutada asurkondade suurust ja trendi. Paljud liigid on rahvusvaheliselt ja riiklikult kaitstavad ja ohustatud (Skov et al., 2016). Röövlindude peetakse tuuleparkide poolt kõige ohustatumaks linnurühmaks (Desholm, 2009; Thaxter et al., 2017). Kuna röövlinnud proovivad vältida suurte veealade ületamist, võib see avamere tuulepargi asumisel rände peasuuna lähedal kaasa tuua nn saare-efekti – linnud lendavad tuulepargi suunas, lootes leida sealt maismaad. Sellist rändesuunast kõrvalekaldumist tuulepargi tõttu on näidatud Läänemeres asuva Rødsand II (Taani) tuulepargi puhul (Skov et al., 2016). Sama hüpoteesi kontrolliti Anholt'i tuulepargi (Taani) puhul, mis asub Kattegati väinas. Ehitusjärgne uuring saare-efekti kohta selget vastust ei andnud, kuid näitas suurt barjääriefekti. Keskmiselt 1/3 röövlindudest vältis tuuleparki täielikult (sh 59% puna-harksabadest, 45% tuuletallajatest, 42% raudkullidest). Peale 20 km läbimist pöördus umbes 75% tuuleparki vältivatest röövlindudest tulnud teed maismaa kohale tagasi, ülejäänud jätkasid rännet ja järgisid lennul tuulepargi perimeetrit (Jensen et al., 2016).

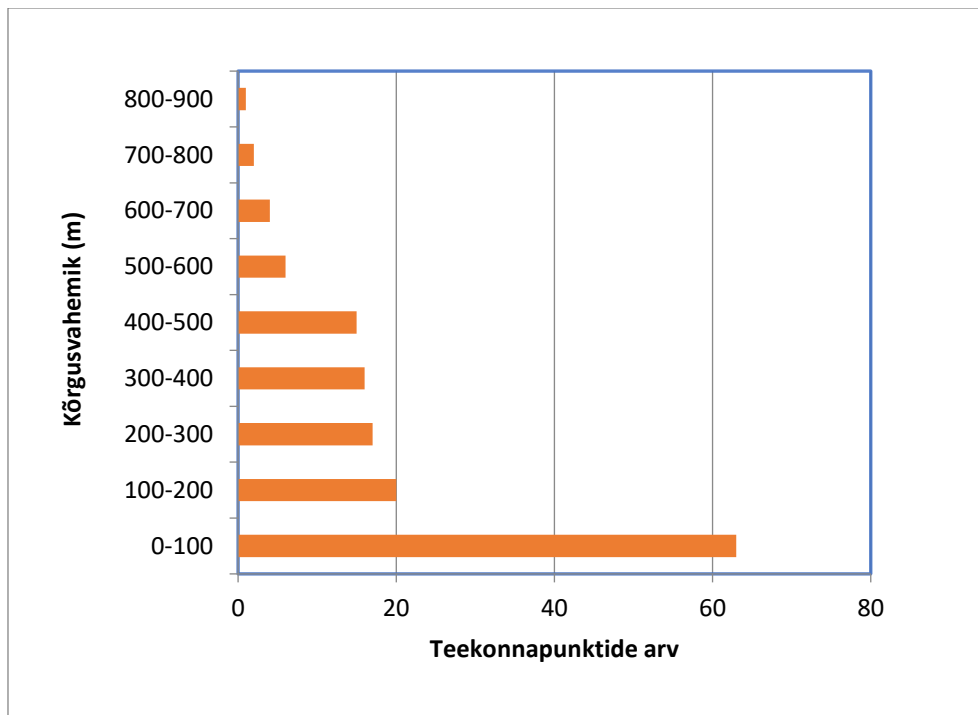
Eestis on GPS-GSM ja satelliitsaatjatega varustatud nii kotkaid kui must-toonekurgi (kõik kuuluvad I kaitsekategooria liikide hulka). Valdavalt eelistavad need liigid rännata maismaa kohal, kuid mõned isendid ületavad ka veeala (joonis 12). Tähtis rändetee kulgeb Säärelt Kuramaale. Kõige meelsamini lendavad suure veevälja kohal merikotkad. Nendele kuuluvad enamus joonisel näidatud lennuradadest. Üks Saaremaa must-toonekurg sooritas rände Läti suunal vahepeatusena Ruhnu saarel.



Joonis 12. Kotkaste ja must-toonekure lennurajad mereala kohal (Andmed: Kotkaklubi).



Kotkad ja must-toonekured ületavad merd enamasti tuulikute poolt ohustatud kõrgusvahemikus – kasutada oleva väikese andmestiku põhjal asuvad 69% teekonnapunktidest kõrgusvahemikus 0-300 m (joonis 13). Ka Taani uuringus on näidatud, et röövlinnud eelistavad merealasid ületada tuulikute rootorite kõrgusvahemikus (Skov, Heinänen, 2015)



Joonis 13. Teekonnapunktide kõrguste sagedusjaotus mere kohal lendavatel kotkastel ja must-toonekurgedel (Andmed: Kotkaklubi).

### 3.3. Värvulised

Värvuliste ränne kulgeb üle avamere enamasti hajusalt, tihti suurel kõrgusel, ja nende kohta andmete saamine on tehniliselt keerulisem kui suuremate lindude jälgimine laserbinokli või radari abil (Fox, Petersen, 2019). Rästaste, kuldnokkade ja väiksemate värvuliste (sookiur, põldlõoke, metsvint) kohta on päevaste visuaalvaatluste abil selgitatud, et nende keskmine lennukõrgus Hollandi merealal oli 27,0 (STD 25,6) m (Krijgsveld et al., 2005). Keskmiselt pool kuni kolm neljandikku rootorite poolt hõlmatud kõrgusvahemikus lennanud salkadest ja parvedest sisenesid päevasel ajal tuuleparki, kuid peaaegu kõik salgad vältisid turbiinide vahetut lähiümbrust (Krijgsveld et al., 2011). Samas on teada, et värvuliste ränne toimub väga suure kõrgusvahemikus (Hüppop et al., 2006). Suurte populatsioonide tõttu on negatiivne mõju asurkonna tasemel värvuliste puhul vähetõenäoline, kuid massilise rände ajal võib ebasoodsatel juhtudel esineda suure hulga lindude hukkumist (Fox, Petersen, 2019). USA ja Kanada maismaa-tuuleparkides on värvuliste osakaal hukkunud lindude hulgas kõige suurem (Erickson et al., 2014)

#### 4. Tuulepargi konfiguratsiooni mõju

Tuuleparkide konfiguratsiooni mõju lindude vältimiskäitumisele on uuritud vähe ja seetõttu on usaldusväärseid järeldusi keeruline teha. Andmed põhinevad lindude lennutrajektooride analüüsil Egmond aan Zee tuulepargis (Krijgsveld et al., 2011) ja sama tuulepargi andmete võrdlemisel Horns Rev tuulepargis saadud tulemustega (Krijgsveld, 2014). Tuulikute paigutus tuulepargis omab ilmselt lindude käitumisele märkimisväärset mõju. Linnud väldivad tuuleparki vähem, kui tuulikute vahekaugus on suurem (tabel 3). Linnud eelistavad lennata tuulepargi neis piirkondades, kus naabertuulikud jäävad teineteisest kaugemale (pigem tuulikuridade vahel) või kus rootorid ei pöörle (op cit.).

