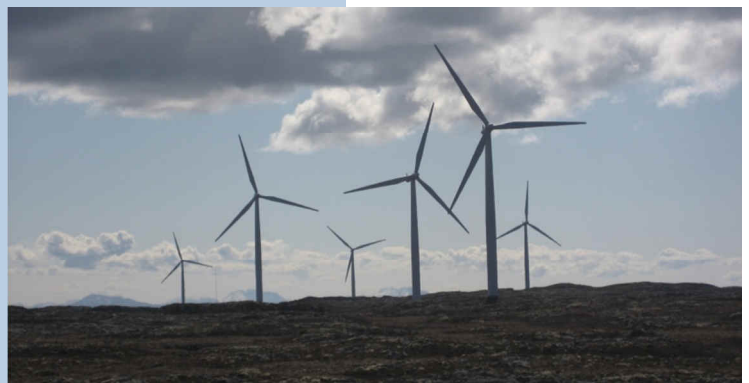


Konfliktpotenzialkarte Windenergie – Vögel Schweiz: Teilbereich Vogelzug

Erläuterungsbericht, Aktualisierung 2013

Felix Liechi
Jérôme Guélat
Silke Bauer
María Mateos
Susanna Komenda-
Zehnder



Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU



vogelwarte.ch

Impressum

Konfliktpotenzialkarte Windenergie – Vögel Schweiz: Teilbereich Vogelzug. Erläuterungsbericht. Aktualisierung 2013

Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU

Autoren

Felix Liechti, Jérôme Guélat, Silke Bauer, Maria Mateos & Susanna Komenda-Zehnder

Fotos Titelseite

Hahnenmoospass (oben): Bruno Bruderer; Windpark Smøla, Norwegen (unten): Valère Martin

Zitiervorschlag

Liechti, F., J. Guélat, S. Bauer, M. Mateos & S. Komenda-Zehnder (2012): Konfliktpotenzialkarte Windenergie – Vögel Schweiz: Teilbereich Vogelzug. Erläuterungsbericht. Aktualisierung 2013. Schweizerische Vogelwarte, Sempach.

Kontakt

Felix Liechti, Schweizerische Vogelwarte, CH-6204 Sempach

Tel.: 041 462 97 00, 041 462 97 84 (direkt), Fax: 041 462 97 10, felix.liechti@vogelwarte.ch

© 2017, Schweizerische Vogelwarte Sempach

Dieser Bericht darf ohne Rücksprache mit der Schweizerischen Vogelwarte Sempach weder als Ganzes noch auszugsweise publiziert werden. Die Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein die Auftragnehmerin verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Résumé	4
1. Einleitung	5
1.1 Beobachtete Zugvogelkonzentrationen	5
1.1.1 Herbstzug	5
1.1.2 Frühjahrszug	5
1.2 Ziele	6
2. Vorgehen	6
2.1 Grundlagen	6
2.2 Flugrichtungen	7
2.3 Topografie	7
2.4 Flughöhe	8
2.5 Integration von Flugrichtung und Topografie	9
2.6 Computersimulation und Parametrisierung	10
3. Modellierung	11
3.1 Modellparameter	11
3.1.1 Iterationen	11
3.1.2 Anzahl Vögel pro Startquadrat	11
3.1.3 Starthöhe der Vögel	11
3.1.4 Sinkrate der Vögel	12
3.1.5 Flugverhalten gegenüber der Topografie	13
3.1.6 Auswirkungen des Windes auf das Flugverhalten	15
3.2 Vergleichsdaten	16
3.2.1 Mond	16
3.2.2 Expertenbeurteilung	17
3.2.3 Radarmessungen	18
3.3 Anwendung der Modellparameter auf den Frühlingszug	20
4. Resultate	21
4.1 Sensitivitätsanalyse	21
4.2 Validierung Modellierung Herbst	22
4.3 Modellierung Frühling	25
4.4 Konfliktpotenzialkarte Vogelzug	27
5. Aussagekraft der Karte	30
5.1 Risikokategorien	30
5.2 Interpretation der Ergebnisse	30
6. Massnahmen	31
6.1 Überwachung des Vogelzuges	32

6.2 Kollisionsrate und Schwellenwertberechnung	33
7. Blick in die Zukunft	37
8. Literatur	38
Anhang A	39
Anhang B	42

Zusammenfassung

Im Rahmen der Nutzung erneuerbarer Energieformen werden in der Schweiz zunehmend Windenergieanlagen geplant und gebaut. Für Zugvögel können Windenergieanlagen tödliche Hindernisse darstellen. Deshalb ist es wichtig, über ein Gesamtbild der möglichen Risiken zu verfügen. Dieser Bericht zeigt anhand der aktuellen Erkenntnisse, wo in der Schweiz mit welchen Vogelzugdichten zu rechnen ist. Ziehende Vögel treten in der Schweiz flächendeckend auf, wobei deren Konzentration stark von der Jahreszeit, der Topografie und von den Windverhältnissen abhängt. Basierend auf dem Wissen über das Flugverhalten von Vögeln, die durch aktiven Flügelschlag ziehen (mehrheitlich Singvögel, die über 90 % des Zugvolumens darstellen), entwickelten wir ein Computermodell. Damit wurden Zugdichten über der ganzen Schweiz berechnet. Durch den Vergleich mit den Resultaten aus der langjährigen Zugforschung wurde das Modell einerseits an die beobachteten Daten angeglichen, andererseits wurden Feldbeobachtungen mit Radar genutzt, um den relativen Resultaten aus dem Modell effektive Zugdichten zuzuordnen. Daraus resultierte eine Karte, welche die geschätzten mittleren Zugdichten im Herbst und Frühling darstellt.

Diese graduellen Zugdichten wurden schlussendlich als Kollisionsrisiken interpretiert und in drei Kategorien eingeteilt. Auf eine Ausscheidung von Ausschlussgebieten wurde verzichtet. Stattdessen empfehlen wir für potenzielle Konfliktgebiete ein Überwachungssystem, welches ermöglicht, die Anlagen kurzfristig während den Zeiten hoher Zugintensität abzuschalten. Effektive Schlagopferzählungen sind nötig, um die hier vorliegenden Berechnungen zu überprüfen.

Das vorliegende Dokument enthält sowohl redaktionelle Änderungen wie auch die 2013 aktualisierte Version der Konfliktpotenzialkarte.

Résumé

Dans le cadre de l'utilisation des énergies renouvelables, un nombre croissant de parcs éoliens sont prévus et réalisés en Suisse. Pour les oiseaux migrateurs, les éoliennes peuvent constituer des obstacles mortels. Il est donc important de disposer d'une vue d'ensemble des risques éventuels qu'ils encourent. Le présent rapport se base sur les derniers acquis pour montrer quelles densités d'oiseaux migrateurs sont à prévoir en Suisse, et où. Les oiseaux migrateurs sont partout présents en Suisse, leur concentration variant fortement en fonction de la saison, de la topographie et du vent. En nous fondant sur les connaissances relatives au comportement des oiseaux en vol, qui migrent en battant activement des ailes (majoritairement des oiseaux chanteurs, qui représentent plus de 90% du volume de migration), nous avons mis au point un modèle informatique qui nous a permis de calculer les densités migratoires dans l'ensemble de la Suisse. D'une part, une comparaison avec les résultats de la recherche menée depuis de nombreuses années en la matière a permis d'ajuster les données observées ; d'autre part, des observations au radar sur le terrain ont servi à affecter des densités migratoires effectives aux résultats relatifs issus du modèle. Il en a résulté une carte, qui présente les densités migratoires moyennes estimées en automne et au printemps.

Enfin, ces densités graduelles ont été interprétées en tant que risques de collision et réparties en trois catégories. Nous avons renoncé à définir des zones d'exclusion, mais recommandons plutôt, pour les zones à conflit potentiel, un système de surveillance permettant de mettre hors service les installations en période de forte intensité migratoire. Il importera de procéder à un comptage effectif des victimes, pour vérifier les estimations disponibles.

Le document présent contient des modifications rédactionnelles et la carte de conflits mise à jour en 2013.

1. Einleitung

Windenergieanlagen sind eine der heute bedeutenden Formen erneuerbarer Energiegewinnung und sollen in der Schweiz wie in Europa erheblich ausgebaut werden. Es ist bekannt, dass Windenergieanlagen für ziehende Vögel ein Hindernis darstellen können, wobei bis heute nicht klar ist, welche Relevanz diese auf die Entwicklung der Vogelwelt haben. Für einzelne grosse Vögel sind Beeinträchtigungen bekannt, für die grosse Masse der mittleren und kleinen Zugvögel liegen keine gesicherten Erkenntnisse vor. Während von einer einzelnen Anlage kaum gravierende Auswirkungen zu erwarten sind, ist heute noch völlig unklar, wie sich die Kumulation von hunderten (Schweiz), bzw. zehntausenden (Europa) von Anlagen entlang der Flugrouten auf die Entwicklung der Zugvogelpopulationen auswirken wird.

1.1 Beobachtete Zugvogelkonzentrationen

Vogelzug ist ein Phänomen, das sich fast ganzjährig beobachten lässt. Die Zugbewegungen konzentrieren sich aber auf den Frühling und den Herbst. Innerhalb dieser Hauptzugerperioden erfolgt eine weitere Konzentration des Zuges auf einige günstige Tage und Nächte, deren Auftreten stark vom aktuellen Wetterablauf abhängen. Der räumliche Verlauf und die Flughöhen werden durch die regionale und lokale Topografie und den Wind massgeblich beeinflusst (Bruderer 1996, Liechti et al. 1996a, 1996b, Zehnder et al. 2001).

1.1.1 Herbstzug

In der Schweiz gibt es verschiedene traditionelle Standorte für die Beobachtung des Herbstzuges. Diese Standorte (z.B. Gurnigel BE, Hahnenmoospass BE, Col de Jaman VD, Col de Bretolet VS, Ulmethöchi BL) sind bekannt durch ihre z.T. spektakulären Zahlen an vorbeiziehenden Zugvögeln. An verschiedenen dieser Orte werden daher auch seit Jahren systematisch Vögel gefangen und beringt. Diese Standorte zeichnen sich dadurch aus, dass der Zug durch ein von NE nach SW verlaufendes trichterförmiges Tal lokal konzentriert wird und die Vögel meist noch durch einen steilen Anstieg gezwungen werden aufzusteigen. So entsteht v.a. im bodennahen Bereich eine Verdichtung des Zuges, der sich gut beobachten lässt. Radarmessungen und Mondbeobachtungen haben allerdings gezeigt, dass ein erheblicher Teil des Zuges nachts abläuft und sowohl nachts als auch am Tag in breiter Front und oft in grosser Höhe erfolgt (z.B. Bruderer & Liechti 1990, 1998, 2004, Liechti et al. 1996a). Alle Beobachtungsergebnisse (inkl. traditionelle Standorte für Tagzugbeobachtungen) zeigen sehr deutlich, in welchem erheblichen Masse der Zugablauf durch das Wetter gesteuert wird. So wissen erfahrene Beobachter ganz genau, unter welchen Wetterbedingungen es sich lohnt einen Beobachtungspunkt aufzusuchen. Bekannte Rastplätze von Zugvögeln liegen meist an Seen, wo auch regelmässig Zugvögel für die Beringung gefangen werden (z.B. Bolle di Magadino TI). Nach grober Schätzung dürfte das Volumen des Herbstzuges je nach Jahr in der Schweiz zwischen 50 und 100 Millionen Vögeln liegen. Beobachtungen von Einzelereignissen zeigen, dass innerhalb einer einzigen Nacht 2–3 Millionen Vögel in breiter Front durch das Mittelland ziehen können (Liechti et al. 1996).

1.1.2 Frühjahrszug

Über den Frühjahrszug ist wesentlich weniger bekannt, da er weniger spektakulär und meist schneller abläuft als jener im Herbst. Traditionelle Konzentrationspunkte für Tagzugbeobachtungen sind uns nicht bekannt. Einzig in der Bolle di Magadino (TI) werden Vögel beringt, da dies auch im Frühling ein wichtiger Rastplatz für Zugvögel ist. Auch im Frühling ist der Ablauf des Vogelzugs stark durch das vorherrschende Wetter beeinflusst (Liechti et al. 1996b). Am Ende längere Kälteeinbrüche kann es wie im Herbst zu hohen Zugkonzentrationen an einzelnen Tagen und in einzelnen Nächten kommen. Insgesamt schätzen wir, dass das Zugvolumen im Frühling knapp die Hälfte des Herbstzuges ausmacht, d.h. je nach Jahr dürften im Frühling zwischen 20–70 Millionen Zugvögel die Schweiz durchqueren. Es

gilt allerdings zu berücksichtigen, dass allfällige Verluste von Vögeln auf dem Frühjahrszug gravierendere Auswirkungen auf die Vogelpopulationen haben als im Herbst. Diese Zugvögel auf dem Weg ins Brutgebiet bilden die potenzielle Brutpopulation, und Verluste haben daher direkten Einfluss auf die Reproduktionsleistung der Population. Es handelt sich dabei um sogenannte additive Mortalität. Im Gegensatz dazu betreffen allfällige Verluste im Herbst Vögel, die womöglich auch im Verlaufe des Winters sterben würden. Man spricht daher von teilweiser kompensatorischer Mortalität.

1.2 Ziele

Eine erhebliche Entschärfung des potenziellen Konfliktes zwischen Windenergieanlagen und Zugvögeln kann erreicht werden, wenn es gelingt die Nutzung der Windenergieanlagen und die Zugaktivität der Vögel zu entflechten. Da Vogelzug praktisch flächendeckend auftritt, lässt sich eine räumliche Trennung zwischen Vogelzug und Windkraftnutzung nur sehr beschränkt realisieren. Eine bessere Entflechtung kann auf der Zeitachse erreicht werden, wenn Ort und Zeit von hohen Zugvogelkonzentrationen bekannt sind. Da stillstehende Rotoren für ziehende Vögel eine deutlich verminderte Kollisionsgefahr darstellen, kann mit einer zeitlich begrenzten Abschaltung einzelner Windenergieanlagen eine erhebliche Reduktion des Gefährdungspotenzials erreicht werden.

Die vorliegende Studie hat zum Ziel festzulegen, wo in der Schweiz tiefe, mittlere und hohe Zugintensitäten zu erwarten sind. Da keine flächendeckenden Beobachtungen vorliegen, wurde entschieden, ein GIS-Modell zu erstellen, welches den Zugablauf simuliert. Das auf Beobachtung und Expertenwissen basierende Modell kann die Verhältnisse weder zeitlich noch räumlich detailliert abbilden, sondern gibt einen generellen Überblick über die im Jahresdurchschnitt zu erwartenden Zugintensitäten in der Schweiz. Da Windenergieanlagen nur den untersten Luftraum beeinträchtigen (< 200 m), muss das Modell auch die Flughöhe der Zugvögel mitberücksichtigen.

2. Vorgehen

2.1 Grundlagen

Der Vogelzug verläuft grundsätzlich in breiter Front. Die *Topografie* im Allgemeinen und die *Orografie* im Speziellen bewirken, dass der Zug abgelenkt und allenfalls in Tälern und auf Passübergängen kanalisiert wird. In welchem Masse dies geschieht, hängt einerseits vom *Flugverhalten* des einzelnen Vogels und andererseits von den aktuellen *Wetterbedingungen* ab. Basierend auf diesen drei Komponenten berechnet das vorliegende Modell die räumliche Verteilung der Zugintensität über der Schweiz. Als Basis für das Flugverhalten wurde ein Zugvogel gewählt, der sich durch aktiven Flügelschläge fortbewegt und nicht auf thermische oder andere Aufwinde angewiesen ist. Diese sogenannten Schlagflieger machen die grosse Masse des Vogelzuges aus (> 95 %).

Bei der Erarbeitung des Modells wurden verschiedene Faktoren parametrisiert (siehe unten), und die Resultate der verschiedenen Simulationen wurden immer wieder mit den Erkenntnissen aus jahrzehntelanger Vogelzugforschung der Schweizerischen Vogelwarte verglichen (siehe Validierung Kap. 3). Auf diese Weise wurde das Computermodell weiter entwickelt und die eingesetzten Parameter so angepasst, dass sich die Resultate den effektiven Feldbeobachtungen immer besser annäherten.

Zur Modellierung des Vogelzuges verwendeten wir ein Gitterbasiertes Modell, welches geeignet ist, räumlich diskrete, dynamische Systeme zu beschreiben. Dies bedeutet, dass der Zustand in einer Zelle zum Zeitpunkt $t+1$ von den Zellzuständen in einer vorgegebenen Nachbarschaft und vom eigenen Zustand zum Zeitpunkt t abhängt. In unserem Modell entspricht eine Zelle einem Kilometer-Quadrat. Dies widerspiegelt sich auch in den grafischen Darstellungen, in welchen eine Zelle einem Pixel entspricht.

Als Bedingung für alle Simulationsdurchgänge wurde die Annahme getroffen, dass die Zugvögel von einer Linie aus homogen verteilt starten. Unter Einbezug einer Starthöhe und des Flugverhaltens gegenüber Wind und Topografie wurde daraufhin berechnet, wie sich die Vögel aus einem Quadrat in die benachbarten Quadrate verteilen. Dieser Rechenschritt wurde für alle Quadrate so lange wiederholt, bis ein stabiles Ergebnis erzielt wurde. Die Anzahl Iterationen wurde so festgelegt, dass sich Dichtewerte über der ganzen Schweiz ergaben. Die daraus resultierende Zugintensität pro Quadrat wurde farblich codiert dargestellt. Diese Farbskala widerspiegelt die relative Zugintensität, die nur über Erfahrungswerte und einzelne Messungen quantifiziert werden kann (siehe Validierung Kap. 3).

2.2 Flugrichtungen

Der Herbstzug durch Westeuropa verläuft nicht direkt von Norden nach Süden, sondern von Nordost nach Südwest. Die mittlere Flugrichtung und die Streuung werden von der vorherrschenden Windrichtung und -stärke beeinflusst. Für die Modellierung der Richtungsverteilungen benutzten wir die Resultate von Radarbeobachtungen von einem Standort mit geringem topografischem Einfluss in Süddeutschland (Bruderer & Liechti 1990). Bruderer & Liechti (1990) unterschieden aus Sicht der Zugvögel (Basisrichtung 225°) vier Kategorien von Windrichtungen: Gegenwind, Rückenwind, Seitenwind von NW und Seitenwind von SO. Die Windstärke wurde in drei Kategorien unterteilt: < 5 m/s, 5 bis 10 m/s und > 10 m/s. Dies ergibt zwölf mögliche Richtungsverteilungen (Anhang A). Entsprechend diesen Richtungsverteilungen wurde berechnet, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Zugvogel unter einer vorgegebenen Windsituation in eine der benachbarten Zellen wechselt, d.h. wie sich die Vögel aus der ursprünglichen Zelle in alle benachbarten Zellen verteilen.

2.3 Topografie

Der Einfluss der Topografie auf den Vogelzug erschliesst sich für die Schweiz in erster Linie über die Orografie (Höhenstruktur). Um diesen Einfluss für das Modell zu quantifizieren, wird bei der Verteilung der Vögel in die benachbarten Zellen jeweils die Höhendifferenz zwischen der aktuellen Zelle und den benachbarten Zellen berücksichtigt.