Tabel 3. Lindude osakaal liigirühma kõigist selles piirkonnas lennanud lindudest, keda vaadeldi tuulepargi sees Horns Rev tuulepargis (tuulikutevaheline kaugus reas 560 m, tuulikuridade vaheline kaugus 560 m) ja Egmond aan Zee (OWEZ) tuulepargis (tuulikutevaheline kaugus 650 m, tuulikuridade vaheline kaugus 1000 m) (Krijgsveld, 2014 järgi).

Liik/rühm	% lindudest, keda vaadeldi tuulepargi sees	
	Horns Rev	OWEZ
Haned, lagled	21	
Mustvaeras	11	5
Kaurid	0	
Kormoran	30	48
Kalakajakas	38	44
Tõmmukajakas	38	49
Hõbekajakas	53	35
Merikajakas	38	48
Väikekajakas	5	77
Naerukajakas		31
Tutt-tiir		33
Alklased	4	
Kahlajad	11	
Kaelustuvi	29	
Rästad		38
Kuldnokk		52
<b>Kokku</b>	<b>23</b>	<b>35</b>

Tuulepargi konfiguratsiooni kohta on arvatud, et tuuleparkide mõju lindudele saab vähendada, kui

(a) peamises lennusuunas jätta lindudele tuulepargi sisse laiem koridor (laiust ei täpsustata);

(b) barjääriefekti saab vähendada, kui jätta naabertuuleparkide vahele piisav vaba mereala.

Lindude käitumise modelleerimisel on saadud tulemus, et turbiinide paigutamine klastritena võib kõige paremini vähendada lindude liikumisbarjääri ja vähendada kokkupõrkeriski. Selleks peaks suurtel tuuleenergia arendusaladel avamerel jätma tuulikuvabu koridore, mis võimaldavad lindudel lihtsamini tuuleparke läbida (Masden et al., 2012).

Koridori laiuseks või naabertuuleparkide vaheliseks kauguseks peaks merepartidega arvestades olema vähemalt 5 kilomeetrit. Kuna merepartide lennutrajektooride analüüs näitab, et linnud hakkavad tuulepargi vältimiseks lennusuunda muutma sellest 2-3 km kaugusel, peaks efektiivse koridori laius olema vähemalt kahekordne reaktsioonikaugus ehk 4-6 km (keskmiselt 5 km). Ka sel juhul toimib koridor kõige paremini siis, kui see paikneb lindude peamise lennusuuna sihis või sellega väikese nurga all.

Läheteülesande küsimusele „Kui linnud peavad Eesti mereala planeeringus määratud tuuleparkidele sobilikes alades tuulikute kõrgusest tulenevalt oma lennukoridori muutma, siis kas ja kus saavad nad lennata?“ tuleb vastata kolmes osas.

1. Sensitiivsete alade hulka, kuhu tuuleparke ei planeerita, on mereala planeeringus arvatud lindudele kõige olulisemad alad, sh tähtsamad rändekoridorid Eesti merealal (Eesti Ornitoloogiaühing, 2016).

2. Valdav osa lindudest, kes lähenevad tuulepargi alale, ei tee otsust lennukoridori muutmiseks mitte tulenevalt tuulikute kõrgusest, vaid tuulepargi olemasolust.

3. Veelinnud jätkavad lendu oma peamises rändesuunas, kuid suur osa neist ei sisene tuuleparki, vaid püüab rändesuunast võimalikult vähe kõrvale kaldudes lennata ümber tuulepargi ala. Mida suurema pindalaga on tuulepark, seda enam pikeneb lindude rändeteekond. Samas, mida suurem on tuulikute omavaheline kaugus tuulepargis, seda suurem osa linde tuuleparki siseneb (vt võrdlev tabel 3; Krijgsveld, 2014 järeldused) ja seda väiksem on barjääriefekt nende lindude jaoks. Osa röövlinde muudab rändel lennusuunda, järgides sarnaselt paljudele veelindudele tuulepargi perimeetrit, osa siseneb tuulepargi alale ja osa võib tagasi pöörduda maismaa kohale, kust nad oma lendu mere kohale alustasid. Värvulised jätkavad lendu peamise rände suunas ja pool kuni kolm neljandikku neist siseneb tuulepargi alale (Egmond aan Zee tuulepark). Kuigi erinevatest tuuleparkidest ühtse metoodikaga kogutud võrdlusandmeid ei ole, võib ka maismaalindude osas kehtida seos, et mida suurem on tuulikute vaheline kaugus pargis, seda suurem osa lindudest siseneb pargi alale.

## 5. Kokkuvõte ja rakenduslikud järeldused Mereala planeeringu tarbeks

Käesolevas peatükis esitatakse kokkuvõtte ja rakenduslikud järeldused ning esitatakse ettepanekud lähtudes Eesti mereala planeeringus tuuleenergeetika tootmiseks valitud alade paiknemisest ning tingimustest ja suunistest, mis on seatud nende alade edasiseks kavandamiseks tegevusloa ja selle mõju hindamise menetlemisel.

Eesti mereala planeeringus on valitud tuuleenergeetika arendamiseks sobilikud alad nii, et need ei kattu lindude jaoks sensitiivsete aladega, st aladega, mis on kõige olulisemad veelindude rändeks, toitumiseks ja peatumiseks (vt lisainfot Eesti Ornitoloogiaühing, 2019). Samuti ei kattu tuuleenergeetika arendamiseks sobilikud alad maismaalindude olulisemate rändekoridoridega. Seega ei kaasne tuuleenergeetika arendamiseks sobilike alade kasutuselevõtuga lindudele kõige olulisematel aladel (veelindude sensitiivsetel aladel ja maismaalindude rändekoridorides) elupaikade hävimist või muutumist, takistusi lennu- ja rändeteedel (barjääriefekti), kokkupõrkeid tuulikutega ega häirivat ja eemaletõrjuvat mõju. Tuuleenergeetika arendamiseks sobilikel aladel, mis lindude peatumisaladena on teadaolevate andmete järgi vähese tähtsusega, kuid mida erinevad linnuliigid mõningal määral kasutavad, võib esineda lokaalsel tasandil elupaikade hävimist või muutumist ning häirivat ja eemaletõrjuvat mõju. Ehkki kaugel avamere kohal toimuvat rännet ei ole Eestis ühegi väliuuringu käigus selgitatud, tuleb pidada tõenäoliseks, et takistus rändeteel (barjääriefekt) esineb. Kokkupõrkeid tuulikutega ei saa välistada ühegi tuulepargi puhul. Tegevusloa menetluses tuleb välja selgitada iga planeeritava tuulepargi lokaalse tasandi mõju olulisus ja rakendamist vajavad leevendusmeetmed.

### 5.1. Kokkuvõtte

Linnustikule tuuleparkide rajamisega kaasnevaid mõjusid jagatakse enamasti nelja suurde kategooriasse – elupaikade hävimine või muutumine, takistused lennu- ja rändeteedel (barjääriefekt), kokkupõrked tuulikutega, häiriv ja eemaletõrjuv mõju. Elupaikade hävimist ja muutumist käesolevas töös ei käsitleta. Häiriv ja eemaletõukav mõju omab suurimat tähtsust veelindudele oluliste peatumisalade puhul, kui linnud eelistatud elupaiku enam kasutada ei saa või kasutavad oluliselt vähem. Olemasolevate andmete põhjal ei asu tuuleenergeetika arendamiseks sobilikel aladel veelindude olulisi peatumisalasid (Eesti Ornitoloogiaühing, 2019). Peamised vaatluse all olevad mõjukategooriad on seega tuulikute kõrgusest ja nende paigutusest tulenev mõju barjääriefekti suurusele ja lindude kokkupõrkeriskile.

Eesti mereala planeeringu lähtekohaks on kuni umbes 300 meetri kõrguseid tuulikuid. Sellised tuulikud ei ole veel tootmises ning nende mõju kohta linnustikule ei saa andmeid olla. Kõrgeimate tuulikutega park, kus linnustiku seiret läbi viidud, on teadaolevalt Westermose Rough (UK) tuulikute kõrgusega 177 m. Seal analüüsitakse peamiselt tuulepargi eemaletõrjuvat mõju, võrreldes veelindude asustustihedusi enne pargi ehitamist, ehitamise ajal ja ehitusjärgselt (Percival & Ford, 2016). Põhjalikumad uuringud, mis käsitlevad enamusi käesoleva töö lähteülesandes esitatud küsimusi, on tehtud 115 m (Egmond aan Zee) ja 110 m (Nysted, Horns Rev) kõrguste tuulikutega parkide kohta.

Madalamate tuulikutega parkides läbi viidud uuringute ja üldiste teadmiste põhjal lindude lennukõrguse ja –käitumise kohta saab teha järeldusi, mis kehtivad ka kõrgemate tuulikute korral, sh kõrguseni umbes 300 meetrit.

#### 5.1.1. Lindude lennukõrgus, tuulikute mõõtmed ja kokkupõrkerisk

Enamus merelindudest lendab alumises 20 meetri kõrguses õhukihis ja tuulikute rootorite töösooni kõrgusele ulatuvad lennukõrgused peamiselt ainult kajakatel (Jongbloed, 2016). Röövlinnud ja must-

toonekurg ületavad merealasad valdavalt tuulikute poolt ohustatud kõrgusvahemikus (käesolev töö, Skov, Heinänen, 2015). Värvuliste lennukõrgused jaotuvad laiale kõrgusvahemikule (Hüppop et al., 2006). Lennukõrgus sõltub liigist, ajast (aastaaeg ja öö/päev), lennu põhjusest (ränne või „kohalik lend“), ilmast, geograafilisest asukohast (maismaa kohal, ranna lähedal, avamere kohal) ja ka tuulepargi olemasolust.

Avamerealade kohta kehtiv üldine seaduspärasus on lindude lennu intensiivsuse vähenemine vastavalt kõrguse kasvule. Mida kõrgemale jääb pöörleva tiiviku tötsooni alumine piir merepinnast, seda väiksem on veelindude kokkupõrkerisk.

Kõrgete tuulikute puhul võib suureneda mõju öösel rändavatele värvulistele (kokkupõrkeriski suurenemine) ja rändel olevatele röövlindudele (barjääriefekt).

Tuulikute kõrguse ja rootori tööpindala suurenemisega suureneb ka nende nimivõimsus ja tuulikute omavaheline kaugus ning kokkuvõttes on neid pindalaühiku kohta vähem. Hukkmisriski modelleerimine annab tulemuse, et enamusel liikidest on väiksem hukkmisrisk suure nimivõimsuse ja suure tiiviku tööpindalaga tuulikute puhul, kuna neid asub pindalaühiku kohta vähem. Seetõttu on hukkmistest tuleneva negatiivse mõju vähendamiseks soovitatav kasutada kavandatavates tuuleparkides vähem, aga suuremaid tuulegeneraatoreid.

#### 5.1.2. Barjääriefekt

Barjääriefekt on lindude tuuleparki vältiv käitumisreaktsioon, mille tõttu suureneb lindude lennu teepikkus. Ühelt poolt vähendab tuuleparki vältimine lindude hukkmisriski, samas kaasneb rändeteekonna pikenedamine ja täiendav energiakulu. Barjääriefekt avaldub veelindudest tugevamalt sukelpartide, kauride ja alklaste puhul, aga selle negatiivset mõju rändeteekonna pikendamise läbi on enamasti hinnatud marginaalseks. Kui samal rändeteel asub palju tuuleparke, võib kumulatiivne mõju osutada oluliseks. Röövlindude puhul võib barjääriefekt viia olulise muutuseni rändekäitumises ja osad oma lennuteekonnal tuuleparki kohanud linnud võivad tagasi pöörduda maismaa kohale. See on hiljuti Anholt'i tuulepargi puhul avastatud fenomen, mille seost tuulikute kõrgusega ei ole võimalik esitada.

#### 5.1.3. Tuulepargi konfiguratsiooni (tuulikute paigutuse) mõju.

Tuulikute paigutus mõjutab seda, missugune osa rändel olevatest lindudest läbib tuuleparki ja missugune osa seda väldib, püüdes tuulepargist mööduda.

Veelinnud väldivad tuuleparki vähem, kui tuulikute vahekaugus on suurem. Värvuliste ja röövlindude kohta on andmete vähesuse tõttu raske üldistusi teha. Mida suurem osa lindudest tuuleparki siseneb, seda väiksem on barjääriefekt. Samas suureneb hukkmisrisk. Linnud eelistavad lennata tuulepargi neis piirkondades, kus naabertuulikud jäävad teineteisest kaugemale. Kui tuulikud asetsevad ridadena ning tuulikuridade vahekaugus on suurem kui sama rea naabertuulikute vahe, eelistavad linnud lennata ridadevahelistes koridorides. Turbiinide paigutamine klastritena võib kõige paremini vähendada lindude liikumisbarjääri ja vähendada kokkupõrkeriski. Selleks peaks suurtel tuuleenergia arendusaladel avamerel jätma tuulikuvabu koridore, mis võimaldavad lindudel lihtsamini tuuleparke läbida.

## 5.2. Rakenduslikud järeldused ja ettepanekud Eesti mereala planeeringu tarbeks

5.2.1. **Tuulikute kõrgus.** Eesti mereala planeeringus toodud tuuleenergia tootmiseks sobilikel aladel on võimalik kavandada tuulikuid laba tipu kõrgusega kuni umbes 300 meetrit. Tuulikute kõrguse suurenemisega väheneb tuulikute arv (sama pindala kohta) ja väheneb enamuse linnuliikide kokkupõrkerisk (hukkmisrisk). Seega on eelistatud kasutada kaasaegseid suuri tuulikuid.

5.2.2. **Kokkupõrkerisk tuulikutega.** Enamus linde kasutab rändeks ja peatumiseks sensitiivseid alasid. Täielikult ei saa kokkupõrkeriski välistada siiski ka tuulenergeetika arendamiseks sobilike alade puhul. Kokkupõrkeriski suurust ja võimalikke leevendusmeetmeid saab täpsustada pärast kohapealseid uuringuid hoonestusloa etapis.