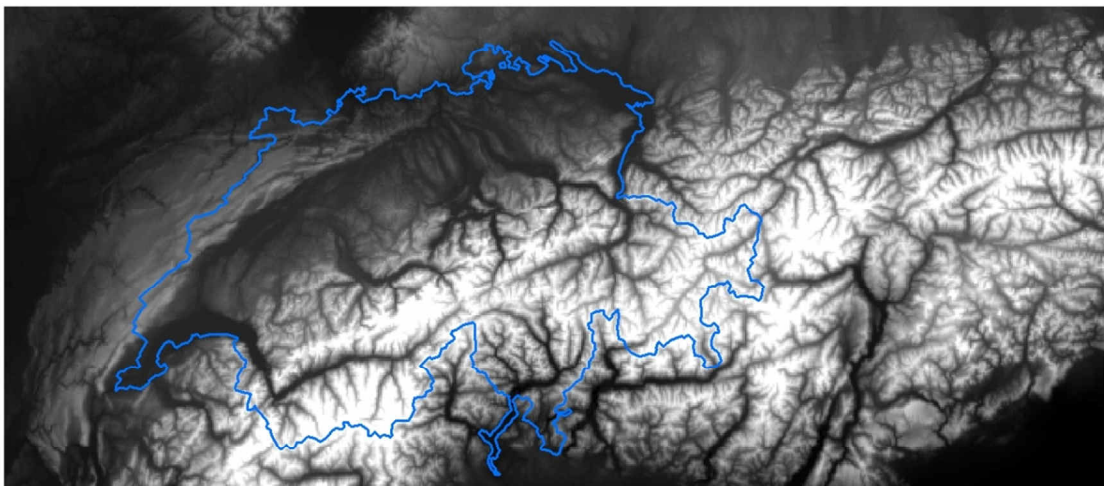


Abb. 1. Topografische Karte, welche als Grundmatrix in der Simulation verwendet wurde (USGS 1996)

Unsere Grundmatrix entspricht dem Höhenmodell der Schweiz (und Umgebung) in einer Auflösung von 1 km^2 (Abb. 1). Für den Einbezug der Höhendifferenzen von einem Quadrat zum nächsten wird ein geglätteter Höhenlayer mit so genannten „moving windows“ berechnet (Abb. 2). Von einer definierten Zelle aus gehend (focal pixel) wird berechnet, welche topografische Höhe die Vögel zu erwarten haben, wenn sie in die nächste Zelle fliegen (Fokalwert). Da im Modell acht diskrete Flugrichtungen möglich sind (N, NO, O, SO, S, SW, W, NW), ergeben sich jeweils acht Höhenlayers.

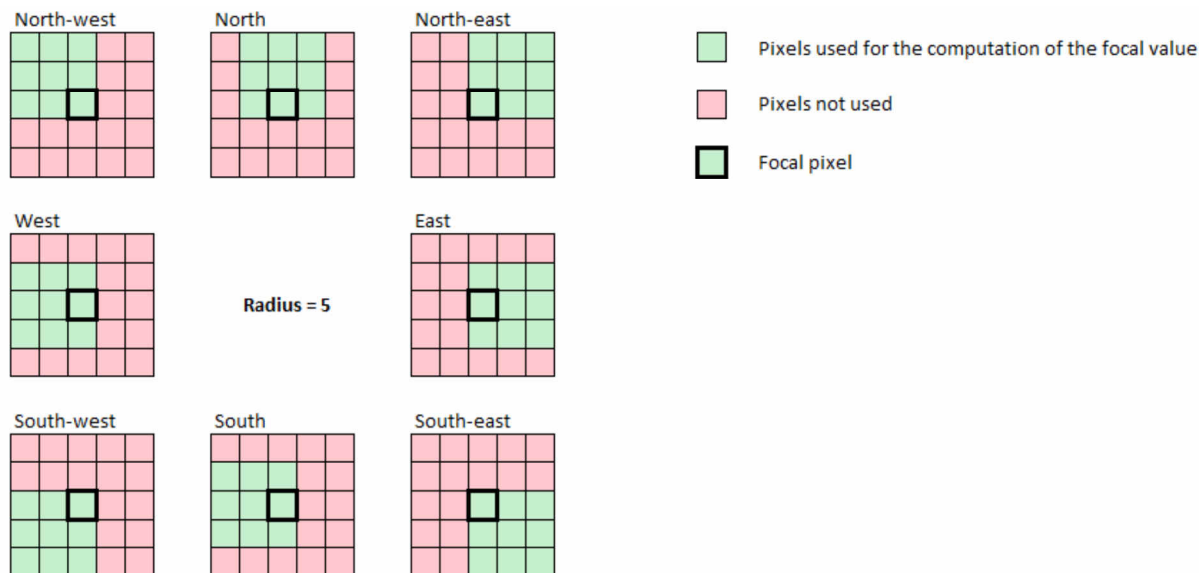


Abb. 2. Methode des „moving window“ zur Berechnung der Höhendifferenz gegenüber der aktuellen Flughöhe in Abhängigkeit der Flugrichtung. Illustriert ist als Beispiel ein „moving window“ mit einer Ausdehnung von 5 km.

Um den Fokalwert aus den einbezogenen Quadraten zu berechnen, kann der Mittelwert, das Minimum, Maximum und 3. Quartil o.a.m. verwendet werden. Zudem kann die Grösse des „moving window“ (Radius) auf $5 + 4x$ vergrössert werden, wobei x eine Ganzzahl sein muss.

Die Berechnung der Höhenlayers soll das Flugverhalten der Vögel gegenüber der Topografie widerspiegeln. Dabei entspricht die Grösse des „moving windows“ sozusagen der Sichtweite der Vögel oder der Distanz, welche die Höhenveränderungen das weitere Flugverhalten beeinflussen. Die Berechnungsmethode (Mittelwert, 3. Quartil usw.) stellt dar, welche Höhendifferenzen für die Vögel von Bedeutung für das weitere Verhalten sind, d. h. wie stark sich Extremwerte auf Richtungsentscheidungen auswirken. Welche Parameter in der Berechnung der Höhenlayers die Realität am besten abbilden, wurde überprüft, indem die resultierenden Dichtekarten mit Beobachtungsdaten (Bruderer 1996, Liechti et al. 1996a, 1996b) und dem Expertenwissen verglichen wurde.

2.4 Flughöhe

Allen Vögeln wird beim Start eine Höhe über Grund zugewiesen („initial height“). In der Folge berechnet sich die Flughöhe (m ü.M.) aus der topografischen Höhe der aktuellen Zelle plus der Höhe der Vögel über Grund. Für jede Zelle wird bei jedem Rechenschritt die mittlere Flughöhe aus jenen Flughöhen der Vögel berechnet, welche in das Quadrat einfliegen. Resultiert daraus eine mittlere Flughöhe, die unter der topographischen Höhe liegt, wird mit der topographischen Höhe weiter gerechnet.

Bei jedem Übertritt in das nächste Quadrat werden die Vögel vor die Entscheidung gestellt, ob sie ihre Flughöhe beibehalten, steigen oder sinken sollen. Eine topografische Erhebung in der bevorzugten Flugrichtung („moving windows“) zwingt die Vögel entweder zu steigen oder einen Richtungswechsel

vorzunehmen (siehe Kapitel 2.5). Bei genügender Höhe über Grund, z.B. nach dem Überqueren eines Bergkammes, erlaubt der Modellparameter „flydown“ den Vögeln zu sinken (z.B. flydown = 10 bedeutet, dass die Vögel auf 1 km 10 m sinken).

Am Ende einer Simulation wird für alle Zellen die mittlere Flughöhe abgespeichert. Diese können kartografisch dargestellt werden.

2.5 Integration von Flugrichtung und Topografie

Die Richtungsverteilungen geben vor, in welche Richtungen die Vögel unter bestimmten Windbedingungen fliegen. Dies wird mit einer 3x3-Matrix dargestellt (Abb. 3), welche die Anteile angibt, mit denen sich die Vögel aus der aktuellen Zelle auf die benachbarten Zellen verteilen (R_{1-8}). Basierend auf der mittleren Flughöhe in der aktuellen Zelle werden die Höhendifferenz (T_{1-8}) zu den umliegenden Quadraten berechnet (entsprechend der „moving window“ Einstellung, siehe Kap. 2.3) und ebenfalls in einer 3x3-Matrix dargestellt. Um aus diesen beiden Verteilungen (Matrizen) eine resultierende Verteilung (Matrize) zu berechnen, wird das Flugverhalten modelliert. Dieses beschreibt, wie gross die Höhendifferenz sein muss, damit die Vögel ein Hindernis umfliegen und nicht überfliegen. Die Gewichtung dieser Höhendifferenz erfolgt durch eine Sigmoidfunktion, welche festlegt, wie stark die Vögel bei zunehmender Höhendifferenz von der vorgegebenen Flugrichtung abweichen. Die Anteile der Vögel, die in eine bestimmte Richtung fliegen, werden mit der Gewichtung aus den Höhendifferenzen multipliziert und anschliessend standardisiert.

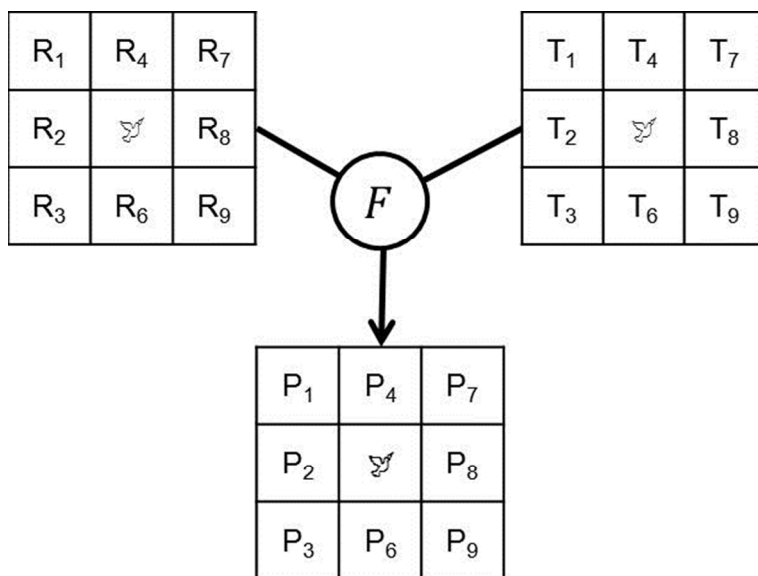


Abb. 3. Aus der Richtungsverteilung R_{1-8} und auf Grund der Höhenlayers T_{1-8} , welche die Topographie widerspiegeln, wird mit einer Funktion F berechnet, mit welchen Anteilen sich die Vögel von einem bestimmten Quadrat in die acht umliegenden verteilen.

Die Sigmoidfunktion (Abb. 4) wird definiert durch den Parameter a , der die Steilheit der Kurve bestimmt und den Parameter b , der die Lage des Wendepunktes festlegt. Der Parameter b entspricht der Höhendifferenz, bei welcher 50 % der Vögel nicht mehr bereit sind aufzusteigen und das Hindernis zu überfliegen.

Bezogen auf das Flugverhalten der Vögel wirkt sich die Erhöhung des Parameters a so aus, dass der Bereich, in dem ein Teil der Vögel aufsteigt und ein anderer Teil das Hindernis umfliegt, enger wird. Es gibt zunehmend nur das eine oder andere Verhalten. Die Erhöhung des Parameters b bewirkt, dass die Vögel auch bei grösseren Höhenunterschieden aufsteigen, statt ausweichen. Welche Werte von a

und b die Realität am besten abbilden, wird mittels Vergleich der simulierten Dichtekarten mit Beobachtungsdaten überprüft (siehe Kap. 3).

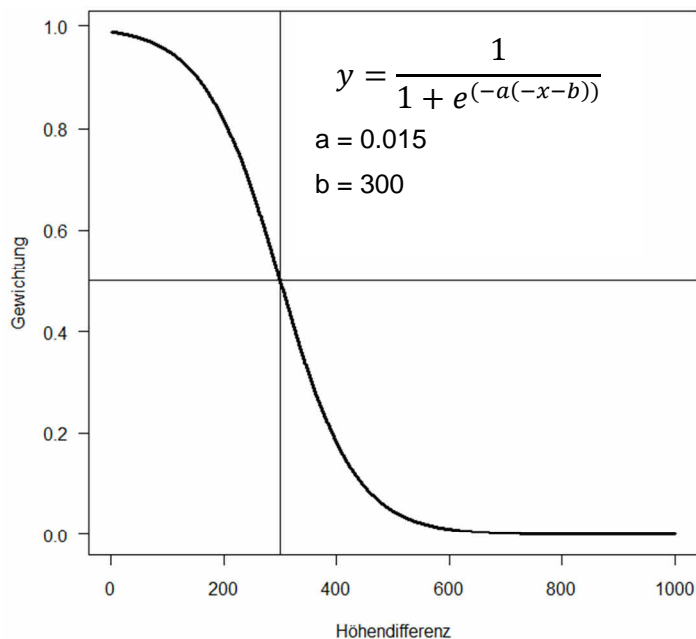


Abb. 4. Beispiel einer Sigmoidfunktion, mit welcher der Einfluss der Topografie auf die Flugrichtung berechnet wird. Der Wert y gibt an, wie stark eine bestimmte Flugrichtung in Abhängigkeit der Höhendifferenz zwischen der mittleren Flughöhe und der topografischen Höhe im Quadrat der Flugrichtung gewichtet wird.

2.6 Computersimulation und Parametrisierung

Die Simulation wurde in R programmiert (Version 2.13.1, R Development Core Team 2011, packages raster and rgdal). Die Parameter, welche in der Simulation getestet wurden, sind in Anhang B zusammengestellt.

Der R Code generiert Dichtekarten, welche anschliessend in ArcGIS (ArcGIS Desktop 10 Service pack 2, 1999–2010 ESRI Inc.) visualisiert wurden.

Tab. 1. Parameter, welche im R-Code der Computersimulation verändert werden können.

Bezeichnung	Bedeutung	Getestete Werte	Beschreibung
niter	Anzahl Iterationen	200, 300, 400, 500, 700, 1000	Kap. 2.1
birdNb	Anzahl Vögel pro Startquadrat	100	Kap. 2.1
fun	Funktion zur Berechnung der „moving windows“	max, mean, quartile3	Kap. 2.2
rad	Grösse der „moving windows“	13, 21, 33	Kap. 2.2
directionWeights	Richtungsverteilung	siehe Anhang A	Kap. 2.3
InitialHeight	Starthöhe der Vögel	0, 50, 100, 200, 500, 1500	Kap. 2.4
flydown	Sinkrate der Vögel	0, 10, 50	Kap. 2.4
aSigm	Steilheit der Sigmoidfunktion	0,01, 0,004, 0,006, 0,007, 0,008	Kap. 2.5
bSigm	Wendepunkt der Sigmoidfunktion	100, 200, 300, 400	Kap. 2.5

3. Modellierung

Die Simulationen wurden mit unterschiedlichen Kombinationen der Parameter ausgeführt (entsprechend Tab. 1). Die erhaltenen Dichtekarten wurden kritisch untersucht, indem sie mit den Resultaten aus der wissenschaftlichen Forschung verglichen wurden, insbesondere mit den Zugkarten in Bruderer (1996) und den Ergebnissen aus der Mondbeobachtungskampagne (Liechti et al. 1996a, 1996b). Zudem dienten Radarmessungen von fünf verschiedenen Standorten über je eine Herbstzugperiode zur Umrechnung der relativen Werte in absolute Zugintensitäten.

Die Validierung des Modells wurde ausschliesslich anhand der Zugdichten im Herbst durchgeführt, weil sich die vorhandenen Vergleichsdaten weitgehend auf diese Zugsaison beschränken. Es ist plausibel anzunehmen, dass ziehende Vögel im Frühling ein ähnliches Flugverhalten zeigen, jedoch mit umgekehrter Richtungspräferenz. Wir benutzten daher für die Modellierung des Frühlingzuges mit Ausnahme der Flugrichtung dieselben Modellparameter wie für den Herbst. Aus der Kombination von Herbst- und Frühlingzug berechneten wir das Gesamtbild.

3.1 Modellparameter

3.1.1 Iterationen

Am Nordrand der Schweiz starten in unserem Modell alle Vögel zeitgleich und durchlaufen das Untersuchungsgebiet in Schritten von 1 km² pro Wiederholung der Rechenprozedur. Unter allen möglichen Bedingungen reichten 700 Wiederholungen, damit alle Rasterquadrate mit einem Dichtewert aufgefüllt wurden (`niter <- 700`). Bei weniger Schritten überdeckten die Berechnungen nicht die ganze Schweiz. Mehr Schritte sind nicht notwendig, weil die weiteren Dichtewerte südlich, ausserhalb des Betrachtungsgebietes zu liegen kommen.

3.1.2 Anzahl Vögel pro Startquadrat

Auf der Startlinie nördlich der Schweiz wird die Simulation mit einer bestimmten Anzahl Vögeln pro Quadrat gestartet. Es zeigte sich, dass 100 Vögel pro Quadrat genügen, um differenzierte Dichtewerte zu erhalten (`birdNb <- 100`). Eine höhere Anzahl Vögel führte nicht zu einer Verbesserung der Abbildung, die wir bis anhin rein qualitativ beurteilen können. Allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, dass in späteren Auswerteverfahren mit schliessender Statistik die Aussagekraft durch eine höhere Stichprobengrösse erhöht werden kann.

3.1.3 Starthöhe der Vögel

Im Prinzip könnten wir die Annahme treffen, dass die Vögel nördlich der Schweiz von ihren Rastplätzen aus starten und deshalb Starthöhe = 0 festlegen. Vögel steigen allerdings relativ rasch auf, um geeignete Rückenwinde zu suchen (Liechti 2006). Deshalb untersuchten wir den Effekt der Starthöhe und wählten dafür die Richtungsverteilung bei schwachen Rückenwinden und Sinkrate = 0.

Die Topografie hat einen viel stärkeren Einfluss auf die Dichtekarten als die Starthöhe (Abb. 5). Die Starthöhe wirkt sich erst mit Werten über 1000 m sichtbar aus. Radarmessungen zeigen allerdings, dass über 60 % der Vögel unter 500 m über Grund fliegen (Bruderer & Liechti 2004). Der Effekt der Starthöhe wird zudem durch eine Sinkrate > 0 schnell überdeckt, insbesondere weil nach dem Start die flache Topografie ein Absinken erlaubt (siehe 3.1.4). Die Starthöhe setzten wir in Abhängigkeit der Windbedingungen auf 100 m, bzw. 200 m fest.

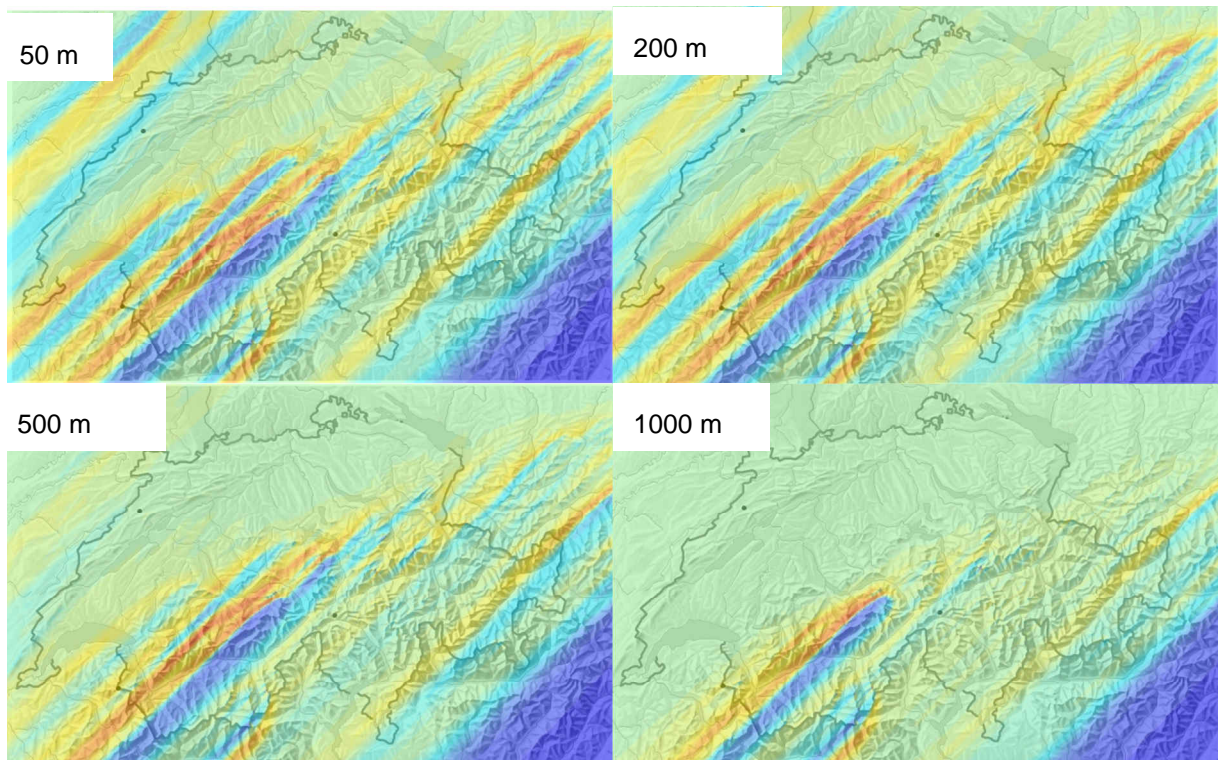


Abb. 5. Effekt der Starthöhe auf die Dichteverteilung. Die Richtungsverteilung basiert auf schwachen Rückenwinden. Die Sinkrate wurde auf 0 gesetzt. Die Farben illustrieren die Dezile (Zehntelwert) der Dichten von dunkelblau 1. Dezil bis rot 10. Dezil. In jedem Dezil liegen 10% der Werte.