Soovitame planeeringus tingimusena sätestada, et tuuliku laba lubatud vähim kõrgus merepinnast on 25 meetrit kõrvaltingimusega, et seda saab täpsustada (vajadusel suurendada 30 või 35 meetrini) hoonestusloa menetluse käigus uuringu alusel. Kõrguse sätestamine on vajalik eelkõige veelindude kokkupõrkeriski vähendamiseks. Sama soovitus (30-35 m) on esitatud ka varasemas analüüsis (Eesti Ornitoloogiaühing, 2016).

5.2.2.1. Innovatsioonialal kasutatavate tuulikute tüüp on praegu teadmata. Need võivad olla alles kujunemisejärgus tehnoloogialahendused nagu ujuvtuulikud, vertikaalteljega rootoriga tuulikud või midagi veel innovatiivsemat. Tavapärase rootoriga ujuvtuulikute puhul kehtivad samad põhimõtted kui praeguste, vundamendiga tuulikute kasutamisel. Veel uuemate tehnoloogiate korral tuleb läbi viia kohapealne uuring ja koostada täiendav analüüs peale seda, kui kasutatav tehnoloogia on selgunud.

5.2.2.2 Liivi lahes tuuleenergia arendamiseks sobiliku ala nr 1 idapoolne osa asub maismaalindude (sh röövlinnud) olulise üle mere kulgeva rändekoridori lähedal. Seal on vajalik hoonestusloa etapis rändekoridori laiuse ja paiknemise täpsustamiseks ning konkreetse tuulepargi mõjude väljaselgitamiseks läbi viia vähemalt kahe aasta rändeperioode hõlmav lindude radaruuring paralleelselt visuaalsete vaatlustega. Tegevusloa menetluses mõjude hindamisel tuleb vajadusel rakendada leevendusmeetmeid.

5.2.2.3. Saaremaast läänes tuuleenergia arendamiseks sobiliku ala nr 2 puhul vajab täpsustamist, missugune osa kõigist rändel olevatest maismaalindudest ei kasuta peamist rändeteed, see tähendab ei suundu mööda Sörve poolsaart Säärele ja sealt üle mere Kuramaale, vaid võtab Saaremaa läänerannikult suuna Gotlandi suunas, mispuhul tuuleenergia arendusala jääb rändeteele. Ka see vajab väljaselgitamist hoonestusloa etapis vähemalt kahe aasta rändeperioode hõlmava lindude radaruuringuga, mis viiakse läbi paralleelselt visuaalsete vaatlustega. Tegevusloa menetluses mõjude hindamisel tuleb vajadusel rakendada leevendusmeetmeid.

5.2.3. **Lennukoridorid tuuleparkide sees ja vahel.** Arvestades, et tuulikutevaheline kaugus on nelja- kuni viiekordne tiiviku läbimõõt, kujuneb Eestis kavandatavates avamere tuuleparkides tuulikute omavaheliseks kauguseks 800-1000 m, suuremate tuulikute puhul ka rohkem. Eelduslikult on sellisel juhul tuuleparki sisenevate lindude osakaal suurem kui enamuses avamerel paiknevates tuuleparkides, kus vastavaid uuringuid tehtud. Osad tundlikumad liigirühmad (kaurid, osa sukelparte) jäävad tuuleparke vältima ka 1 km tuulikutevahelise kauguse puhul. Seniste uuringute põhjal on selgitatud, et kõige paremini võimaldab vähendada lindude liikumisbarjääri ja ka kokkupõrkeriski, kui tuulikud paigutata klastritena ning suurtel tuuleenergia arendusaladel avamerel jätta tuulikuvabu koridore, mis võimaldavad lindudel lihtsamini tuuleparke läbida. Arvestades tuuleenergia arendusalade suurust Eesti mereala planeeringus, tuleb analüüsida, kuivõrd „läbitavad“ on need lindudele, sh arvestades muudel eesmärkidel moodustatavate koridoridega (laevateed, vaatekoridorid). Efektiivselt toimiva koridori laius on vähemalt 5 kilomeetrit, aga tuuleparkide siseselt on näidatud, et linnud kasutavad

rohkem ka alasid, kus üksikud tuulikud (või osa tuulikureast) on jäetud ehitamata, see tähendab, et iga tavapärasest tuulikute vahemaast laiem koridor on eeldusel, et see langeb enam-vähem kokku valdava lennusuunaga, vähemalt veelindude puhul leevendus barjääriefektile.

5.2.3.1. Tuuleenergia innovatsiooniala majandusvööndis on väikese pindalaga ja ala siseseid koridore sinna vaja ei ole.

5.2.3.2. Tuuleenergia arendamiseks sobilik ala nr 1 Liivi lahes paikneb lindude valdava rändesihhi (SW-NE) suhtes soodsalt ega kujuta olulist rändetakistust. Peamine rändesuund läheb Saaremaa ja tuuleenergeetika tootmiseks sobiliku ala vahelt. KSH käigus juba korrigeeriti arendusala idaosa, eemaldades sellest maismaalindude rändetele jääva osa (13% pindalast). Seega SW-NE sihis koridori arendusala sisse vaja ei ole. Hoonestusloa staadiumis tuleb eeluuringuga täpsustada maismaalindude rändevoo tegelik laius arendusala idaosa lähedal Kihnu-Ruhnu sihis (selgitamaks, kas olemasolev vaba ala on piisav) ning selgitada muu vajalik kokkupõrkeriski hindamiseks (liikide lennuintensiivsus ja lennukõrgused). Saaremaa lõunaranniku-Ruhnu suunal on kavandatud veeliikluseks vajalik koridor, mis peab tagama Roomassaare-Ringsu laevaliinile võimalikult otsese ülesõidu. Koridori laius on teadmata. Veeliikluse koridor on piisav, et lihtsustada nende lindude teekonda, kes lendavad Saaremaa lõunaranniku – Ruhnu sihis.

5.2.3.3. Tuuleenergia arendamiseks sobilik ala nr 2 Saaremaast läänes on suure pindalaga ja seda ei saa lausaliselt tuulikutega katta. Alal tuleb läbi viia hoonestusloa etapis vähemalt kahe aasta rändeperioode hõlmav lindude radaruuring paralleelselt visuaalsete vaatlustega selgitamaks välja lindude põhirändesuunad. Tegevusloa menetluses mõjude hindamisel tuleb vajadusel rakendada leevendusmeetmeid (nt vajadusel kavandada tuulikud pargi siseselt nii, et linnud saaksid pargist läbi lennata).

Arvestades mereala planeeringus seatud kooskasutuse põhimõtet tuleks laevadele veeliiklusala kavandamisel (praegu sihis NNW-SSE) kavandada see võimalusel nii, et see kattuks paremini lindude eeldatava valdava rändesuunaga (NNE-SSW). Siis saavad linnud seda ala kasutada rändekoridorina, kuna laevaliiklusele vajaliku läbipääsukoridori laiuseks on ala 2 puhul arvatud ligikaudu 6250 m.

**5.2.4. Kokkuvõte.** Lindude rände kohta Eesti territoriaalmerel ja majandusvööndis on teadmisi vähe. Vaatamata sellele, et arendusaladeks on valitud piirkonnad väljaspool linnustiku jaoks tundlikke alasid (sh rändekoridore), tuleb iga arendusprojekti keskkonnamõjude hindamise eel või ajal läbi viia vähemalt kahe aasta rändeperioode hõlmav lindude radaruuring paralleelselt visuaalsete vaatlustega. See võimaldab modelleerida liigipõhiseid hukkumisiske ning vajadusel soovitada ja rakendada leevendusmeetmeid. Metoodika peaks üldjoontes jälgima Saksamaal standardina kehtestatud uuringuprotokolli (BSH, 2013).

## Kirjandus

- Band, W. (2012). Using a collision risk model to assess bird collision risks for offshore windfarms. SOSS-02 Project Report to The Crown Estate.. SOSS-02 Project Report to T, (March).
- Bradbury, G., Trinder, M., Furness, B., Banks, A. N., Caldow, R. W. G., & Hume, D. (2014). Mapping Seabird Sensitivity to offshore wind farms. *PLoS ONE*, 9(9).  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106366>
- BSH. (2013). *Standard Investigation of the Impacts of Offshore Wind Turbines on the Marine Environment (StUK4)*. Retrieved from [www.bsh.de](http://www.bsh.de)
- Camphuysen, C. J. (2011). *Lesser Black-backed Gulls nesting at Texel - Foraging distribution, diet, survival, recruitment and breeding biology*. Texel. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3574.5364>
- Degraer, S., Brabant, R., Rumes, B., & Vigin, L. (2020). *Environmental Impacts of Offshore Wind Farms in the Belgian Part of the North Sea: Empirical Evidence Inspiring Priority Monitoring, Research and Management*. Brussels.
- Desholm, M. (2009). Avian sensitivity to mortality: Prioritising migratory bird species for assessment at proposed wind farms. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2672–2679.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.02.005>
- Dierschke, V., & Daniels, J.-P. (2003). Zur Flughöhe ziehender See-, Küsten-und Greifvögel im Seegebiet um Helgoland. *Corax*, 19(2), 35–41. Retrieved from [https://www.ornithologie-schleswig-holstein.de/coraxartikel/Dierschke&Daniels\\_2003\\_Corax\\_19\\_Sohe2\\_35-41.pdf](https://www.ornithologie-schleswig-holstein.de/coraxartikel/Dierschke&Daniels_2003_Corax_19_Sohe2_35-41.pdf)
- Drewitt, A. L., & Langston, R. H. W. (2008). Collision effects of wind-power generators and other obstacles on birds. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134, 233–266.  
<https://doi.org/10.1196/annals.1439.015>
- Eesti Ornitoloogiaühing. (2016). *Mereala planeeringu alusuuring : Eesti merealal paiknevate lindude rändekoridoride olemasolevate andmete koondamine ja kaardikihtide koostamine ning analüüsi koostamine tuuleparkide mõjust lindude toitumisaladele*. Tartu.
- Eesti Ornitoloogiaühing. (2019). *Lindude peatumisalade analüüs*. Tartu.
- Erickson, W. P., Wolfe, M. M., Bay, K. J., Johnson, D. H., & Gehring, J. L. (2014). A comprehensive analysis of small-passerine fatalities from collision with turbines at wind energy facilities. *PLoS ONE*, 9(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107491>
- Everaert, J., & Stienen, E. W. M. (2007). Impact of wind turbines on birds in Zeebrugge (Belgium): Significant effect on breeding tern colony due to collisions. *Biodiversity and Conservation*, 16(12), 3345–3359. <https://doi.org/10.1007/s10531-006-9082-1>
- Exo, K.-M., Hüppop, O., & Garthe, S. (2003). Birds and offshore wind farms: a hot topic in marine ecology. *Wader Study Group Bulletin*, 100, 50–53.
- Fijn, R. C., Krijgsveld, K. L., Poot, M. J. M., & Dirksen, S. (2015). Bird movements at rotor heights measured continuously with vertical radar at a Dutch offshore wind farm. *Ibis*, 157(3), 558–566.  
<https://doi.org/10.1111/ibi.12259>
- Fox, A. D., Desholm, M., Kahlert, J., Christensen, T. K., & Petersen, I. K. (2006). Information needs to support environmental impact assessment of the effects of European marine offshore wind farms on birds. *Ibis*, 148(SUPPL. 1), 129–144. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2006.00510.x>
- Fox, A. D., & Petersen, I. K. (2019). Offshore wind farms and their effects on birds. *Dansk Orn. Foren.*



*Tidsskr.*, 113(September), 86–101.

- Hartman, J. C., Krijgsveld, K. L., Poot, M. J. M., Fijn, R. C., Leopold, M. F., & Dirksen, S. (2012). Effects on birds of Offshore Wind farm Egmond aan Zee (OWEZ) An overview and integration of insights obtained. NoordzeeWind report nr. OWEZ\_R\_233\_T1\_20121002 Bureau Waardenburg report nr. 12-005, 144.
- Humphreys, E. M., Cook, A., & Burton, N. H. K. (2015). Collision, displacement and barrier effect concept note. *BTO Research Report*, 669(669).
- Hüppop, O., Dierschke, J., Exo, K. M., Fredrich, E., & Hill, R. (2006). Bird migration and offshore wind turbines. *Offshore Wind Energy: Research on Environmental Impacts*, 91–116. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-34677-7\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-34677-7_9)
- Jacoby, V. (1983). Radar and visual observations of spring mass migration of sea ducks on the western coast of Estonia. *Ornis Fennica, Suppl.* 3, 44–45.
- Jensen, F. P., Ringgaard, R., Blew, J., & Jacobsen, M. (2016). *Anholt Offshore Wind Farm: Post-Construction Monitoring of Bird Migration. DONG Energy REPORT ON RAPTOR MIGRATION SURVEY.*
- Johnston, A., Cook, A. S. C. P., Wright, L. J., Humphreys, E. M., & Burton, N. H. K. (2014). Modelling flight heights of marine birds to more accurately assess collision risk with offshore wind turbines. *Journal of Applied Ecology*, 51(1), 31–41. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12191>
- Jongbloed, R. H. (2016). Flight height of seabirds. A literature study, 26.
- Kahlert, J., Leito, A., Laubek, B., Luigujõe, L., Kuresoo, A., Aaen, K., & Luud, A. (2012). Factors affecting the flight altitude of migrating waterbirds in Western Estonia. *Ornis Fennica*, 89(4), 241–253.
- Krijgsveld, K.L., Fijn, R. C., Japink, M., Horsen, P. W. van, Heunks, C., Collier, M. P., ... Dirksen, S. (2011). *Effect studies offshore wind Egmond aan Zee: Final report on fluxes, flight altitudes and behaviour of flying birds.*
- Krijgsveld, K L. (2014). *Avoidance behaviour of birds around offshore wind farms: Overview of knowledge including effects of configuration. Bureau Waardenburg bv. Consultants for environment and ecology. Report nr 13-268.*
- Krijgsveld, K L, Fijn, R. C., & Lensink, R. (2015). *Occurrence of peaks in songbird migration at rotor heights of offshore wind farms in the southern North Sea.*
- Krijgsveld, K. L., Force, A., Schekkerman, H., Wiersma, P., Montegu, D., Poot, M., & Sea, W. (2005). *Baseline studies North Sea wind farms: fluxes, flight paths and altitudes of flying birds 2003-2004.*
- Krüger, T., & Garthe, S. (2001). Flight altitudes of coastal birds in relation to wind direction and speed. *Atlantic Seabirds*, 3(4), 203–216.
- Leito, A. (2009). *Perspective Development Plan for the Transportation of Passengers and Cargo across the Suur Strait and Strategic Environmental Impact Assessment. BIRD STUDY.*
- Lindeboom, H. J., Kouwenhoven, H. J., Bergman, M. J. N., Bouma, S., Bresseur, S., Daan, R., ... Scheidat, M. (2011). Short-term ecological effects of an offshore wind farm in the Dutch coastal zone; a compilation. *Environmental Research Letters*, 6(3), 035101. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/3/035101>
- Masden, E. A., & Cook, A. S. C. P. (2016). Avian collision risk models for wind energy impact assessments. *Environmental Impact Assessment Review*, 56, 43–49.