3.1.4 Sinkrate der Vögel

Nach dem Starten suchen ziehende Vögel nach Luftschichten, in denen sie günstige Rückenwinde finden, indem sie aufsteigen (Liechti 2006, Mateos & Liechti 2011). Finden sie gute Windbedingungen, so behalten sie ihre Flughöhe bei. Werden die Windbedingungen nach oben schlechter, d. h. treffen sie auf Gegenwind, so sinken sie wieder ab. Radarbeobachtungen zeigten, dass bei Zugvögeln Steig- und Sinkraten von 5 % zum normalen Flugverhalten gehören (Bruderer et al. 1995).

In unserer Computersimulation führt eine grössere Sinkrate dazu, dass die Vögel stärker durch die Berge kanalisiert werden (Abb. 6). Bereits bei einer Sinkrate von 1 % ergeben sich sichtbar erhöhte Zugkonzentrationen in den Bergtälern oder um den Jura herum. Höhere Sinkraten führen dazu, dass ganze Regionen nicht mehr überflogen werden. Wir haben für diese Darstellung schwache Rückenwinde gewählt. Dies sind für Zugvögel gute Windverhältnisse, unter denen Zugvögel erfahrungsgemäss in relativ grosser Höhe über Bergkämme ziehen (Zehnder et al. 2001).

Bei Rückenwind neigen Zugvögel dazu, ihre Flughöhe beizubehalten, während sie bei Gegenwind tendieren abzustiegen. Dementsprechend wählten wir in Abhängigkeit der simulierten Windrichtung Sinkraten zwischen 0 und 3 % (0–30 m/km).

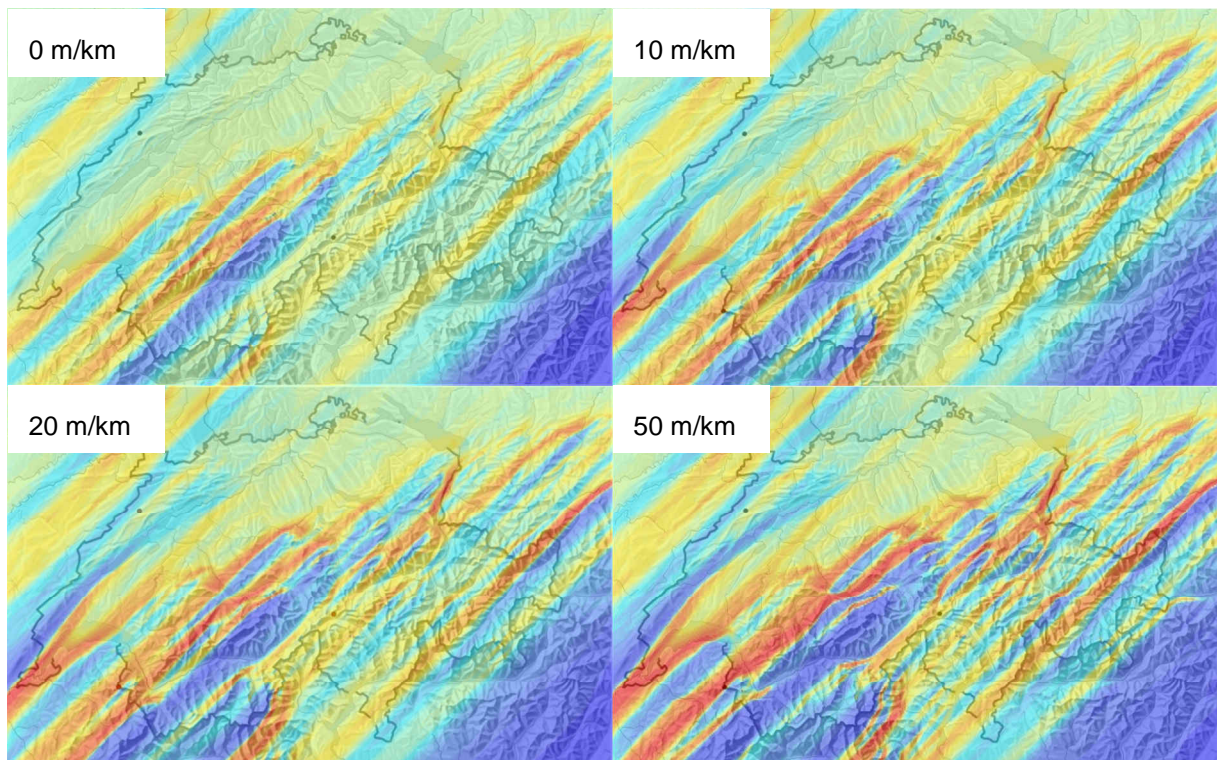


Abb. 6. Effekt der Sinkrate auf die Dichteverteilung. Abgebildet sind Dichtekarten bei schwachen Rückenwinden. Die Farben illustrieren die Dezile der Dichten von dunkelblau 1. Dezile bis rot 10. Dezile.

3.1.5 Flugverhalten gegenüber der Topografie

Die Reaktionsnormen der Vögel auf topografische Hindernisse sind variabel. Sie hängen von den Wind- und Sichtverhältnissen ab. In unserem Modell gibt es zwei unterschiedliche Wirkungsweisen. Einerseits beeinflusst die Grösse des „moving window“ die Distanz, mit der ein Vogel auf Hindernisse reagiert, weil mit zunehmender Grösse des „moving window“ die Topografie weiter voraus mit berücksichtigt wird (siehe 2.2). Andererseits wird das Verhalten gegenüber der Topografie durch die Sigmoidkurve verändert (siehe Kap. 2.4).

Ein „moving window“ von beispielsweise 13 bedeutet konkret, dass in Flugrichtung der Vögel die topografische Höhe bis in 6 km Distanz in Richtung N, S, W oder O (bzw. 8,5 km in Richtung SW, NW, NO oder SO) für das weitere Flugverhalten einberechnet wird (vgl. Abb. 2). In diesem Beispiel wird dann aus 35 Werten ein einziger neuer Wert berechnet. Die Berechnungsmethode wirkt sich deutlich auf die Dichtekarten aus (Abb. 7). Wird aus dem „moving window“ das Maximum berechnet, führt dies zu extremen, bzw. unrealistischen Konzentrationen. Mit dem Mittelwert ergibt sich genau das gegenteilige Bild, mit einer extrem flachen, ebenfalls unrealistischen Verteilung. Am nächsten bei den Erwartungswerten liegt die Abbildung, welche bei der Berechnung des 3. Quartil entsteht. Deshalb verwendeten wir bei allen Dichtekarten diese Berechnungsmethode, ohne dies explizit zu erwähnen.

Das „moving window“ simuliert die Sichtweite der Vögel. Im Mittelland und bei guten Wetterverhältnissen ist eine Sichtweite von 16 km gut vorstellbar (moving window = 33). In den Alpentälern ist eine kürzere Weite realistisch, beispielsweise 6 km (moving window = 13). Mit zunehmender Grösse des „moving window“ ergibt sich eine breitere Verteilung der Dichte zunehmend entfernt von den Bergen, weil die Vögel bereits in grösserer Entfernung auf ein Hindernis reagieren (Abb. 8). Im Rahmen dieses Modellansatzes war es aber nicht möglich, die Sichtweiten regional zu unterscheiden.

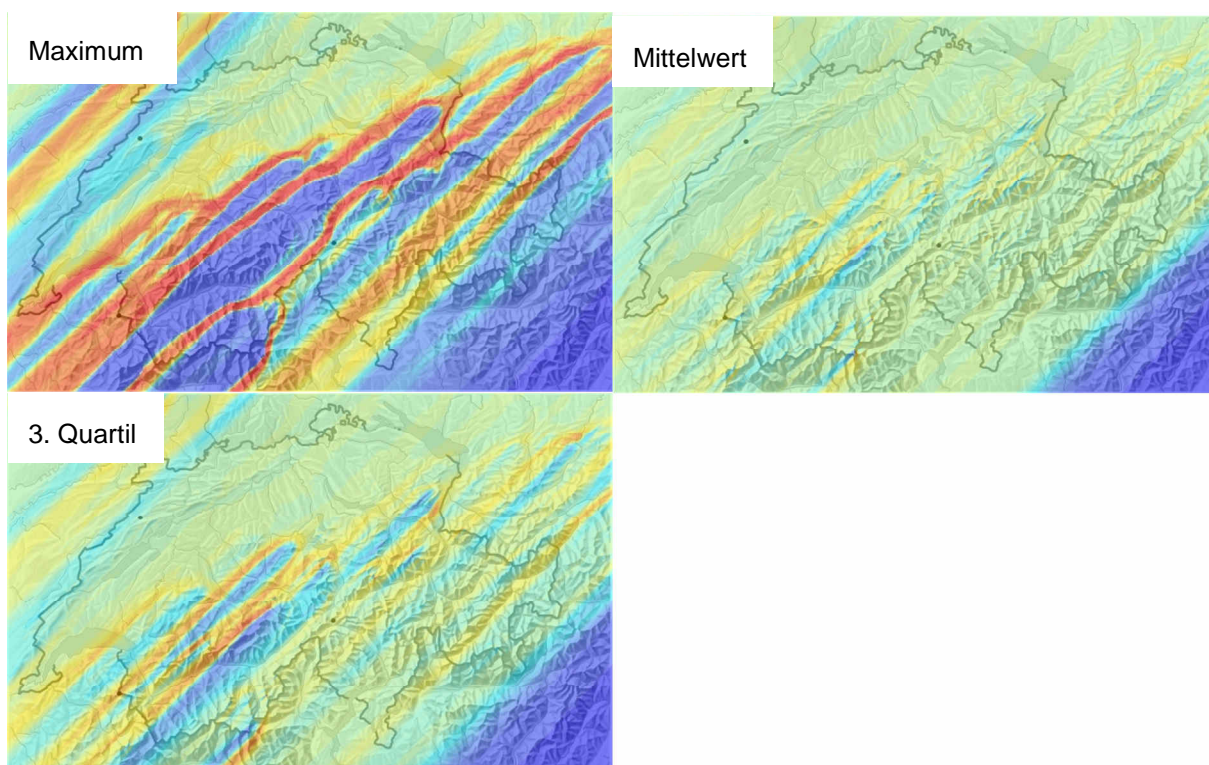


Abb. 7. Effekt der Funktion, mit welcher die Höhenwerte der in Flugrichtung liegenden Quadrate als Referenzwert für das weitere Flugverhalten einberechnet werden. Abgebildet sind Dichtekarten bei schwachen Rückenwinden und einer Sichtweite von 10 km (moving window = 21). Die Farben illustrieren die Dezile der Dichten von dunkelblau 1. Dezile bis rot 10. Dezile.

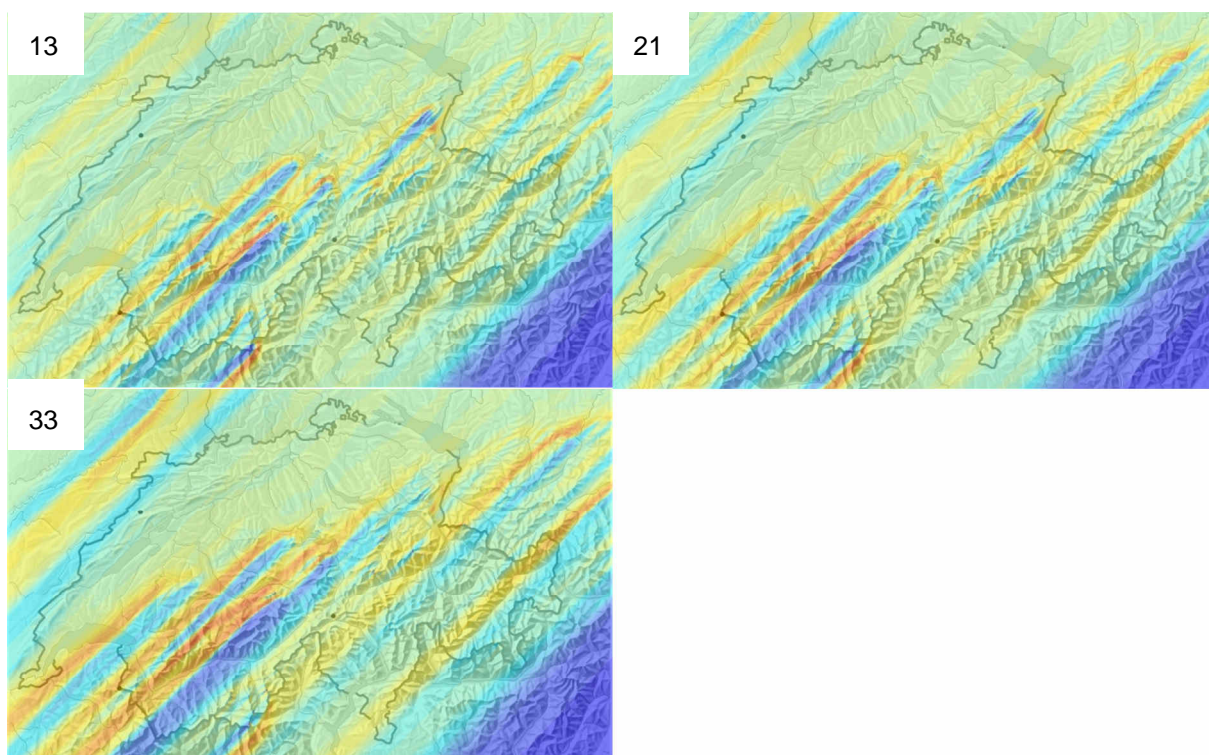


Abb. 8. Effekt des „moving window“, welches als Sichtweite der Vögel interpretiert werden kann. Abgebildet sind Dichtekarten bei schwachen Rückenwinden. Die Farben illustrieren die Dezile der Dichten von dunkelblau 1. Dezile bis rot 10. Dezile.

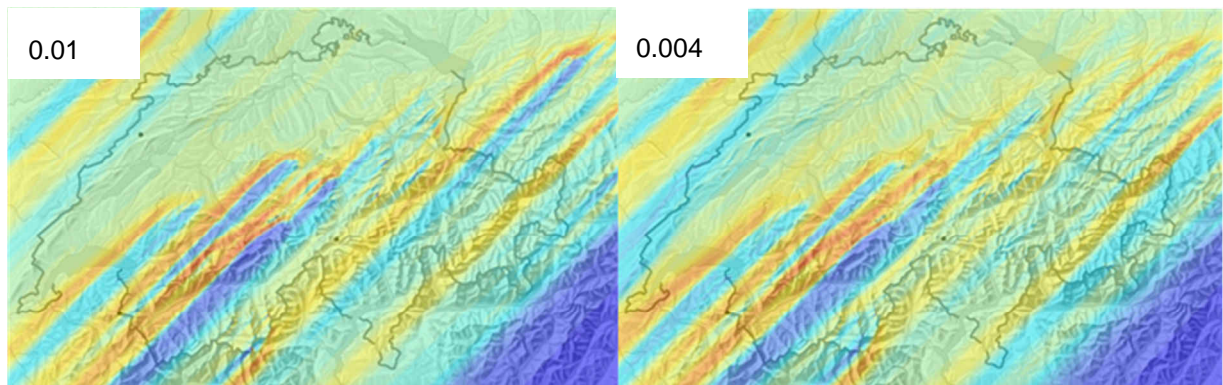


Abb. 9. Effekt des Parameters a der Sigmoidfunktion (Steilheit), welcher das Steigverhalten, bzw. Ausweichen, beeinflusst. Abgebildet sind Dichtekarten bei schwachen Rückenwinden. Rechts ist die Reaktion auf die Höhendifferenz variabler als links. Die Farben illustrieren die Dezile der Dichten von dunkelblau 1. Dezile bis rot 10. Dezile.

Mit der Sigmoidfunktion wird bestimmt, wie die Vögel die Information aus der in Flugrichtung liegenden Höhe umsetzen. Die Kurve wird durch die zwei Parameter a und b bestimmt (Kap. 2.4). Klare Unterschiede werden sichtbar, wenn der Parameter b verändert wird. Dieser beeinflusst wesentlich stärker, bei welcher Höhendifferenz ein benachbartes Quadrat gemieden wird. Bei $b = 300$ tritt die Topografie deshalb klar in der Dichtekarte in Erscheinung, während bei $b = 700$ nur geringe Konzentrationen entstehen. Der Parameter a bewirkt nur eine graduelle Anpassung, die erst bei der Analyse der Höhenverteilungen in einem Quadrat beurteilt werden kann. Als Basis für die Parametereinstellungen (abbiegen oder aufsteigen) dienten uns Radarmessungen von Flugwegen einzelner Zugvögel im Alpenraum (Liechti & Bruderer 1986).

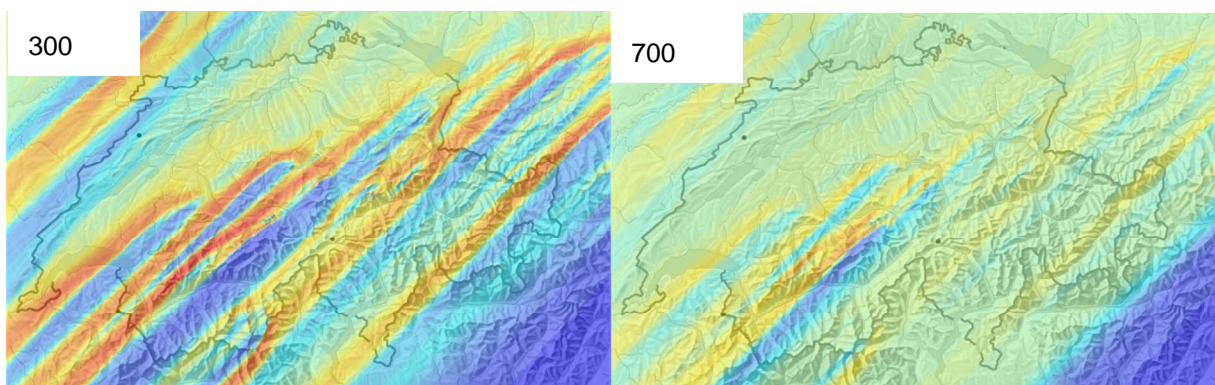


Abb. 10. Effekt des Parameters b der Sigmoidfunktion (Wendepunkt), welcher die Höhendifferenz bestimmt, bei der 50 % der Vögel ausweichen bzw. aufsteigen. Abgebildet sind Dichtekarten bei schwachen Rückenwinden. Links umfliegen 50 % der Vögel bei einer Höhendifferenz von 300 m das Hindernis, rechts bei 700 m. Die Farben illustrieren die Dezile der Dichten von dunkelblau 1. Dezile bis rot 10. Dezile.