<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.09.001>

- Masden, E. A., Haydon, D. T., Fox, A. D., & Furness, R. W. (2010). Barriers to movement: Modelling energetic costs of avoiding marine wind farms amongst breeding seabirds. *Marine Pollution Bulletin*, 60(7), 1085–1091. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.01.016>
- Masden, E. A., Haydon, D. T., Fox, A. D., Furness, R. W., Bullman, R., & Desholm, M. (2009). Barriers to movement: Impacts of wind farms on migrating birds. *ICES Journal of Marine Science*, 66(4), 746–753. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp031>
- Masden, Elizabeth A., Reeve, R., Desholm, M., Fox, A. D., Furness, R. W., & Haydon, D. T. (2012). Assessing the impact of marine wind farms on birds through movement modelling. *Journal of the Royal Society Interface*, 9(74), 2120–2130. <https://doi.org/10.1098/rsif.2012.0121>
- McGregor, R. M., King, S., Donovan, C. R., Caneco, B., & Webb, A. (2018). *A stochastic collision risk model for seabirds in flight*. *Marine Scotland Topic Sheet*. Retrieved from <https://data.marine.gov.scot/dataset/stochastic-collision-risk-model-seabirds-flight>
- Ministry of Economic Affairs. (2015). *Framework for assessing ecological and cumulative effects of offshore wind farms. Part B: Description and assessment of the cumulative effects of implementing the Roadmap for Offshore Wind Power*.
- Percival, S., & Ford, J. (2016). *Westernmost Rough Offshore Wind Farm Post-Construction Phase Year 2: Ornithological Survey Report*, (MAY 2016).
- Petersen, I., Christensen, T., & Kahlert, J. (2006). *Final results of bird studies at the offshore wind farms at Nysted and Horns Rev, Denmark*. *Neri Report*. Retrieved from <http://we-at-sea.org/docs/ecologicalReports/aboveWater/Birdsfinal2005.pdf>
- Pettersson, J. (2005). *The impact of offshore wind farms on bird life in Southern Kalmar Sound, Sweden. A final report based on studies*. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:The+Impact+of+Offshore+Wind+Farms+on+Bird+Life+in+Southern+Kalmar+Sound,+Sweden#0>
- Platteeuw, M., Bakker, J., Bosch, I. van den, Erkman, A., Graafland, M., Lubbe, S., & Warnas, M. (2017). *A Framework for Assessing Ecological and Cumulative Effects (FAECE) of Offshore Wind Farms on Birds, Bats and Marine Mammals in the Southern North Sea*. *Wind Energy and Wildlife Interactions*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51272-3>
- Skov, H., Desholm, M., Heinanen, S., Kahlert, J. A., Laubek, B., Jensen, N. E., ... Jensen, B. P. (2016). Patterns of migrating soaring migrants indicate attraction to marine wind farms. *Biology Letters*, 12(12). <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0804>
- Skov, H., & Heinänen, S. (2015). Predicting the Weather-Dependent Collision Risk for Birds at Wind Farms. In *Wind and Wildlife*. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9490-9>
- Thaxter, C. B., Buchanan, G. M., Carr, J., Butchart, S. H. M., Newbold, T., Green, R. E., ... Pearce-Higgins, J. W. (2017). Bird and bat species' global vulnerability to collision mortality at wind farms revealed through a trait-based assessment. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284(1862). <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.0829>
- Thaxter, C. B., Lascelles, B., Sugar, K., Cook, A. S. C. P., Roos, S., Bolton, M., ... Burton, N. H. K. (2012). Seabird foraging ranges as a preliminary tool for identifying candidate Marine Protected Areas. *Biological Conservation*, 156, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.12.009>
- Volke, V., Kuus, A., & Luigujõe, L. (2020). *Kompleksuuriting Väikese väina tammil paiknevate elektriliinide mõju kohta lindudele*. *Lõpparuanne*. Tartu.

Welcker, J. (2019). Patterns of nocturnal bird migration in the German North and Baltic Seas. Analysis of radar data from offshore wind farms in the German EEZ, (August). Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/342233413>

Lisad

## Lisa 1. Lähteülesanne

(1) kas ja kuidas tuulikud kõrgusega kuni 300 m võivad mõjutada lindude tuulikute üle- ja möödalendu ning rännet? Kas on teaduslikke andmeid, kui kõrgelt linnud merealal lendavad? Kas on ka olemasolevate tuuleparkide seireandmeid, kui kõrgelt linnud neid alasid ületavad? Kui linnud peavad Eesti mereala planeeringus määratud tuuleparkidele sobilikes alades tuulikute kõrgusest tulenevalt oma lennukoridori muutma, siis kas ja kus saavad nad lennata?

(2) kui 300 m kõrguste tuulikute kohta teadmisi ei ole, siis millise kõrguseni on teada ja mida kõrgemate tuulikute puhul võib eeldada, sh kui tuulikud on kõrgemad kui 300m, siis millised mõjud võivad sellega kaasneda?

(3) kas linde mõjutab ka tuulikute omavaheline vahemaa ja koguarv? Kui tuulikud on kõrgemad ja tiiviku diameeter suurem, siis tuulikute omavaheline vahekaugus on ka suurem. Kui tuulikud on madalamad ja tiiviku diameeter väiksem, siis tuulikute omavaheline kaugus on väiksem.

(4) kas linde mõjutab tiiviku otsa kõrgus merepinnast (tiiviku ja merepinna vahekaugus)? Meretuulikutel arendamisel tiiviku läbimõõt suureneb kiiremini kui tipukõrgus. Nimelt meretuulikutel üritatakse tuuliku kõrgust hoida nii väiksena kui vähegi võimalik ja pigem püütakse tiiviku läbimõõtu suurendada (seejuures tuulikud siiski suurenevad (ja ka tiivikud)).

(4) kas mereala planeeringu tingimusi linnustiku osas oleks vaja täiendada tulenevalt maksimaalse tuulikute kõrguse sätestamisega planeeringus (nt. lisada mõne täiendava uuringu läbiviimise kohustus vms)?

Töö koostatakse ja hinnang antakse lähtudes Eesti mereala planeeringus toodud tuuleparkidele sobilikest aladest ja arvestades vähemalt kahe järgneva EOÜ poolt varem koostatud töö tulemusi. Oleme varasemalt tellinud EOÜ-lt töö selgitamiseks välja, milline on võimalik tuuleparkide mõju lindude toitumisaladele (vt kirja lõpus linki nr 1) ja töö selgitamiseks välja lindudele olulised alad merealal (link nr 2).