3.1.6 Auswirkungen des Windes auf das Flugverhalten

Die Flugrichtung eines Zugvogels hängt primär davon ab, in welche Richtung er fliegen will (Eigenrichtung). Beobachtungen von einem Standort mit geringem topografischem Einfluss und bei schwachen Winden zeigten, dass immer eine gewisse Streuung der Flugrichtungen um einen Mittelwert vorhanden ist, weil individuelle Unterschiede zwischen den ziehenden Vögeln vorhanden sind, wie auch unterschiedliche Art- und Populationszugehörigkeiten mit unterschiedlichen Zielgebieten.

Die mittlere Flugrichtung und Streuung werden in Abhängigkeit von Windrichtung und -stärke verändert (Bruderer & Liechti 1990). Die Ablenkung nimmt mit zunehmender Windstärke zu (Abb. 11; Richtungsverteilungen siehe Anhang Abb. A1). Bei Windstärken unter 5 m/s ist der Einfluss relativ gering, weil die Vögel die Verdriftung kompensieren können. Windstärken über 10 m/s haben zwar einen starken Einfluss auf die Richtungsverteilung, aber unter solchen Bedingungen sind erfahrungsgemäss kaum noch Vögel unterwegs. Bei Rückenwind (NO) verändert sich das Bild nicht grundlegend. Die Konzentrationslinien werden aber enger. Bei mittelstarkem Gegenwind (SW) werden die Vögel offenbar in die Alpen hinein gedrängt, was durchaus plausibel erscheint. Die Dichteverteilung bei starkem Gegenwind entspricht kaum der Realität, weil unter solchen Bedingungen keine Zugvögel unterwegs sind. Bei Seitenwinden aus NW werden die Vögel in südlichere Richtungen abgedrängt, wobei die Zugkonzentrationen den Beobachtungen entsprechen. Die Dichtekarten bei Seitenwinden aus SO bei mittelstarken und starken Winden sind fragwürdig, weil die Annahme von SO-Winden über der ganzen Schweiz nicht realistisch ist. Dies ist ein generelles Problem in unserer Simulation. Je nach Windsituation kann nur ein Teil der Dichtekarte effektiv realistisch sein, denn die Winde können im Mittelland und in den Alpentälern stark voneinander abweichen. Noch deutlicher wird der Unterschied, wenn zwischen den Gebieten nördlich und südlich der Alpen unterschieden wird.

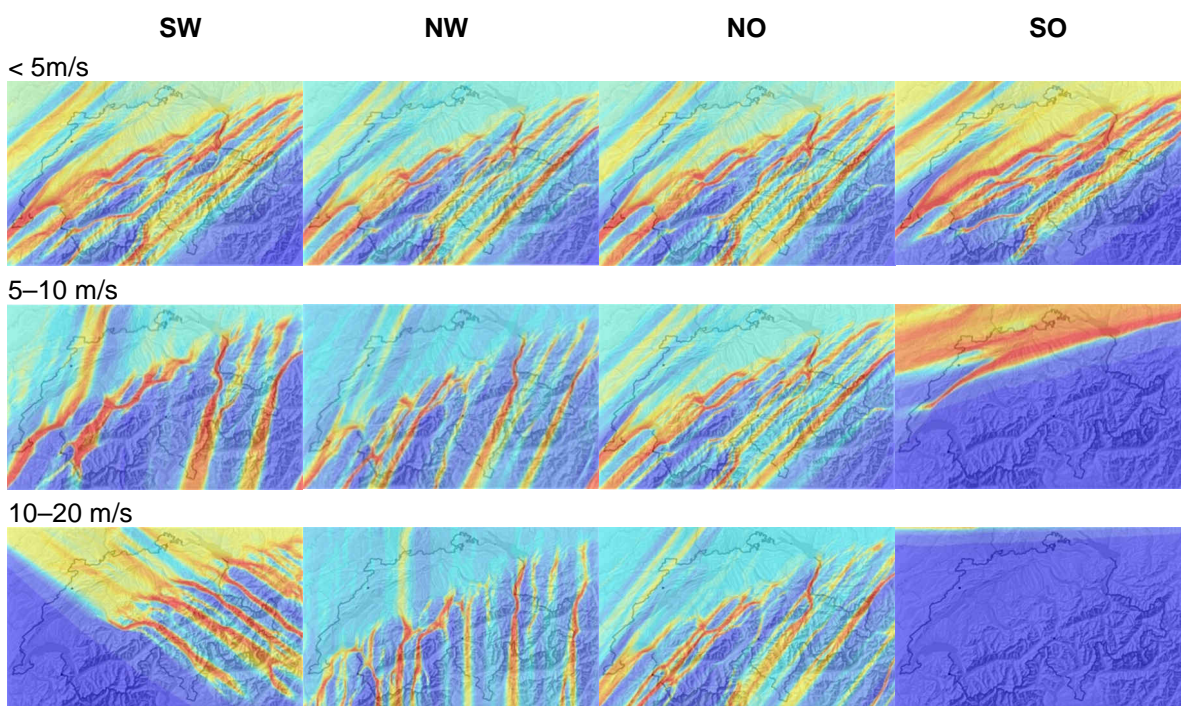


Abb. 11. Effekt des Windes. Ausser der Richtungsverteilung sind alle anderen Parameter der Dichtekarten identisch (moving window = 33, aSigm = 0,008, bSigm = 400, flydown = 40). Die Farben illustrieren die Dezile der Dichten von dunkelblau 1. Dezile bis rot 10. Dezile.

3.2 Vergleichsdaten

3.2.1 Mond

Im Herbst 1994 wurden im Rahmen einer Mondbeobachtungskampagne Daten zum räumlichen Verlauf des nächtlichen Vogelzugs gesammelt (Liechti et al. 1996a, 1996b). Für eine klare Vollmondnacht liegen schweizweit Beobachtungen vor (Abb. 12). Es handelt sich bei dieser Nacht vom 19./20. Sept. 1994 um eine intensive Zugnacht in der wohl 3–5 Millionen Vögel die Schweiz überquerten. Wie der

Vergleich mit zwei Simulationen zeigt, sind zwar gewisse Übereinstimmungen vorhanden, aber es treten auch deutliche Diskrepanzen zum Vorschein. Es muss berücksichtigt werden, dass bei Mondbeobachtungen nur die untersten 1000 m über Grund quantitativ erfasst werden können. Das bedeutet, dass v.a. in Tälern hinter Passübergängen oder Gebirgskämme der Zug nur teilweise erfasst wird. Das dürfte v.a. für den Alpenraum eine Erklärung für die Abweichungen zwischen Modell und Beobachtungen sein.

Das Modell kann nur beschränkt an die Beobachtungen angepasst werden. Alle Parameter können nur in Bezug auf das Gesamtmodell verändert werden und nicht Bezug auf spezifische Regionen. So dürfte z.B. die Distanz, in welcher sich ein Zugvogel entscheidet ein Hindernis zu umfliegen anstatt aufzusteigen, unterschiedlich für das Mittelland und den Alpenraum sein. Weiter ist zu erwarten, dass eine einmal getätigte leichte Richtungsänderung nicht gleich wieder kompensiert wird, sondern über längere Zeit beibehalten wird. Das dürfte wahrscheinlich dazu führen, dass die Konzentrationen entlang des nördlichen Alpenrandes etwas kleiner werden, dafür die Ausdehnung dieses Bandes mit erhöhter Konzentration etwas breiter wird. Die Berücksichtigung von regionalspezifischem Verhalten und solcher vorangegangenen Entscheidungen bedeutet eine wesentliche Erweiterung des Modells, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war.

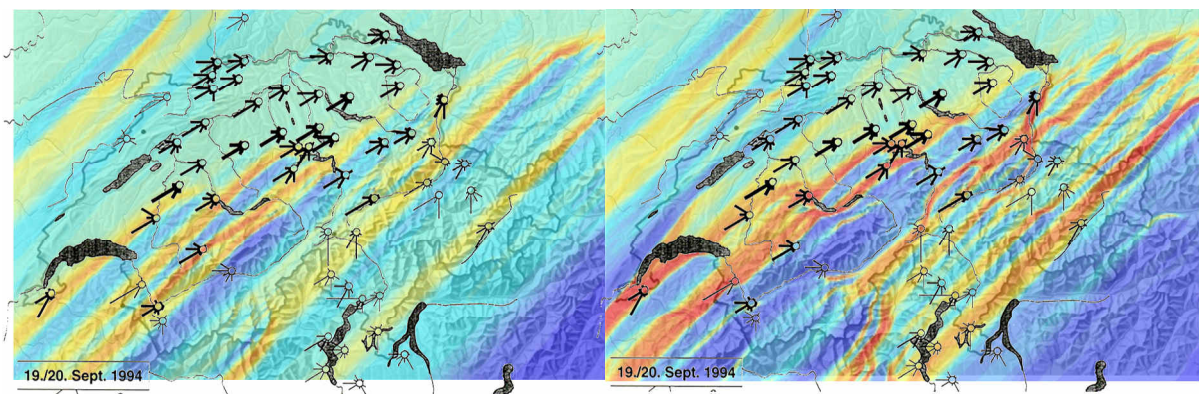


Abb. 12. Vergleich von simultanen Mondbeobachtungen aus einer Nacht (19./20.9.1994) mit zwei verschiedenen Simulationen. A: Rückenwind – gute Sicht – eher aufsteigen und Flughöhe beibehalten (moving window = 33, aSigm = 0,008, bSigm = 400, flydown = 0). B: Rückenwind – gute Sicht – eher aufsteigen aber hinter dem Hindernis wieder absinken (moving window = 33, aSigm = 0,008, bSigm = 400, flydown = 50). Die Farben illustrieren die Dezile der Dichten von dunkelblau 1. Dezile bis rot 10. Dezile.

3.2.2 Expertenbeurteilung

Als weitere Validierung verglichen wir die Simulationsergebnisse mit dem Ergebnis einer Experteninterpretation aus den 90er-Jahren (Bruderer 1996). In dieser Publikation wurden vom Autor die damaligen Informationen aus Feldbeobachtungen und Radarmessungen in anschauliche Karten umgesetzt. Der rein visuelle Vergleich der Illustrationen zeigt deutlich Parallelen (Abb. 13 und 14), wobei sich v.a. bei der Gegenwindsituation (Abb. 14) eine gute Übereinstimmung zwischen dem Expertenmodell und dem numerischen Modell ergibt.

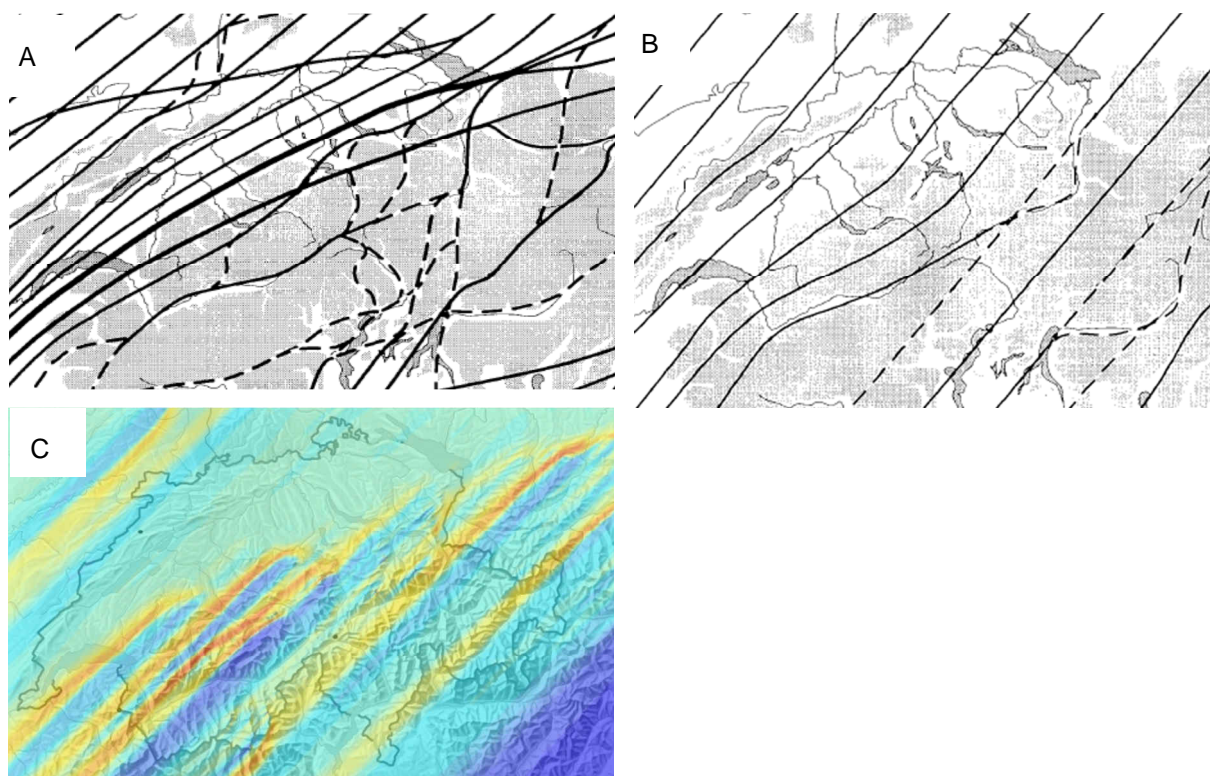


Abb. 13. Vergleich der Zugdichte über der Schweiz bei schwachem Rückenwind zwischen schematischer Zusammenfassung und Extrapolation von verfügbaren Informationen über Richtungen des Vogelzugs basierend auf Radardaten (aus Bruderer 1996) für tiefen (A) und hohen Zug (B) mit dem Resultat der Computersimulation (C) ohne Höheneinschränkung. Die Farben illustrieren die Dezile der Dichten von dunkelblau 1. Dezile bis rot 10. Dezile.

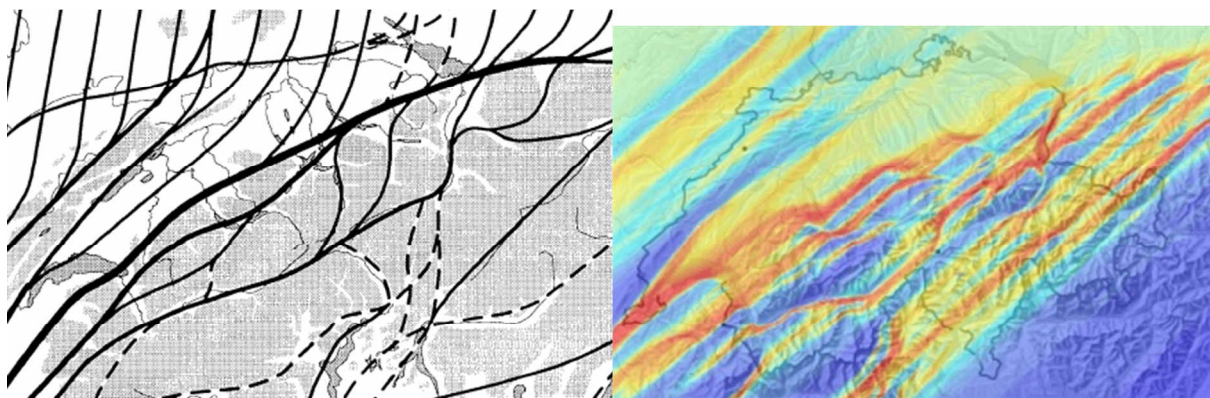


Abb. 14. Vergleich der Zugdichte über der Schweiz bei schwachem Rückenwind zwischen (A) schematischer Zusammenfassung und Extrapolation von verfügbaren Informationen über Richtungen des Vogelzugs basierend auf Radardaten (aus Bruderer 1996) mit (B) dem Resultat der Computersimulation. Die Farben illustrieren die Dezile der Dichten von dunkelblau 1. Dezile bis rot 10. Dezile.

3.2.3 Radarmessungen

Mit Radar können die Zugintensitäten kontinuierlich über einen längeren Zeitraum erfasst werden. Einerseits kann damit untersucht werden, welche Windbedingungen von den Zugvögeln bevorzugt werden, andererseits sind Vergleiche zwischen verschiedenen Standorten möglich.

Von einem Standort in den Voralpen liegen Messungen der Zugintensitäten über eine ganze Herbstzugperiode vor (21. Aug. bis 23. Okt. 2009) und Daten über die lokal herrschenden Winde. Diese Periode war geprägt von ausserordentlich gemässigtem Wetter ohne Frontdurchgänge. Deshalb gibt dieser Datensatz zwar Hinweise, in welchem Ausmass Zugvögel unterschiedliche Windsituationen nutzen, aber die Schwachwindsituationen sind überrepräsentiert. Schwachwindbedingungen (Windstärke ≤ 5 m/s) traten während 76 % der Beobachtungsperiode auf, wobei 77 % der Vögel unter diesen Bedingungen unterwegs waren. Rückenwindbedingungen (Wind von NO, Windstärke > 5 m/s) traten während 9 % der Beobachtungsperiode, unter denen 16 % der Vögel zogen. Gegen- oder Seitenwinde (Winde aus S bis W, Windstärke > 5 m/s) traten während 14 % der Beobachtungsperiode auf, unter denen 7 % der Vögel zogen. Wir simulierten diese drei Windsituation mit entsprechender Auswahl der Modellparameter (Abb. 15, Anhang B). Anschliessend kombinierten wir sie mit einer Gewichtung von 7:2:1 zu einer einzigen Dichtekarte entsprechend unseren Daten, dann mit einer Gewichtung 5:3:2 (Abb. 16). Die moderatere Gewichtungen von 5:3:2 repräsentiert nach unseren Einschätzungen die durchschnittlichen Herbstbedingungen besser als jene aus den speziellen Bedingungen im Herbst 2009.

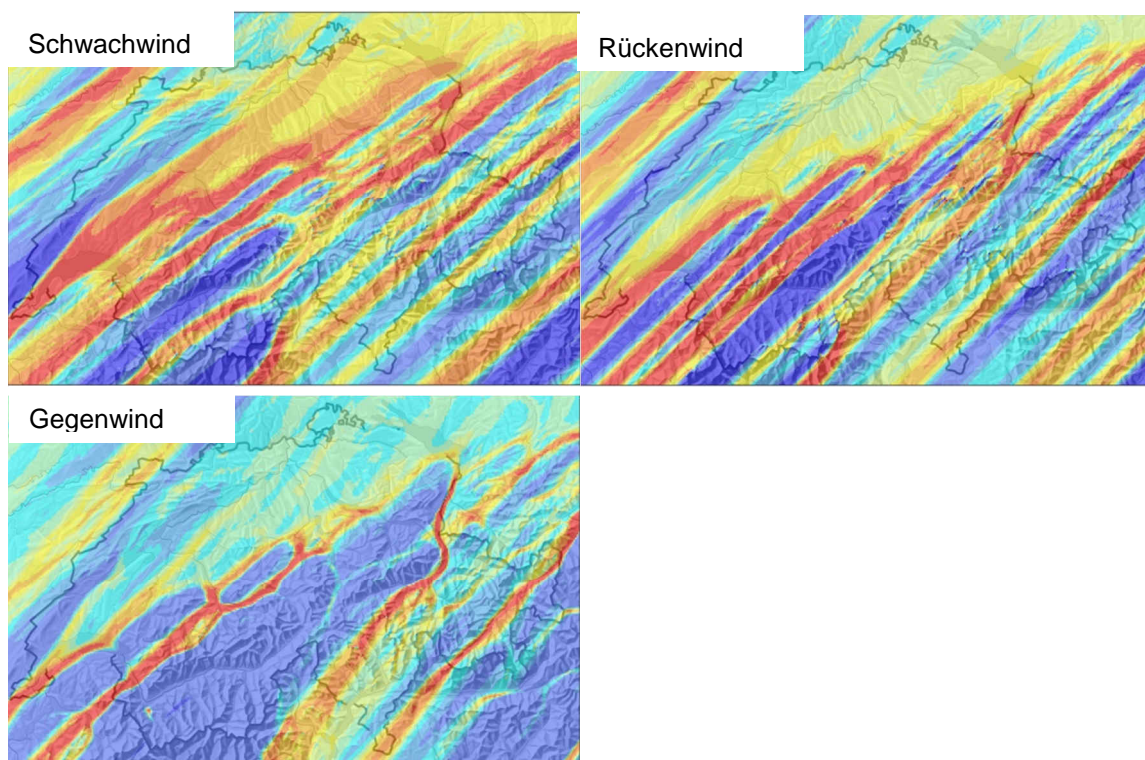


Abb. 15. Ergebnisse der Dichtesimulation für die drei Hauptwindsituationen während des Herbstzuges. Die Farben illustrieren die Dezile der Dichten von dunkelblau 1. Dezile bis rot 10. Dezile.