Link nr 1 -

[https://www.rahandusministeerium.ee/et/system/files\\_force/document\\_files/eesti\\_mereala\\_lindude\\_randekoridoride\\_ja\\_meretuuleparkide\\_analys\\_parandustega.pdf](https://www.rahandusministeerium.ee/et/system/files_force/document_files/eesti_mereala_lindude_randekoridoride_ja_meretuuleparkide_analys_parandustega.pdf)

Link nr 2 -

[http://mereala.hendrikson.ee/dokumendid/Uuringud/Lindude\\_peatumisalad.pdf](http://mereala.hendrikson.ee/dokumendid/Uuringud/Lindude_peatumisalad.pdf)

Mereala planeeringu koostamisel ja selle mõjude hindamisel lähtutakse järgmistest tuulikute (maksimaalsetest) parameetritest:

- \*tuuliku tipukõrgus: \*kuni 300m merepinnast

- \*tiiviku läbimõõdust tulenev tuulikute vahekaugus merel:\* minimaalselt 4 tiiviku läbimõõtu (lähemal ei pea tuulikud vastu, kuna tekivad nii suured turbulentsid), 5 tiiviku läbimõõtu on realselt kasutatav arendajate poolt; 7 tiiviku läbimõõdu korral on tuulevarjutus minimaalne, aga siis kaotad juba pisut ala pindalas

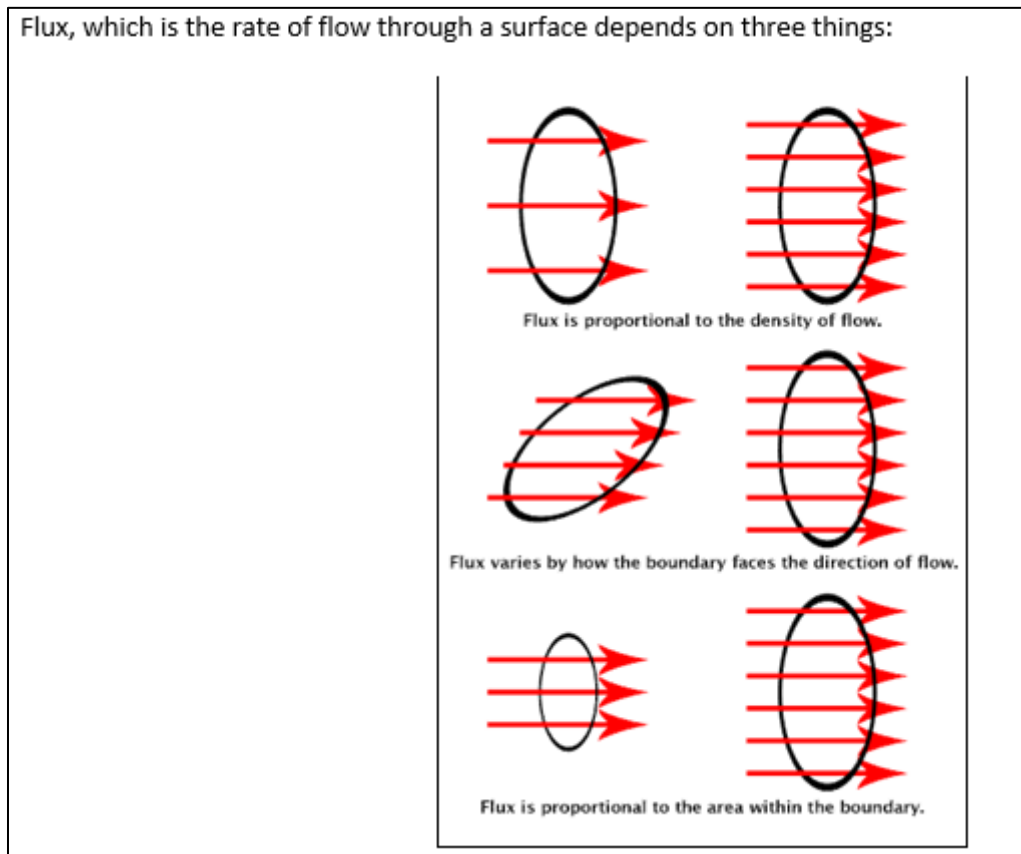
- \*tiiviku läbimõõt\*: alates 50, kuid kõige realsem 200-250m

Töö teostatakse agiilse projektijuhtimisega, sh toimub vähemalt 4 (veebi)kohtumist (avakoosolek, 2x progressikoosolek, valminud tööd tutvustav koosolek) ning osaletakse ühel korral mereala planeeringu avalikul arutelul.

## Lisa 2. Kokkupõrkeriski modelleerimine (Band, 2012)

Esimene etapp kokkupõrkeriski modelleerimisel on tiivikute tööpiirkonda läbida võivate lindude hulga hindamine. Matemaatiliseks vasteks on siin vektorvälja voog läbi pinna. Vektorvälja voog läbi pinna sõltub 3 põhilisest tegurist (joonis L2-1):

1. vektorvälja voo (antud juhul lindude lennu) intensiivsusest;
2. pinna orientatsioonist vektorvälja voo (lindude lennusuuna) suhtes;
3. pinna suurusest.



Joonis L2-1. Vektorvälja voogu läbi pinna (inglise keeles „flux“) mõjutavad tegurid (Wikipedia).

Lindude lennu intensiivsus sõltub lindude tihedusest (isendite arvust ruumalaühiku kohta) ning nende lennukiirusest. Kokkupõrkeriski seisukohast on oluline ainult see osa lindudest, kes lendavad tiiviku töötsooni kõrgusel. Mudeli keerukamad variandid püüavad arvestada ka lendavate lindude kõrgusjaotust (lindude arvu vähenemist kõrguse suurenemisel) töötsooni piires. Linnuliikide lennu intensiivsus võib olla erinev päeval ja öösel, vaatlused lennu intensiivsuse kohta on tehtud enamasti valgel ajal. Öise lennu intensiivsuse leidmiseks kasutatakse üldistatud öise lennuaktiivsuse tasemeid (% päevasest intensiivsusest). Läbi tiivikute töötsoonide lendavate lindude arv sõltub ka tuulikute vältimisest lindude poolt – teatud osa lindudest muudab enne tuulikuid lennusuunda ja ei läbigi tiivikute töötsoone.

Üksiku rootori töötsooni pindala võrdub pii korda raadiuse ruut. Kokkupõrkeriski seisukohast on oluline kõigi tuulepargi rootorite töötsoonide kogupindala, mis saadakse ühe rootori töötsooni pindala korrutamisel tuulikute arvuga. Algselt mudelis eeldatakse, et riskid on aditiivsed (näiteks 100 tuulikuga

tuulepargis on risk 100 korda suurem kui ühe tuuliku korral). Selline lähenemine ei pruugi olla täiesti korrektne suurte tuuleparkide korral – osa lindudest võib hukkuda juba esimeste tuulikutega kokku põrgates ning tagumiste tuulikute jaoks lindude lennu intensiivsus väheneb.