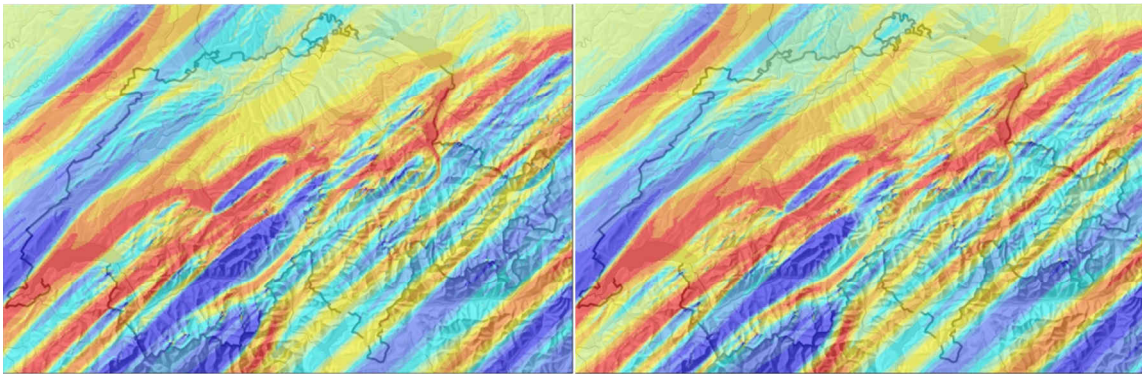


Abb. 16. Resultierende Herbstzugdichte aus der Kombination von Schwachwind, Rückenwind und Gegenwind (s. Abb. 15) im Verhältnis 5:3:2 (links) und 7:2:1 (rechts). Die Farben illustrieren die Dezile der Dichten von dunkelblau 1. Dezile bis rot 10. Dezile.

3.3 Anwendung der Modellparameter auf den Frühlingszug

Sämtliche bisher beschriebenen Situationen beschränkten sich auf das Zugeschehen im Herbst. Wir wählten dieses Vorgehen, weil aus der bisherigen Forschung weit mehr über den Herbst- als über den Frühlingszug bekannt ist. Allerdings können wir davon ausgehen, dass sich Zugvögel im Frühling gegenüber Wind und Topografie gleich verhalten wie im Herbst. Deshalb wendeten wir die gleichen Modellparameter für die umgekehrte Richtungspräferenz (45°) an und simulierten so den Frühlingszug.

Für den Herbst konnten wir annehmen, dass sich die Zugvögel in einer homogenen Verteilung von Norden her der Schweiz nähern. Die Startlinie wurde so gewählt, dass sie genug weit nach Osten reicht, so dass bei einer Vorzugsrichtung nach Südwesten Zugdichten über der gesamten Fläche der Schweiz simuliert werden konnten. Für den Frühling müssen wir jedoch eine differenziertere Annahme treffen, weil die Alpen von Süden her eine bedeutende Barriere darstellen. Dies führt zu unterschiedlichen Dichten der Zugvögel beim Einflug von Westen und Süden in die Schweiz. Damit wir Zugdichten über der ganzen Fläche der Schweiz erhielten, ergänzten wir die West-Ost Startlinie im Süden mit einer Nord-Süd Startlinie im Westen. Auf dieser Nord-Süd Startlinie nahmen wir vereinfachend eine homogene Verteilung an. Auf der West-Ost Startlinie nahmen wir an, dass über dem Alpenbogen die Dichte halb so gross ist wie auf der östlichen Fortsetzung der Startlinie (Oberitalien – Poebene).

Analog zum Vorgehen für den Herbst, gingen wir von drei Richtungspräferenzen aus, die sich aus den vorherrschenden Windbedingungen ergeben (Anhang A, Abb. A2). Am häufigsten sind Zugvögel unter Schwachwindbedingungen unterwegs. Die Dichtekarte für diese Situation zeigt eine deutliche Kanalisierung entlang der Jurakette (Abb. 17). Für die zweithäufigste Situation, Rückenwind von 5–10 m/s, erhalten wir zusätzlichen Einflug in die Alpentäler. Bei moderatem Gegenwind von 5–10 m/s, die dritthäufigste Situation, zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei Schwachwind, allerdings mit einer weiteren Verteilung des Vogelzuges von der Jurakette ins Mittelland.

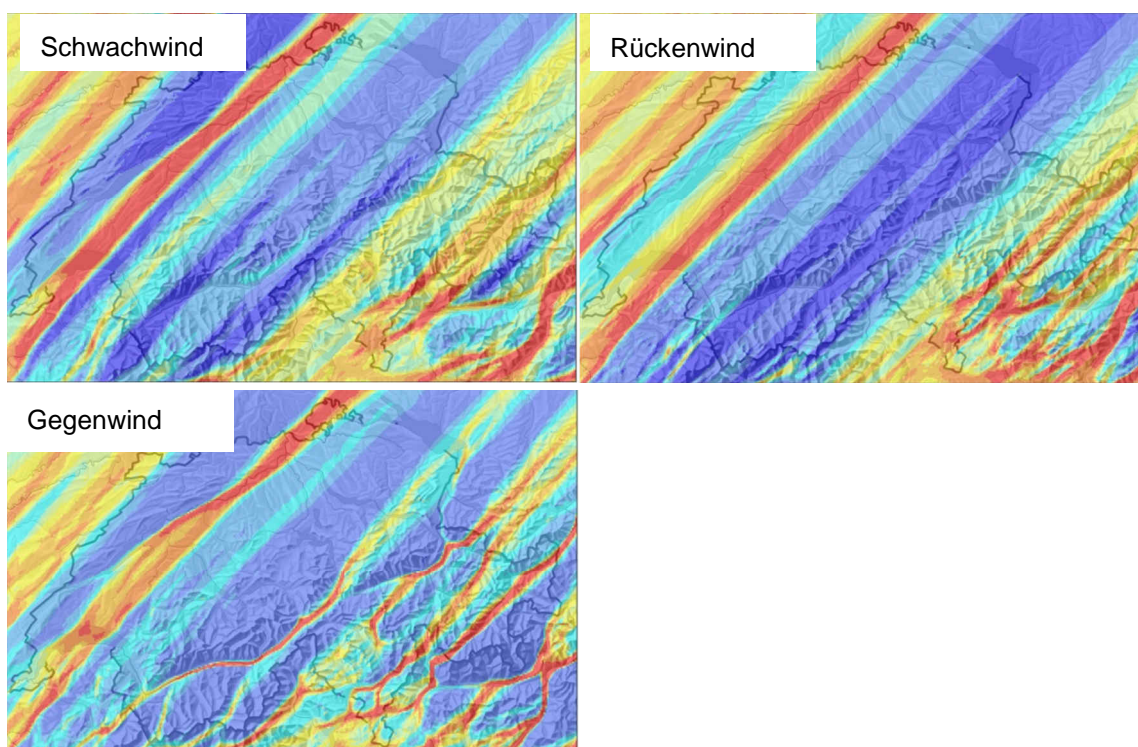


Abb. 17. Ergebnisse der Dichtesimulation für die drei Hauptwindsituationen während des Frühlingszuges. Die Farben illustrieren die Dezile der Dichten von dunkelblau 1. Dezile bis rot 10. Dezile.

Auch für den Frühling nahmen wir an, dass die 50 % der Vögel bei Schwachwind ziehen, 30 % bei Rückenwind und 20 % bei Gegenwind. Wir kombinierten die Dichtekarten entsprechend mit einer Gewichtung 5:3:2 zu einer Dichtekarte, die den Frühlingszug darstellt (Abb. 18).

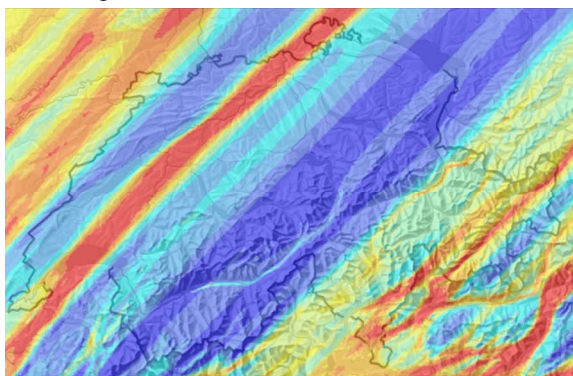


Abb. 18. Resultierende Frühlingszugdichte aus der Kombination von Schwachwind, Rückenwind und Gegenwind im Verhältnis 5:3:2. Die Farben illustrieren die Dezile der Dichten von dunkelblau 1. Dezile bis rot 10. Dezile.

4. Resultate

4.1 Sensitivitätsanalyse

Das gewählte Modell ist ausreichend flexibel, um die bekannten und vorstellbaren Zugabläufe durch die Schweiz zu simulieren. So kann sowohl die relative schwache Topographieabhängigkeit bei Ostwindlagen, als auch die durch Westwind und tiefer Wolke bedingte starke Topographieabhängigkeit plausibel visualisiert werden (Abb. 19).

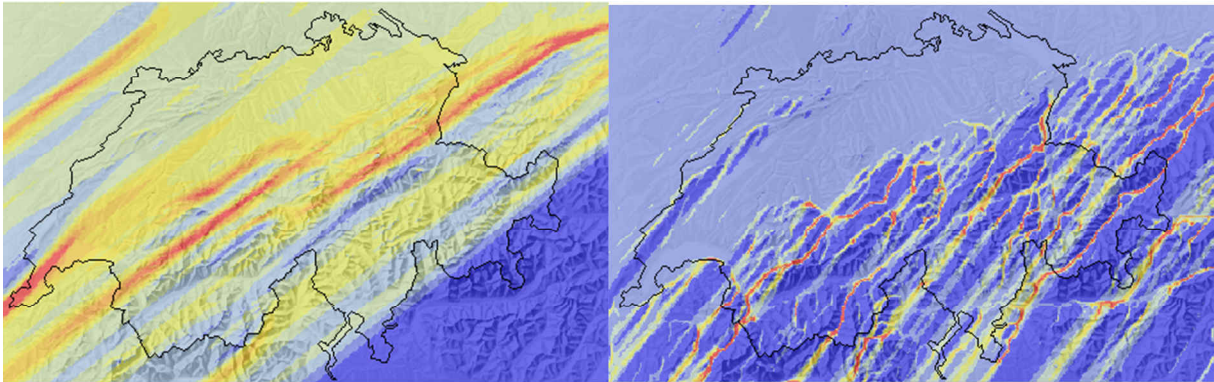


Abb. 19. Die linke Graphik zeigt eine Situation mit günstigem Rückenwind und grosser Weitsicht. Die rechte Graphik zeigt eine Situation mit leichtem Gegenwind (Westwind) und schlechter Sicht bzw. tief hängenden Wolken. Die Farben illustrieren die Dezile der Dichten von dunkelblau 1. Dezile bis rot 10. Dezile.

Am stärksten können die Modellergebnisse durch die Parameter für die Sichtweite und das Flugverhalten (ausweichen oder aufsteigen; Parameter aSigm, bSigm) manipulieren werden. Die Überprüfung hat gezeigt, dass mit dem Modell sowohl Expertenerfahrung (Kap. 3.2.2) wie auch Ergebnisse von Punktmessungen nachvollzogen werden können (Kap. 4.2). Allerdings konnten im Rahmen dieser Arbeit keine exakten Vergleiche mit z.B. zeitlichen Abläufen mit Einbezug aktueller Wetterbedingungen durchgeführt werden. Dazu wäre eine Dynamisierung des Modells notwendig, wie sie erst in einem zweiten Schritt vorgesehen ist. Die Überprüfung beruht daher auf einem semiquantitativen Vergleich der verschiedenen Beobachtungs- und Messdaten und einer Experteneinschätzung.

4.2 Validierung Modellierung Herbst

Für die Validierung des Modells verglichen wir die Resultate der Computersimulationen mit den Resultaten der Radarmessungen von fünf Standorten: Mittelland, Jura, Voralpen, Südwest-Alpen und Zentral-Alpen (Abb. 20). An allen fünf Standorten wurde der Herbstzug über zwei bis drei Herbstmonate aufgezeichnet. Diese Grundlagendaten stammen aus unterschiedlichen Jahren. Das an einem bestimmten Ort gemessene tägliche Zugvolumen schwankt sehr stark, weil es von den Wetterbedingungen und dem potentiellen Zugvolumen abhängt. Die Wetterbedingungen unterschieden sich zwischen den Jahren. Deshalb ist der direkte Vergleich der Zugdichten mit gewissen Vorbehalten zu interpretieren. Der Mittelwert von Beobachtungen über die gesamte Hauptzugperiode, wie sie hier vorliegen, können dennoch für den Vergleich zwischen den Standorten herangezogen werden, weil sich Tagesunterschiede im Verlaufe einer Saison ausgleichen.

Für die Überprüfung der Simulation haben wir die mittlere Zugdichte pro Tag des Beobachtungszeitraumes berechnet, in welchem für alle fünf Standorte Messungen vorliegen (Tab. 2). Die Berechnungseinheit war ein Kalendertag (Mitternacht bis Mitternacht).

Tab. 2. Mit Radar gemessene mittlere Zugintensitäten vom 25. August bis 18. Oktober und die relativen Verhältnisse zwischen den Standorten. MTR: Migration Traffic Rate [$\text{Vögel h}^{-1} \text{ km}^{-1}$], SD Standardabweichung.

	Gesamtzug		Zug unter 200 m ü.B.		
	MTR (SD)	Verhältnis	MTR (SD)	Verhältnis	
Zentral-Alpen 2010	97 (97)	1	10 (9)	1	
Jura 2010	381 (281)	4	156 (95)	16	
Südwest-Alpen 2007	451 (375)	5	136 (93)	14	
Mittelland 2008	605 (860)	6	124 (172)	13	
Voralpen 2009	1168 (603)	12	100 (50)	10	

In den bisher gezeigten Dichtekarten wurden die relativen Verhältnisse dargestellt (10 % Quantile; blau tiefste Werte, rot höchste Werte). Für den Vergleich der absoluten Zugdichten zwischen den Standorten wurden die berechneten Werte in gleich grosse Intervalle eingeteilt. Diesen Dichteklassen werden Absolutwerte zugewiesen (Abb. 20). Dafür werden die mit Radar ermittelten Zugdichten herangezogen (Tab. 2).

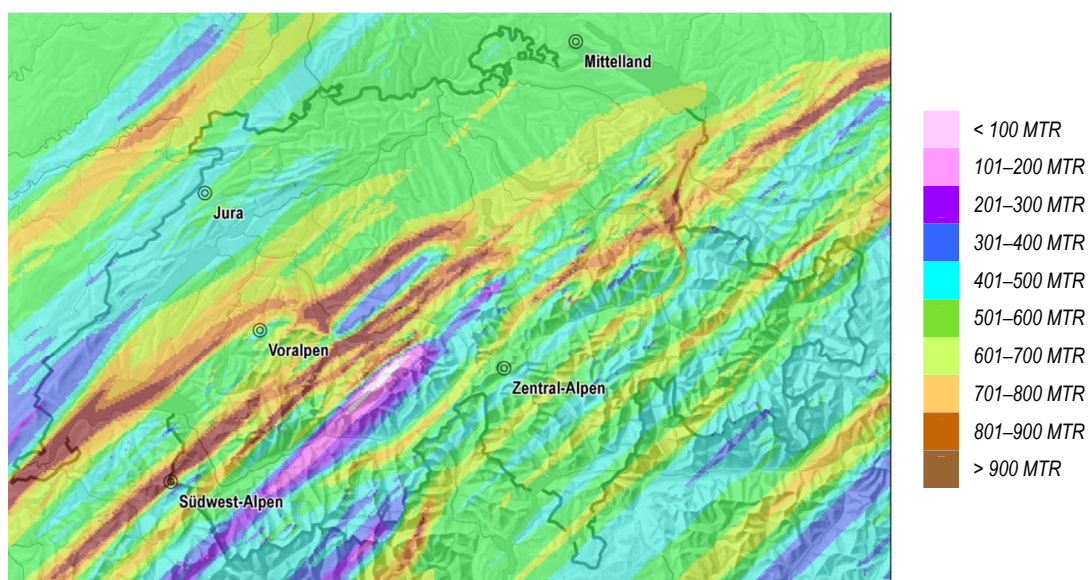


Abb. 20. Zugdichten im Herbst dargestellt als Absolutwerte. Diese Darstellung erlaubt einen direkten Vergleich mit den Resultaten von Radarbeobachtungen (Tab. 2).

Simultan mit der Berechnung der Zugdichten für jede Zelle wird die mittlere Flughöhe berechnet (Abb. 21). Über den Hügeln und Bergen haben die Vögel eine geringe und über den Tälern eine grössere Flughöhe. Deshalb widerspiegelt die Karte der mittleren Flughöhen deutlich die Topografie.

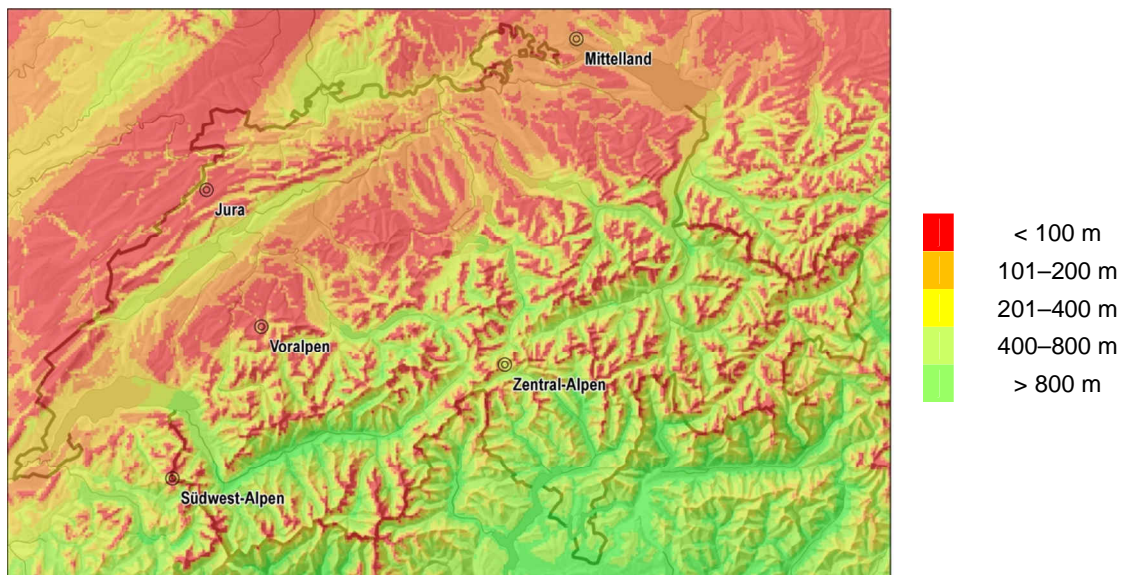


Abb. 21. Mittlere Flughöhe pro Zelle im Herbst, dargestellt als Absolutwerte über Boden. Über topografischen Erhebungen fliegen die Vögel tiefer als über den Tälern, wodurch die Höhenkarte die Topografie der Schweiz deutlich widerspiegelt.

Die mittlere Flughöhe kann als Parameter für die Höhenverteilung der Vögel an einem bestimmten Ort interpretiert werden. Dazu nehmen wir als Vereinfachung eine homogene Höhenverteilung der Zugdichte zwischen 0 m und dem Doppelten der mittleren Flughöhe an. Dies ergibt eine eher konservative Schätzung für die Zugdichte auf tiefen Höhen, weil beobachtete Höhenverteilungen eine abnehmende Dichte mit zunehmender Höhe zeigen (Bruderer & Liechti 2004). Ziel der Simulation ist eine Abschätzung der Anzahl Vögel, welche im Gefahrenbereich der Windturbinen fliegen, also in den untersten 200 m über Boden. Mit Hilfe der der mittleren Flughöhe kann der Anteil der Vögel im Höhenintervall 0–200 m wie folgt berechnet werden:

$$\text{Zugdichte}_{\leq 200\text{m}} = \text{Zugdichte} * \frac{1}{\text{Mittlere Flughöhe}} * 100$$

Dies bedeutet beispielsweise, dass bei einer mittleren Flughöhe von 200 m 50 % der Vögel auf unter 200 m über Boden fliegen, bei einer mittleren Flughöhe von 1000 m sind es 10 %. Mittlere Flughöhen < 100 m werden auf 100 m gesetzt, weil sonst die Zugdichte in der betreffenden Zelle über 100 % betragen würde. Die so berechneten Zugdichten auf den unteren 200 m über Boden werden wiederum als Karte dargestellt. Dafür werden die Dichtewerte in gleich grosse Intervalle eingeteilt und mit Hilfe von Radardaten (Tab. 2) Absolutwerten zugewiesen (Abb. 22).

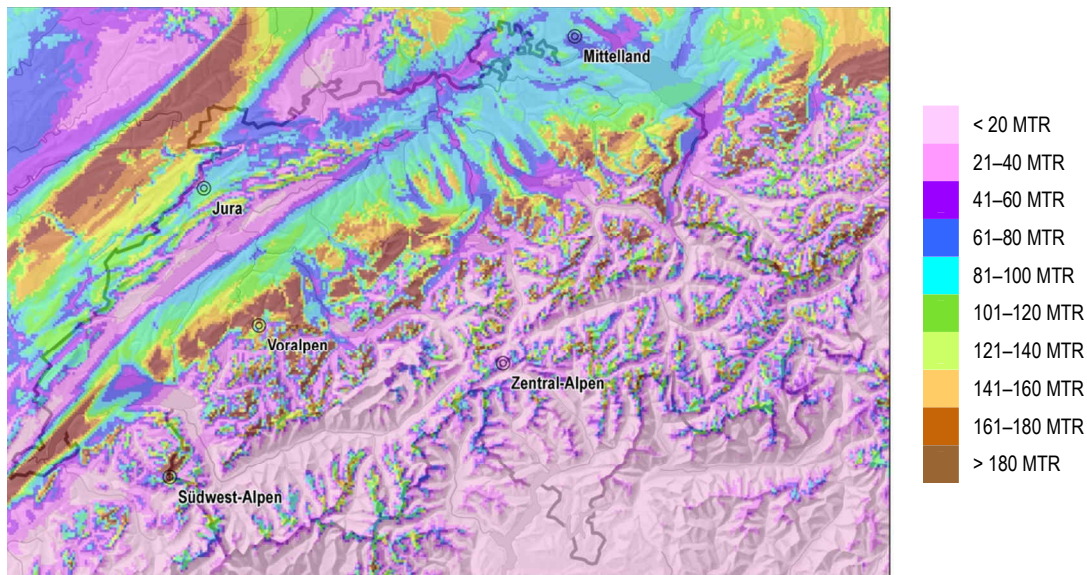


Abb. 22. Zugdichten im Herbst auf den untersten 200 m über Boden. Diese Darstellung erlaubt einen direkten Vergleich mit den Resultaten von Radarbeobachtungen (Tab. 2).

Nun kann überprüft werden, ob die Verhältnisse der Resultate aus der Computersimulation den Verhältnissen entsprechen, die effektiv gemessen wurden. Von Bedeutung sind insbesondere die Dichten auf den untersten 200 m über Boden, weil diese Daten die direkte Basis für die Konfliktpotenzialkarte sind (Abb. 22). Am Standort in den Zentral-Alpen zeigt das Resultat der Computersimulation einen sehr tiefen Wert, welcher den beobachteten Dichten entspricht. Die höchsten Werte resultierten für die Standorte in den Vor- und Südwest-Alpen, die auch gemäss den Feldbeobachtungen mindestens 10fach höher sein sollten. An den Standorten im Jura und im Mittelland werden die Dichten mit der Computersimulation offenbar leicht unterschätzt. Diese Überprüfung ist nur für den Herbst möglich, weil für den Frühling keine entsprechenden Felddaten vorliegen.

4.3 Modellierung Frühling

Das Vorgehen, welches im Kap. 4.2 beschrieben wurde, wurde entsprechend für den Frühling angewandt, wobei allerdings kein Vergleich mit Felddaten möglich war (Abb. 23). Deshalb können wir nur schwer einschätzen, ob die Dichteverhältnisse den realen Vorkommnissen entsprechen. Wir erwarten aber, dass die Zugdichten südlich der Alpen im Frühling höher sind als im Herbst. Die Kanalisierung des Zuges entlang der Jurakette ist aus Expertensicht plausibel. Für das Endresultat dieser Arbeit ist es grundsätzlich von Bedeutung, dass die Simulation für den Frühling einbezogen werden kann, damit das Konfliktpotential im Tessin nicht unterschätzt wird. Entsprechend dem Vorgehen für den Herbstzug, wurden auch für den Frühlingzug die mittleren Flughöhen gerechnet (Abb. 24) und daraus die Zugintensitäten in den untersten 200 m über Boden geschätzt (Abb. 25).

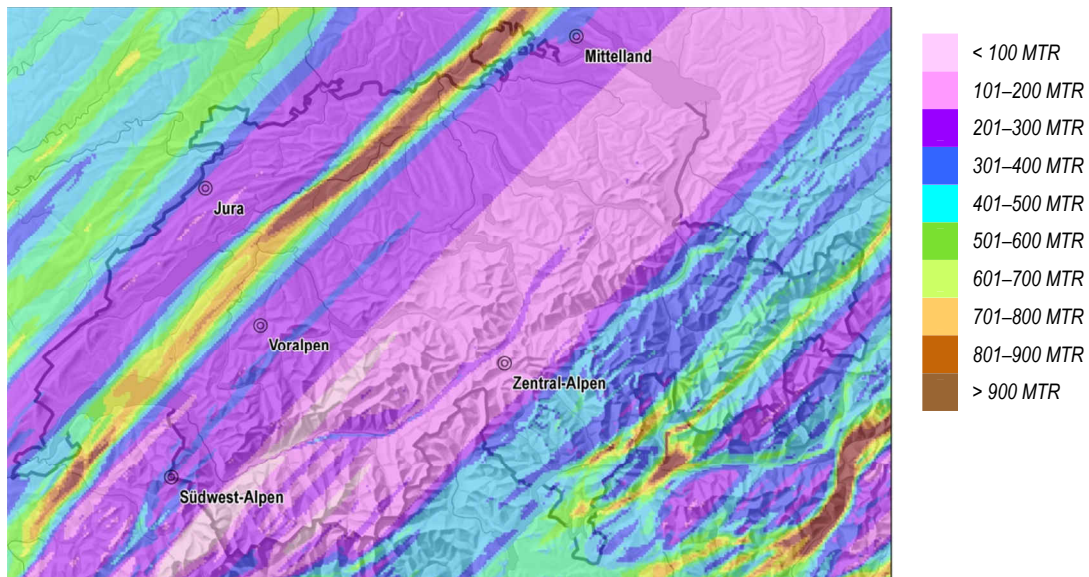


Abb. 23. Zugdichten im Frühling, dargestellt als Absolutwerte, analog zum Vorgehen für den Herbst.

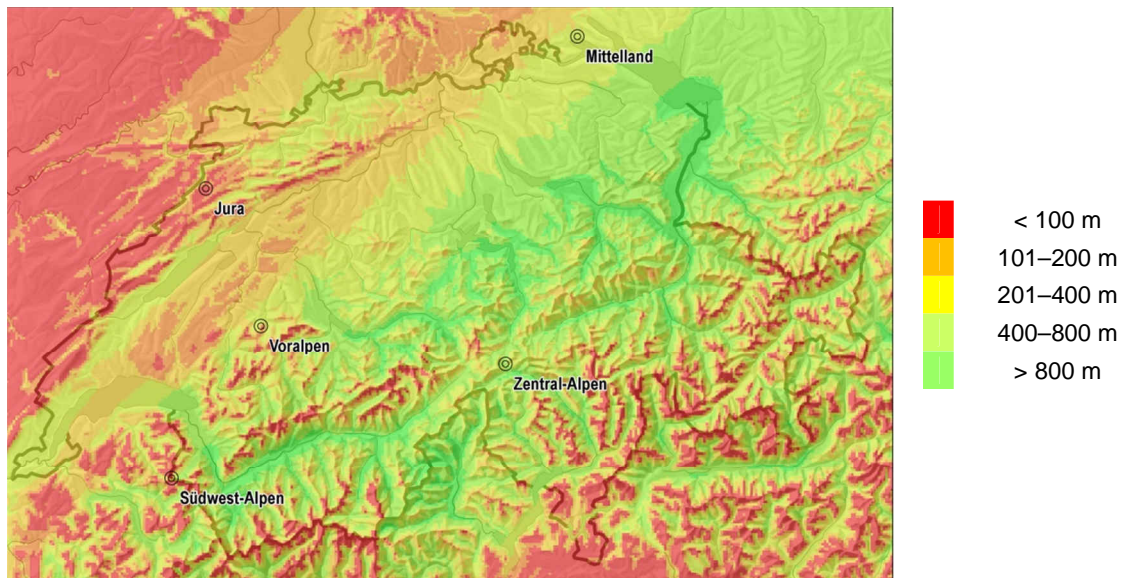


Abb. 24. Mittlere Flughöhe pro Zelle im Frühling, dargestellt als Absolutwerte über Boden. Über topografischen Erhebungen fliegen die Vögel tiefer als über den Tälern, wodurch die Höhenkarte die Topografie der Schweiz deutlich widerspiegelt.

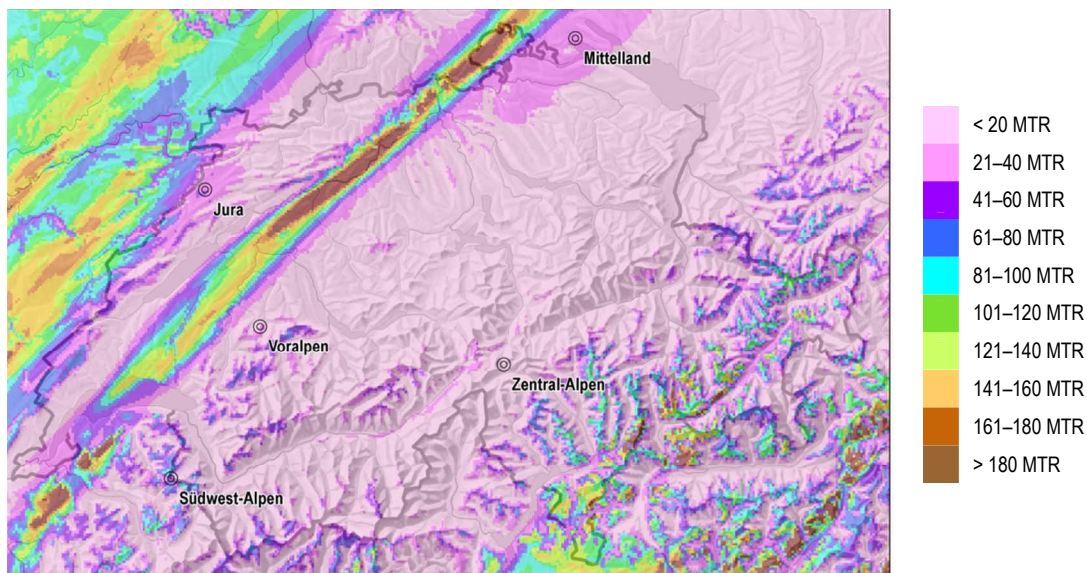


Abb. 25. Zugdichten im Frühling auf den untersten 200 m über Boden. Für eine Kontrolle dieser Computersimulation mit dem effektiven Zuggeschehen fehlen entsprechende Erhebungen.

4.4 Konfliktpotenzialkarte Vogelzug

Die „Konfliktpotenzialkarte Windenergie – Vögel Schweiz: Vogelzug“ beruht auf dem oben beschriebenen Computermodell. Es basiert auf den drei Faktoren Flugverhalten, Topografie und Wind. Sie zeigt die modellierte relative Vogelzugdichte auf, mit der an einem Standort zu rechnen ist. Für die Berechnung einer mittleren Zugdichtekarte wurden die verschiedenen Wetterlagen und ihre Häufigkeiten berücksichtigt. Zudem wurde diese jeweils mit den geschätzten mittleren Zugdichten für die einzelnen Wetterlagen gewichtet. Dies wurde separat für den Herbst und den Frühling durchgeführt und in einem letzten Schritt die Resultate für den Herbst und den Frühling kombiniert (Abb. 26). Die Herbstzugdaten erhielten im Vergleich zum Frühling die doppelte Gewichtung. Im Frühling ist die Vogelpopulation durch die natürliche Mortalität auf dem Zug und im Winterquartier deutlich kleiner als im Herbst, wenn die Population durch die Jungvögel angewachsen ist. Abb. 27 zeigt die durchschnittliche relative Zugintensität in dem für die Windkraftnutzung relevanten Höhenbereich bis 200 m über Boden.

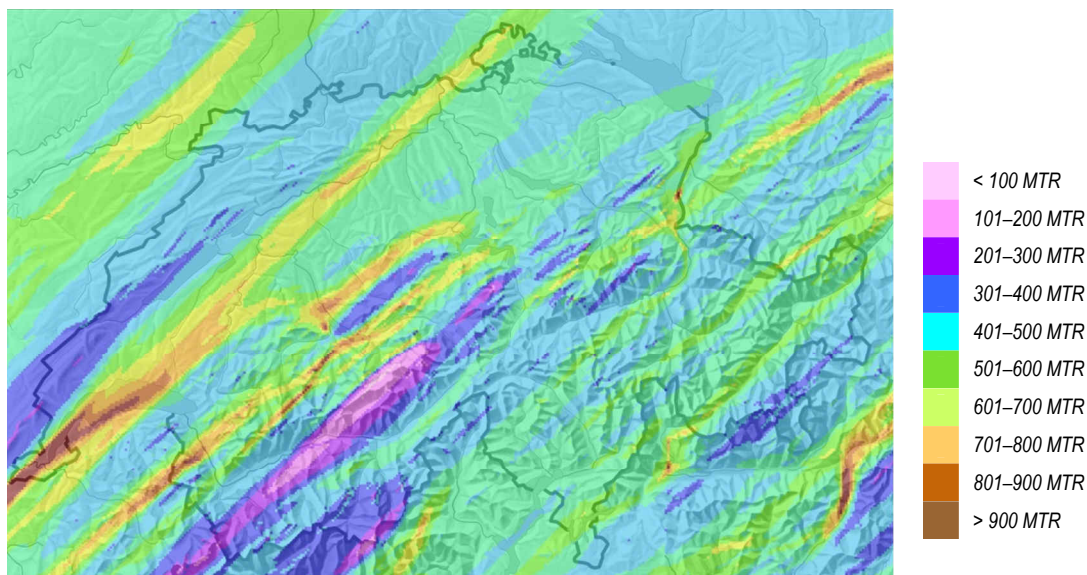


Abb. 26. Modellierte relative Zugdichten für die Schweiz.

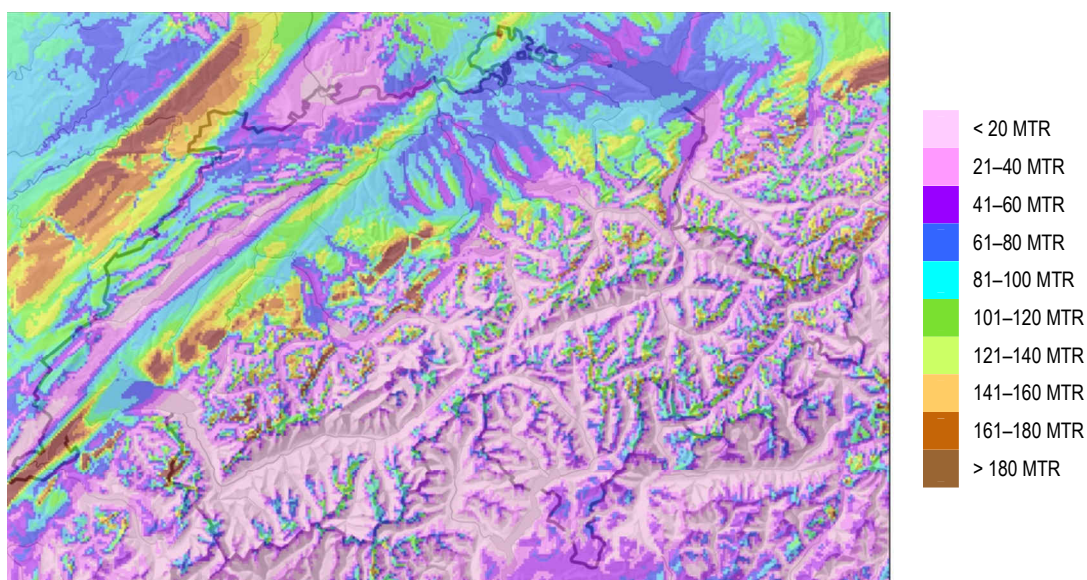
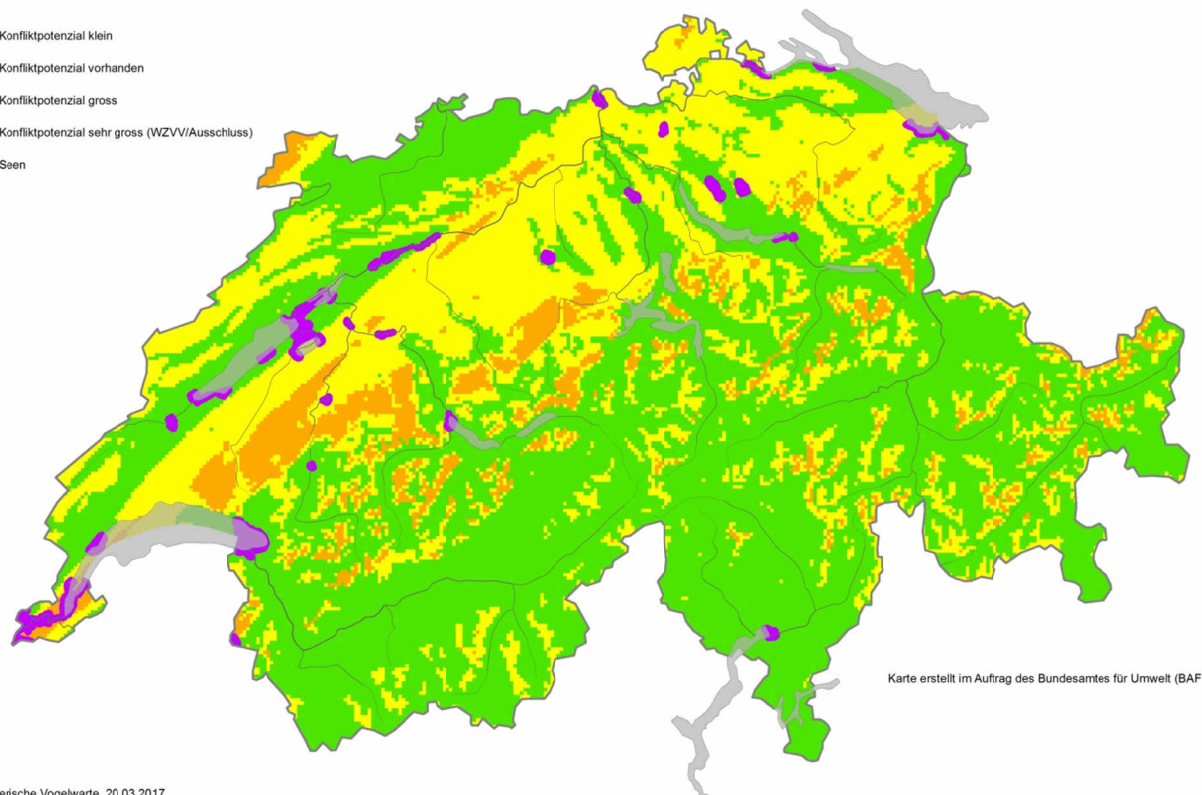
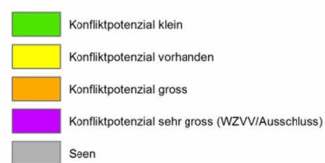


Abb. 27. Modellierte relative Zugdichten für den Höhenbereich bis 200 m über Boden, basierend auf Abb. 26.