Tegelikkuses ei ole kokkupõrkerisk kogu rootori töötsooni ulatuses ühesugune, vaid on väiksem töötsooni serva lähedal ja suurem telje lähedal. Kui lõigata sama raadiusega ringi sama laiusega horisontaalse ribaga ühel juhul nii, et riba lõikab ringi serva lähedal ja teisel juhul nii, et riba lõikab ringi tsentri kohalt, on esimesel juhul saadava kujundi pindala väiksem. Lindude lennu intensiivsus väheneb enamasti kõrguse kasvul. Madalal lendavad linnud lendavad rootori töötsooni alumise osa kõrgusel, kus rootori töötsooni sattumise tõenäosus on väiksem, kui see oleks lendamisel rootori telje kõrgusel.

Vektorvälja voog läbi pinna on maksimaalne, kui pind on vooga risti. Lindude kokkupõrkeriski arvutamisel jäetakse pinna orientatsioon mõju siiski mudeli lihtsustamise huvides arvestamata (vaikimisi loetakse, et lennusuund on rootorite töötsooniga risti), sest järgmises etapis (hukkunud lindude osakaal rootorite töötsooni läbinud lindudest) on pinna orientatsiooni mõju vastupidine – pinna ja lindude lennusuuna vahelise nurga erine misel täisnurgast pikeneb lindude poolt rootori töötsooni piires läbitav teepikkus, mis suurendab omakorda rootori labaga kokkupõrke riski.

Bandi mudeli valem läbi rootorite töötsoonide lendavate lindude arvu leidmiseks ajaühikus (kuus) on järgmine (tuulikute vältimisega lindude poolt arvestatakse ühes mudeli järgmistest etappidest):

$$\text{Total number of bird transits} = \underbrace{v (D_A / 2R) (T \pi R^2) (t_{\text{day}} + f_{\text{night}} t_{\text{night}})}_{\text{flux factor}} \times \underbrace{Q_{2R}}_{\text{proportion at risk height}}$$

kus

$v$  = linnu lennukiirus, m/sec;

$D_A$  = lindude tihedus, is/km<sup>2</sup>;

$R$  = rootori raadius, m;

$T$  = tuulikute arv;

$t_{\text{day}}$ ,  $t_{\text{night}}$  = päeva- ja öötundide arv kuus;

$f_{\text{night}}$  = öise lennuaktiivsuse tase;

$Q_{2R}$  = rootoritr töötsooni kõrgusel lendavate lindude osakaal.

Teine etapp kokkupõrkeriski leidmisel on hinnata, kui suur osa rootorite töötsoone läbivatest lindudest tegelikult labadega kokku põrkab. Kokkupõrgete osakaal sõltub linnu mõõtmetest (pikkus ja tiibade siruulatus) ning lennukiirusest, rootori labade laiusest ja seadenurgast ning rootori pöörlemiskiirusest. Mida suurem on rootori pöörlemiskiirus ja väikesem linnu lennukiirus, seda suurem on põhimõtteliselt kokkupõrke tõenäosus. Laba laius ja seadenurk on seotud nii kokkupõrkeriskiga labade esiküljega (seda mõjutab laba laiuse projektsioon rootori töötsooni esiküljele, mis võrdub laba laiuse ja seadenurga koosinuse korrutisega) kui ka rootori töötsooni läbimiseks kuluva ajaga (seda mõjutab rootori

töötsooni „paksus“, mis võrdub laba laiuse ja seadenurga koosinuse korrutisega). Lihtsustatult võib öelda, et mida suuremad on linnu kehamõõtmed, seda suurem on kokkupõrkerisk. Täpsemalt on sealjuures oluline nii linnu kehapikkuse ja tiibade siruulatuse suhe kui ka kehamõõtmete suhe linnu lennukiiruse ning tiiviku pöörlemiskiiruse suhtega. Mõju avaldab ka see, kas liik kasutab valdavalt sõude- või liuglendu. Sõudlennu (tiibade lehvitamise) korral hõlmab lind suurema ruumiosa kui liuglemisel liikumatute tiibadega. Liuglemise korral avaldab mõju isegi tiiviku laba asend vertikaaltasandis: horisontaalaselt paiknev laba on paralleelne liugleva linnuga ning kokkupõrkerisk on väiksem.

Roorite pöörlemiskiirus ja labade seadenurk sõltuvad omakorda tuule kiirusest. Väga nõrga ja väga tugeva tuule korral rootorid seisavad. Lisaks pannakse rootorid aeg-ajalt seisma hooldutöödeks. Tuulikute tööaeg omakorda mõjutab kokkupõrkeriski (mudelites eeldatakse, et kokkupõrkeid seisvate labadega ei toimu).

Linnud võivad lennata läbi rootori töötsooni mõlemalt poolt. Ühes suunas lendavad linnud põhimõtteliselt alla tuult, vastassuunas aga vastu tuult. Vaikimisi loetakse, et mõlemas suunas lendab läbi rootori tööpiirkonna võrdne arv linde, kuid eriolukordades (näiteks ränne ühes suunas) jaoks on olemas võimalus muuta vastu- ja pärituule suunas lendavate lindude omavahelist jaotust. Tulenevalt labade geomeetriast lennusuuna suhtes on vastutuult lennates kokkupõrkeohu suurem kui allatuult lennates isegi juhul, kui linnu lennukiirus maapinna suhtes oleks mõlemal juhul sama. Tegelikult lendavad linnud vastutuult aeglasemalt, mis suurendab veelgi kokkupõrkeriski erinevust lennul vastu- ja allatuult.

Bandi mudelis leitakse kõigepealt läbi rootori töötsooni lendava linnu kokkupõrke tõenäosus punktide jaoks, mille asukoht tiiviku töötsooni tasandil on määratud polaarkoordinaatidega. Mudeli lihtsama variandi korral (ei arvestata lindude kõrgusjaotuse erinevusi) on valem järgmine:

$$p(r, \varphi) = ( b\Omega/2\pi v ) [ | \pm c \sin\gamma + \alpha c \cos\gamma | + \max( L, W\alpha F ) ]$$

kus

$p$  = kokkupõrke tõenäosus linnu jaoks, kes läbib rootori töötsooni polaarkoordinaatidega  $r$  ja  $\varphi$  määratud punktis töötsooni pinnal;

$r$  = punkti raadius rootori töötasandil;

$\varphi$  = nurk punkti suuna ja vertikaalsuuna vahel ( $=0$ , kui punkt asub tiiviku teljest otse üleval);

$b$  = rootori labade arv;

$\Omega$  = rootori nurkkiirus;

$c$  = laba laius;

$\gamma$  = laba seadenurk;

$R$  = rootori koguraadius;

$L$  = linnu pikkus;

$W$  = tiibade siruulatuse;

$v$  = linnu lennukiirus;

$\alpha = v / r \Omega$ ;



$F = 1$  sõudelennu ja  $F = \cos \varphi$  liuglennu korral.

Seejärel leitakse nende tõenäosuste keskmine, integreerides üle kogu rootori tööpinna:

$$P_{\text{average}} = \frac{\int_0^R p(r) (2\pi r) dr}{\int_0^R (2\pi r) dr} = \frac{\int_0^R p(r) (2\pi r) dr}{\pi R^2} = 2 \int_0^1 p(r) (r/R) d(r/R)$$

Mudeli järgmistest etappides arvestatakse veel tuuliku tööaja pikkusega ning tehakse vajadusel korrektuur suurte tuuleparkide jaoks.