Anhand der Validierungsergebnisse wurde den relativen Zugdichten, basierend auf den gemessenen mittleren Zugintensitäten, absolute Werte zugeordnet (MTR, Anzahl Vögel pro km und Stunde). In der daraus resultierenden Karte wurden die Zugintensitäten in drei Risikokategorien zusammengefasst und entsprechend dargestellt (Abb. 28). Für die Einteilung der Risikokategorien wird der Schwellenwert von 50 MTR verwendet, der aufgrund von Schätzungen des potenziellen Kollisionsrisikos festgelegt wurde (siehe Kap. 6.2). Die drei potenziellen Risikokategorien umfassen 1 = Gebiete mit meist geringer Zugintensität (< 50 MTR; grün), 2 = Gebiete mit mittlerer Zugintensität (50 - 100 MTR; gelb), 3 = Gebiete mit hoher Zugintensität (> 100 MTR; orange). Es gilt zu berücksichtigen, dass grundsätzlich in allen Gebieten unter bestimmten Umweltbedingungen hohe Zugkonzentrationen auftreten können. Die Risikokarte gewichtet in erster Linie die Häufigkeit solcher Ereignisse.

Konfliktpotenzialkarte Windenergie - Vögel Schweiz: Teilbereich Vogelzug Aktualisierung 2013



Karte erstellt im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

© Schweizerische Vogelwarte, 20.03.2017

Abb. 28. Konfliktpotenzialkarte Windenergie – Vögel Schweiz: Vogelzug. Die Karte zeigt das mittlere Konfliktpotenzial zwischen Vogelzug und Windenergieanlagen für die Schweiz. Die drei potenziellen Risikokategorien zeigen, grün = geringes Konfliktpotential, gelb = Konfliktpotential mit Abklärungsbedarf, orange = hohes Konfliktpotential. Die digitale Version der Karte kann von www.vogelwarte.ch heruntergeladen werden. Violett dargestellt sind die rechtlich geschützten Vogelschutzgebiete gemäss der Verordnung über die Wasser- und Zugvogelreservate von internationaler und nationaler Bedeutung (WZVV), die bereits auf der Konfliktpotenzialkarte Windenergie – Vögel Schweiz: Teilbereich Brutvögel, Gastvögel und Vogelschutzgebiete gemäss WZVV berücksichtigt worden sind (Horch et al. 2013).

5. Aussagekraft der Karte

Die vorliegende „Konfliktpotenzialkarte Windenergie – Vögel Schweiz: Vogelzug“ ist als eine Vorinformation, d.h. als eine Hilfestellung für eine erste grobe Orientierung im Rahmen der Planung von Windenergieanlagen zu betrachten. Sie zeigt das Ausmass der zu erwartenden Risiken für Zugvögel an einem Standort aus gesamtschweizerischer Sicht. Die Karte wurde 2013 aufgrund einer Unstimmigkeit im Rechenprozess zur Kombination des Frühlings- und Herbstzuges aktualisiert.

Die Karte basiert auf dem aktuellen Stand des Wissens. Zum Ablauf des Vogelzuges in der Schweiz liegen zahlreiche Beobachtungen und Messungen vor. Die Daten von traditionellen Beobachtungsstandorten sind zeitlich oft sehr beschränkt (z.B. Wochenendbeobachtungen) und decken zumindest quantitativ nur einen relativ kleinen Bereich des Zuges ab (< 100 m über Boden). Anhand der wenigen quantitativen Radarmessungen lässt sich der Zusammenhang zwischen Wettersituationen und Zugintensität einschätzen, aber eine verbindliche Aussage über eine Schweiz weite, räumliche Verteilung ist nicht möglich. Aus diesen Gründen wurde die Konfliktpotenzialkarte auf der Basis eines Modells erstellt und die vorhandenen Daten zur Validierung der Modellresultate verwendet.

Die Karte repräsentiert den generellen Ablauf des Vogelzuges durch die Schweiz. Sie zeigt, wo im Höhenbereich von Windenergieanlagen (< 200 m über Boden) mit hohen Zugintensitäten zu rechnen ist und wo der Zug eher schwach sein dürfte. Die Karte ersetzt nicht eine lokale Beurteilung des Konflikts zwischen Zugvögeln und Windenergieanlagen.

5.1 Risikokategorien

Die „Konfliktpotenzialkarte Windenergie – Vögel Schweiz: Vogelzug“ unterscheidet aufgrund des Computermodells drei Risikokategorien (Konfliktpotenzial klein, Konfliktpotenzial vorhanden und Konfliktpotenzial gross). Die Unterteilung basiert auf den geschätzten Zugintensitäten in den untersten 200 m über Boden für einen 1 km² Raster. Die Zugintensitäten in diesem Höhenbereich sind direkt proportional zum potenziellen Kollisionsrisiko (Risikopotenzial) von Zugvögeln mit Windenergieanlagen.

In den grün markierten Gebieten ist mit einer durchschnittlichen Zugintensität von weniger als 50 Vögeln pro km und Stunde zu rechnen (MTR < 50). Es ist zu erwarten, dass bei diesen Zugintensitäten weniger als 10 Kollisionen pro Jahr und Anlage auftreten. In den gelb markierten Gebieten ist mit einer MTR von 50 bis 100 zu rechnen, was 10 bis 20 Kollisionen pro Jahr und Anlage erwarten lässt. In den orange markierten Gebieten ist aufgrund der überdurchschnittlich hohen Zugintensitäten (MTR > 100) mit mehr als 20 Kollisionen pro Anlage und Jahr zu rechnen. Zur Umrechnung von Zugintensitäten auf Kollisionsraten waren verschiedene Annahmen zu treffen, die im Kapitel 6.2. zu Kollisionsrate und Schwellenwertberechnung aufgeführt sind.

Violett dargestellt sind die rechtlich geschützten Vogelschutzgebiete gemäss der Verordnung über die Wasser- und Zugvogelreservate von internationaler und nationaler Bedeutung (WZVV), die bereits auf der *Konfliktpotenzialkarte Windenergie – Vögel Schweiz: Teilbereich Brutvögel, Gastvögel und Vogelschutzgebiete gemäss WZVV* berücksichtigt worden sind (Horch et al. 2013). Die Vogelwarte empfiehlt diese Gebiete von der Nutzung der Windenergie auszuschliessen.

5.2 Interpretation der Ergebnisse

Der Modellansatz und die beschränkte Möglichkeit der Validierung haben zur Folge, dass die Resultate in ihrer räumlichen Darstellung einer gewissen Unsicherheit unterliegen. Auf der einen Seite steht die Komplexität der schweizerischen Topografie, die gepaart mit den vorherrschenden Windsituationen regional und lokal sehr unterschiedliche Auswirkungen auf den Vogelzug haben kann. Um das Modell einfach zu halten, wurden neben der Orografie keine räumlich expliziten Parameter verwendet. Dies hat zur Folge, dass Verhaltensweisen und Wetterbedingungen als genereller Faktor ins Modell

einflussen, d.h. keine regionale oder lokale Differenzierung möglich war. Auf der andern Seite ist das Verhalten der Zugvögel geprägt von der aktuellen Körperverfassung und dem Verlauf des Wetters und nicht zuletzt kann es sich von Art zu Art unterscheiden. Im Modell wurden diese Faktoren stark vereinfacht und generalisiert.

Im Rahmen der Validierung (Kap. 4.2) konnte gezeigt werden, dass die gewählten Parameter ausreichen, um die bisher bekannte Variabilität des Vogelzuges abzubilden. Allerdings wurde klar, dass keine der Parametereinstellung das Zugeschehen für die gesamte Schweiz hinreichend abbilden kann. So ergab sich das Dilemma, dass die Qualität der Modellierungen regional stark variieren. Entweder bilden die Modellsimulationen die Verhältnisse im Mittelland und Jura gut ab und jene in den Alpen eher schlecht, oder umgekehrt. Im Alpenraum ist die Modellierung generell schwieriger, da die wesentlich komplexere Orografie auch ein entsprechend komplexeres Flugverhalten erwarten lässt. Es sind hier regional und lokal bedeutende Abweichungen möglich. Vor allem für die Parameter, die die Sichtweite und die Verdriftung durch den Wind charakterisieren, ist zu erwarten, dass durch eine Regionalisierung (d.h. räumlich unterschiedliche Parameterwerte) eine wesentliche Verbesserung erreicht werden könnte. Einerseits können lokale Winde stark von der generellen Windsituation abweichen, andererseits lässt sich bei einer räumlichen Auflösung von 1 km² die reale Situation in den engen Tälern und Passübergängen nur beschränkt abbilden.

Für die Gewichtung der Resultate, die in der finalen Konfliktpotenzialkarte zusammengefasst wurden, haben wir den Verhältnissen im Mittelland, dem Jura und entlang des Alpennordrandes mehr Bedeutung zugestanden, da diese Regionen verlässlicher zu modellieren waren als der Bereich der Alpen. Unsere Modellresultate stehen im Einklang mit den Felderhebungen, die gezeigt haben, dass an verschiedenen für intensiven Vogelzug bekannte Standorte (v.a. Orte entlang des Alpennordrandes wie z.B. Gurnigel, Hahnenmoospass, Col de Jaman, Col de Bretolet) ein erhebliches Kollisionspotenzial zu erwarten ist. Die Aussagekraft der Karte im Rahmen von Voruntersuchungen im Alpenraum ist daher beschränkt und muss mit genaueren lokalen Abklärungen kompensiert werden.

Die Karte basiert auf dem Flugverhalten der Schlagflieger, d.h. von Zugvögeln, die aktiv fliegen und nicht wie Segelflieger auf Aufwinde angewiesen sind. Die Erfahrungen von Feldbeobachtungen zeigen aber, dass an Konzentrationspunkten von Segelfliegern in der Regel auch ein starker Zug von Schlagfliegern (meist Kleinvögel) beobachtet werden kann. Es ist daher zu erwarten, dass bis zu einem gewissen Grade auch der Zug der Segelflieger einigermaßen durch die Karte repräsentiert wird. Für diese Gruppe gilt aber die oben erwähnte notwendige Einschränkung bezüglich einer lokalen Beurteilung in ganz besonderem Masse.

Empfehlung zu den Risikokategorien der Computermodellierung (grün, gelb, orange)

Wir erachten die Anzahl von bis zu 10 Kollisionen pro Jahr und Anlage in Bezug auf den Vogelzug und die davon betroffenen Arten und Populationen als vorläufig vertretbar. Dabei gehen wir davon aus, dass in der Schweiz die Zahl von 1000 Anlagen nicht überschritten wird und gefährdete Arten nicht überproportional betroffen sind. Wir sind der Meinung, dass an Standorten mit erheblichen Zugkonzentrationen (Risikokategorie gelb und orange) das Aufstellen von Windenergieanlagen nur in Zusammenhang mit direkten, kollisionsvermeidenden Massnahmen, konkret durch Abstellen der Anlagen in Zeiten hoher Zugaktivitäten, in Frage kommen kann. Wir schlagen vor, dass Windkraftprojekte in Gebieten mit hoher Zugintensität (orange Gebiete) vorerst zurückgestellt werden, bis genauere Informationen über den Zusammenhang zwischen Zugintensität und Kollisionsraten vorliegen. Insbesondere sind im Alpenraum zusätzliche lokale Abklärungen notwendig.

6. Massnahmen

Kollisionsopfer lassen sich mit keiner Massnahme vollständig vermeiden. Im Zusammenhang mit dem Vogelzug, lässt sich aber durch eine geschickte Wahl der Betriebszeiten das Risikopotenzial von Kollisionsopfern massiv senken.

Eine erhebliche Entschärfung des potenziellen Konfliktes zwischen Windenergieanlagen und Vögeln kann erreicht werden, wenn es gelingt, die Nutzung der Windenergieanlagen und die Zugaktivität der Vögel zu entflechten. Da Vogelzug praktisch flächendeckend auftritt, lässt sich eine räumliche Trennung zwischen Vogelzug und Windkraftnutzung nur sehr beschränkt realisieren. Eine bessere Entflechtung kann auf der Zeitachse erreicht werden, wenn Ort und Zeit von hohen Zugvogelkonzentrationen bekannt sind. Da stillstehende Rotoren für ziehende Vögel eine deutlich verminderte Kollisionsgefahr darstellen, kann mit einer zeitlich begrenzten Abschaltung einzelner Windenergieanlagen eine erhebliche Reduktion des Gefährdungspotenzials erreicht werden.

So wissen wir aus Messungen im Rahmen unserer Forschungsarbeit, dass an einem Ort mit bekannt hoher Zugintensität auf dem Herbstzug 20 % der Zugvögel im Höhenbereich von potenziellen Windenergieanlagen fliegen. Davon verteilen sich 50 % dieser Vögel auf knapp 200 Stunden. Das bedeutet, dass mit entsprechender Kenntnis des zeitlichen Auftretens von Zugvogelkonzentrationen im Bereich von Windturbinen und der Bereitschaft der Betreiber, diese während Perioden mit hoher Zugkonzentration abzustellen, ein erheblicher Beitrag zur Reduktion des Gefährdungspotential geleistet werden kann.

Um dies zu erreichen, braucht es eine möglichst lokale, kontinuierliche Überwachung des Vogelzuges. Dies kann z.B. ein relativ einfaches, auf Vögel ausgerichtetes, autonomes Radarsystem leisten. Somit kann bei intensivem Zugeschehen die Windenergieanlagen ortsspezifisch und zeitgerecht abgestellt werden. Um solche Abschaltperioden zu definieren, braucht es einen Schwellenwert. Die Festlegung des Schwellenwertes hat nach dem Vorsorgeprinzip zu erfolgen. Er sollte unseres Erachtens und mit dem jetzigen Wissenstand im Bereich von 50 Vögeln pro Stunde und Kilometer liegen. (siehe Kap. 6.2. Kollisionsrate und Schwellenwertberechnung). Ein solches Abschaltregime muss bereits bei einer Betriebsbewilligung verankert und durch eine Wirkungskontrolle überwacht werden. Die Wirkungskontrolle ist von grosser Bedeutung, da noch keine direkten Vergleichsmessungen zu Zugintensitäten und Schlagopferzahlen vorliegen. Erst regelmässige Überprüfung der Wirkung erlaubt die Anpassung des Schwellenwertes an die tatsächlichen Gegebenheiten.

Wirkungskontrolle

Eine Kontrolle der Wirkung von Betriebseinschränkungen (abschalten) ist v.a. in den ersten Jahren nach dem Bau von grosser Bedeutung. Die von uns getroffenen Annahmen und Schätzungen zur Bestimmung eines Schwellenwertes (Kap. 6.2) bedürfen der Überprüfung. Wir erachten unsere Schätzungen bezüglich der Kollisionsopfer als vorsichtig und zu Gunsten des Schutzes der Zugvögel. Es ist daher möglich, dass aufgrund kommender, neuer Erkenntnisse eine Schwellenwertanpassung nach oben erfolgen kann und somit weitere Standorte auch bei Berücksichtigung des Vogelschutzes wirtschaftlich betrieben werden können. Mit Hilfe der Wirkungskontrolle kann das System verbessert und die Abschaltzeiten optimiert werden.

6.1 Überwachung des Vogelzuges

Eine lokale, kontinuierliche und automatische Überwachung lässt sich heute technisch mit einem vertretbaren Aufwand bewerkstelligen. Ziel einer solchen Überwachung ist die Messung der Intensität des Vogelzuges im Bereich eines Windparks und nicht die Überwachung jeglicher Vogelbewegungen im Bereich der Anlagen. Die Überwachung liefert die Datengrundlagen für ein Abschaltssystem. Ein Abschaltssystem basiert auf einem Schwellenwert, der darauf abzielt, Kollisionen zu reduzieren und nicht, diese vollständig zu vermeiden. Dafür genügt es, wenn für den entsprechenden Standort eine reprä-

sentative Stichprobe gemessen wird. Bereits heute sind an verschiedenen Windkraftstandorten Radargeräte zur Überwachung des Vogelzuges installiert (z.B. Spanien, Schwarzmeerküste).

6.2 Kollisionsrate und Schwellenwertberechnung

Als Massnahme zur Reduktion des Konflikts zwischen Vogelzug und Windenergieanlagen sollen die Windturbinen während Zeiten mit starkem Zug abgeschaltet werden. Dazu muss ein Schwellenwert definiert werden, der festlegt, bei welcher Zugintensität abgeschaltet werden soll. Untersuchungen zum direkten Zusammenhang zwischen Zugintensität und Kollisionsopfer liegen nicht vor.

Als Grundlagen für die Bestimmung dieses Schwellenwertes untersuchten wir anhand von Radarmessungen an fünf verschiedenen Standorten in der Schweiz und am Bodensee (BRD), mit welcher Häufigkeit eine bestimmte Zugintensität (Schwellenwert) überschritten bzw. unterschritten wird. Für jeden dieser Schwellenwerte wurde berechnet, wie gross die zu erwartenden Ausfallzeiten (durch abschalten) und das verbleibende Risikopotenzial (max. mögliche Kollisionen) im Jahresmittel ist (Abb. 29). Die Messungen umfassen im Herbst insgesamt 365 Tage von fünf Standorten (Bodensee, Jura, Gotthard, Freiburger Alpenrand, Walliser Alpen) und im Frühling 170 Tage von zwei Standorten (Jura, Gotthard). Die Messungen wurden kontinuierlich während dem Tag und der Nacht durchgeführt. Für jeden Standort wurde die Zugintensität im Höhenintervall unter 200 m über Boden über eine Zeit von jeweils drei Stunden gemittelt. Basierend auf diesen 3-Std.-Mittelwerten wurde die Häufigkeit der Schwellenwertüberschreitung im Verlauf der Messperiode berechnet. Für die Umrechnung auf das ganze Jahr wurde von einer Zugperiode von 200 Tagen (Frühling und Herbst) ausgegangen.

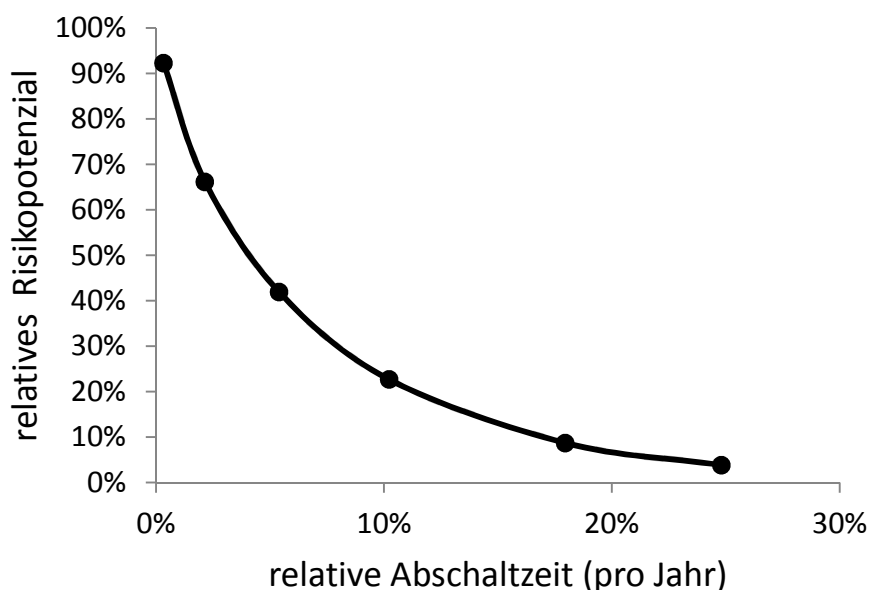


Abb. 29: Beziehung zwischen dem geschätzten Risikopotenzial und der zu erwartenden Abschaltzeit basierend auf fünf Radar-Messstandorten (zur Berechnungsbasis der Kurve s. Text).

Für die Berechnung des Risikopotenzials wurde die Annahme getroffen, dass die Vögel den Anlagen nicht ausweichen und, dass die Rotorgeschwindigkeit keinen Einfluss auf die Kollisionsrate hat. Allerdings wurde angenommen, dass stillstehenden Anlagen kein Kollisionsrisiko darstellen. Aus der mittleren Zugintensität in den untersten 200 m über Boden und der durch die Rotorblätter einer Anlage abgedeckte Fläche (hier verwendeter Wert von 575 m^2), wurde das Risikopotenzial berechnet. Mit abnehmendem Schwellenwert reduziert sich das Risikopotenzial (Abb. 30). Wird z.B. bei einer Zuginten-

sität von 10 MTR (Vögeln pro Stunde und Kilometer) abgestellt, so können 97 % aller Kollisionen vermieden werden. Wird der Schwellenwert auf über 100 MTR gesetzt, können weniger als 50 % der Kollisionen vermieden werden.

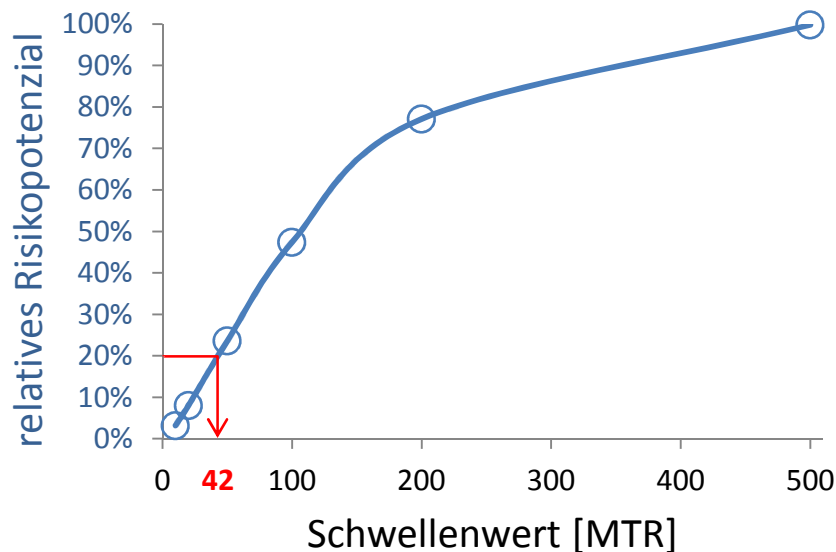


Abb. 30. Die Kurve zeigt die Zunahme des potenziellen Kollisionsrisikos in Abhängigkeit eines hypothetischen Schwellenwerts basierend auf der aktuellen Zugintensität. Beim Erreichen des Schwellenwertes würden die Windturbinen im Messbereich (lokal) abgestellt. Der Schwellenwert bezeichnet die Zugintensität mit der Anzahl Vögel pro Stunde und Kilometer, im Höhenbereich bis 200 m über Boden (MTR=migration traffic rate). Bei einem Schwellenwert von 42 MTR (rot) könnten 80 % der Kollisionen vermieden werden (zur Berechnungsbasis der Kurve s. Text).

In absoluten Zahlen bedeutet dies, dass bei einem Schwellenwert von 50 MTR (Vögel pro Stunde und Kilometer) ca. 100 Vögel einem theoretischen Kollisionsrisiko ausgesetzt sind. Aufgrund empirischer Beobachtungen und wenigen Messungen an Seevögeln gehen wir davon aus, dass mindestens 90 % der Vögel, die theoretisch kollidieren könnten, dem Hindernis klein- oder grossräumig ausweichen (z.B. Desholm 2006). Daraus resultiert bei einem Schwellenwert von 50 MTR eine zu erwartende Kollisionsrate von 10 Vögeln pro Jahr und Anlage (Abb. 31). Wir erachten diese Anzahl von Kollisionen in Bezug auf den Vogelzug und die davon betroffenen Arten und Populationen als vorläufig vertretbar. Dabei gehen wir davon aus, dass in der Schweiz die Zahl von 1000 Anlagen nicht überschritten wird und gefährdete Arten nicht überproportional betroffen sind. Der vorgeschlagene Schwellenwert zielt darauf, dass die durch Windenergieanlagen verursachten zusätzlichen Kollisionen zu keiner merklichen Zunahme der heute bereits durch andere menschliche Tätigkeiten verursachten Kollisionen (Verkehr, Gebäude) führt. Basierend auf unseren Messdaten an den oben erwähnten Standorten würde dies für den Betrieb von Windenergieanlagen eine durchschnittliche Beschränkung der Betriebszeiten von 12 % bedeuten. Nach unserer Einschätzung umfassen die für diese Mittelwertberechnung einbezogenen Untersuchungen in der Mehrheit Standorte mit durchschnittlichem bis überdurchschnittlichem Zugvolumen. Der in Abb. 31 dargestellte generelle Zusammenhang zwischen Risikopotenzial und Abschaltzeit ist daher eher konservativ, d.h. die Abschaltzeiten dürften im gesamtschweizerischen Mittelwert vermutlich tiefer zu stehen kommen.

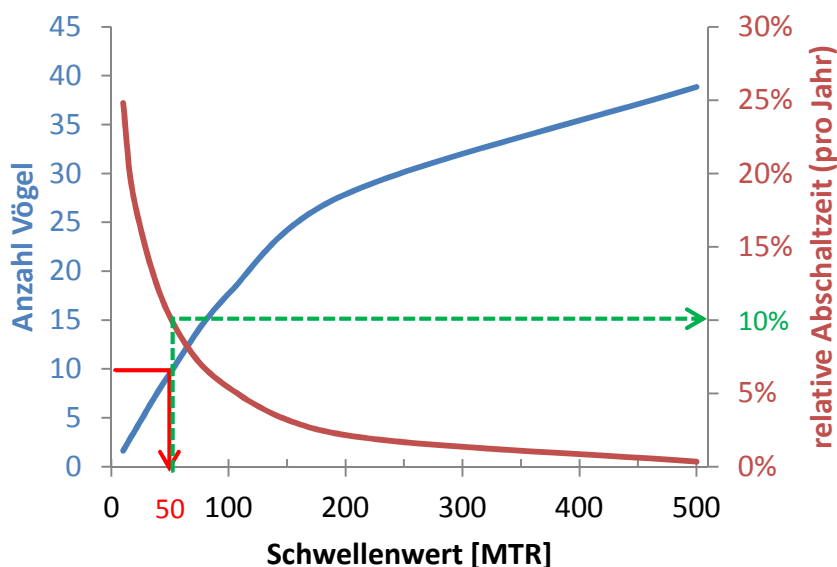


Abb. 31. Die blaue Kurve zeigt die geschätzten absoluten Kollisionen pro Jahr an einer einzelnen Windenergieanlage in Abhängigkeit eines hypothetischen Schwellenwertes, der festlegt bei welcher Zugintensität eine Anlage abgestellt wird. Die rote Kurve zeigt das Ausmass der zu erwartenden zeitlichen Betriebseinschränkung (Abschaltzeit) pro Jahr. Beim vorgeschlagenen Schwellenwert von 50 MTR betragen die durchschnittlich zu erwartenden Kollisionen 10 Vögel pro Anlage und Jahr und eine durchschnittliche Betriebseinschränkung von 10 % (zur Berechnungsbasis der Kurve s. Text).

Wie gross die Unterschiede zwischen einzelnen Standorten im Kollisionsrisiko und den Abschaltzeiten sind zeigt Abb. 32 für die fünf einbezogenen Standorte. Für drei Standorte wurden die Resultate aus dem Herbst auf den Frühling extrapoliert, da keine Frühlingmessungen vorliegen. Dies dürfte sich in einer leichten Überschätzung der Kollisionen und Abschaltzeiten auswirken.

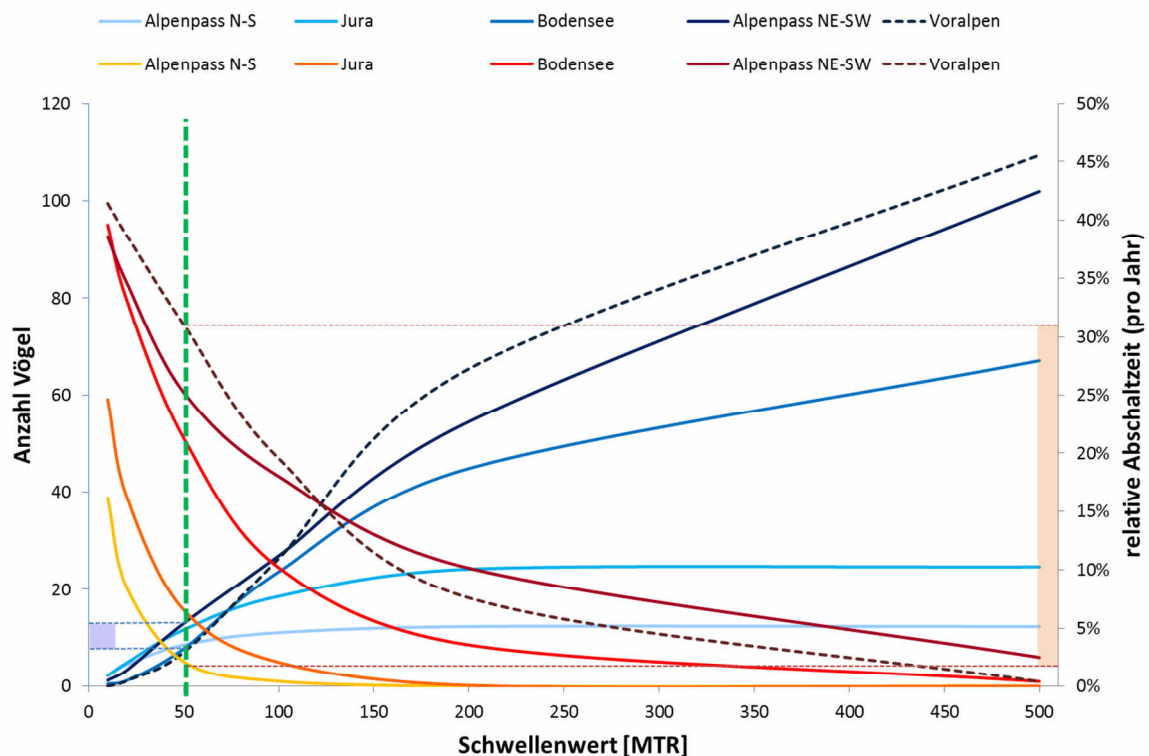


Abb. 32: Schätzung des jährlichen Risikopotenzials (blaue Kurven) und die jährlich zu erwartende relative Betriebseinschränkungen (gelb/rote Kurven) in Abhängigkeit des Schwellenwertes für die fünf untersuchten Standorte (basierend auf insgesamt 535 Messtagen). Das bläuliche Feld an der linken y-Achse markiert den Bereich der zu erwartenden Kollisionen pro Anlage und Jahr, wenn die Anlage beim Überschreiten des Schwellenwertes von 50 MTR (Vögel pro Stunde und Kilometer) abgestellt wird. Das rötliche Feld an der rechten y-Achse markiert den Bereich der zu erwartenden Abschaltzeiten pro Anlage und Jahr beim entsprechenden Schwellenwert von 50 MTR.

Die Berechnungen zeigen, dass z.B. bei einem Schwellenwert von 50 MTR (Zugvögel pro Stunde und Kilometer) die Abschaltzeiten an den untersuchten Standorten zwischen 2 % und 31 % liegen würden, während der entsprechenden Bereich für die erwarteten Kollisionen zwischen 8 und 13 Vögel pro Anlage und Jahr liegen würde. In der Praxis würde das dazu führen, dass an einem Standort mit mässigem Vogelzug die Summe der Abschaltzeiten etwa 250 Stunden pro Jahr ausmachen würden (z.B. 150 Stunden im Herbst und 100 Stunden im Frühling).

Die hier gezeigten Abschaltzeiten basieren auf Tage mit intensivem Zug in Bodennähe. Dieser ist meist gekoppelt mit schwachem Gegenwind. Bei Rückenwind ziehen die Vögel eher hoch und bei starkem Gegenwind (> 5 m/s) sind meist nur wenige Vögel unterwegs (Erni et al. 2002). Daher dürften die aus den Abschaltzeiten resultierenden Ertragsverluste bedeutend tiefer liegen.

Folgende Punkte sind bei der Interpretation der Schätzungsergebnisse zu beachten:

- das tatsächliche Ausweichverhalten der Vögel (v.a. im Nachtzug) ist unbekannt
→ Reduktion oder Erhöhung des Kollisionsrisikos
- die Rotation der Windräder wurde nicht berücksichtigt
→ Erhöhung der Vogelsterblichkeit durch Druckunterschiede und Luftturbulenzen
→ Reduktion des Kollisionsrisikos, wenn Vögel erfolgreich zwischen den Rotorblättern hindurch fliegen können

- ein Kollisionsrisiko mit stillstehenden Anlagen wurde nicht berücksichtigt
→ Erhöhung des Kollisionsrisikos
- Starker Vogelzug findet mehrheitlich bei Schwachwindsituationen statt
→ Reduktion des Ertragsverlust

Basierend auf diesen Ergebnissen wurden die Risikokategorien für die „Konfliktpotenzialkarte Windenergie – Vögel Schweiz: Vogelzug“ bestimmt (Kap. 5.1.)

7. Blick in die Zukunft

Die Schweizerische Vogelwarte möchte im Sinne einer vorsorglichen Massnahme den bestehenden Konflikt dadurch entschärfen, dass Standorte mit generell erheblichem Zugaufkommen wenn immer möglich nicht für Windenergieprojekt genutzt werden und, dass an möglichst allen Windkraftstandorten bei hohen Zugdichten die Windenergieanlagen abgestellt werden. Um die Abschaltzeiten möglichst kurz und die Kollisionsgefahr möglichst klein zu halten, wäre es notwendig, eine räumlich und zeitlich möglichst exakte nationale Vogelzugvorhersage zu erstellen. Als Alternative kann aber auch eine lokale und automatische Überwachung des Vogelzuges im Bereich der Windenergieanlagen eingerichtet werden, die es erlaubt den Vogelzug in Echtzeit zu messen und die Anlagen bei starkem Zugaufkommen abzuschalten. Sollte es gelingen, mit Hilfe solcher lokalen Überwachungsanlagen kontinuierliche Vogelzugmessungen zu realisieren, könnte für den Rest der Schweiz eine dynamische Prognose des Kollisionsrisikos – basierend auf der lokalen Zugintensität und Höhenverteilung der Vögel – entwickelt und eingerichtet werden. Notwendige Komponenten sind Modelle, Prognosen und aktuelle Messungen des Wetters und des Vogelzuges. Unser Ziel ist, für jeden möglichen Standort angeben zu können, um wie viel das Gefährdungspotential reduziert werden kann, wenn zu den Zeiten hoher Zugintensität der Betrieb der Windenergieanlagen eingeschränkt wird.

Ein solches kontinuierliches Überwachungssystem des Vogelzuges ist nicht nur im Zusammenhang mit der Nutzung von Windenergie von Bedeutung. Auch im Bereich der Luftfahrt (zivil und militärisch) besteht ein Interesse an Informationen zum Auftreten von Vogelkonzentrationen. Damit können geeignete Massnahmen ergriffen werden, um Kollisionen von Flugzeugen mit Vögeln zu minimieren. Zudem sind diese Überwachungsdaten auch von wissenschaftlichem Interesse, die im Rahmen der Entwicklung der Biodiversität von erheblicher Bedeutung sein können (z.B. Erkennen von Klimaeffekten). Der vorliegende Bericht präsentiert die Resultate des ersten Schrittes hin zu einer Vogelzugprognose, die mit Messdaten aktualisiert, laufend angepasst und verbessert werden kann, wie dies für Wetterprognosen längst möglich ist.

8. Literatur

- Baumgartner, M. & B. Bruderer (1985): Radarbeobachtungen über die Richtungen des nächtlichen Vogelzuges am nördlichen Alpenrand. *Ornithol. Beob.* 82: 207–230.
- Bruderer, B. (1996): Vogelzugforschung im Bereich der Alpen 1980–1995. *Ornithol. Beob.* 93: 119–130.
- Bruderer, B. & F. Liechti (1990): Richtungsverhalten nachziehender Vögel in Süddeutschland und der Schweiz unter besonderer Berücksichtigung des Windeinflusses. *Ornithol. Beob.* 87: 271–293.
- Bruderer, B. & F. Liechti (1998): Intensität, Höhe und Richtung von Tag- und Nachtzug im Herbst über Südwestdeutschland. *Ornithol. Beob.* 95: 113–28.
- Bruderer, B. & F. Liechti (2004): Welcher Anteil ziehender Vögel fliegt im Höhenbereich von Windturbinen? *Ornithol. Beob.* 101: 327–35.
- Bruderer, B., L.G. Underhill & F. Liechti (1995): Altitude choice by night migrants in a desert area predicted by meteorological factors: *Ibis* 137: 44–55.
- Desholm, M. (2006): Wind farm related mortality among avian migrants - a remote sensing study and model analysis. Dissertation Univ. Kopenhagen.
- Erni, B., F. Liechti, L. Underhill, & B. Bruderer (2002): Wind and rain govern the intensity of nocturnal bird migration in central Europe – a log-linear regression analysis. *Ardea* 90: 155–166.
- Horch, P., H. Schmid, J. Guélat & F. Liechti (2013): Konfliktpotenzialkarte Windenergie – Vögel Schweiz: Teilbereich Brutvögel, Gastvögel und Vogelschutzgebiete gemäss WZVV. Erläuterungsbericht. Aktualisierung 2013. Schweizerische Vogelwarte, Sempach.
- Liechti, F. & B. Bruderer (1986): Einfluss der lokalen Topographie auf nächtlich ziehende Vögel nach Radarstudien am Alpenrand. *Ornithol. Beob.* 83: 35–66.
- Liechti, F., D. Peter, R. Lardelli, & B. Bruderer (1996a): Die Alpen, ein Hindernis im nächtlichen Breitfrontzug – eine grossräumige Übersicht nach Mondbeobachtungen. *J. Ornithol.* 137: 337–356.
- Liechti, F., D. Peter, R. Lardelli & B. Bruderer (1996b): Herbstlicher Vogelzug im Alpenraum nach Mondbeobachtungen – Topographie und Wind beeinflussen den Zugverlauf. *Ornithol. Beob.* 93: 131–152.
- Liechti, F. (2006): Birds: Blowin' by the wind. *J. Ornithol.* 147: 102–111.
- Mateos, M. & F. Liechti (2011): How do diurnal long-distance migrants select flight altitude in relation to wind? *Behav. Ecol.* 23: 403–409.
- R Development Core Team (2011): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- USGS (1996): GTOPO30
URL http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/GTOPO30
- Zehnder, S., F. Liechti, B. Trösch & B. Bruderer (2001): Gibt es topographie-unabhängigen Nachtzug über den Alpen? *Ornithol. Beob.* 98: 215–222.

Anhang A

Richtungsverteilung von Zugvögeln unter verschiedenen Windbedingungen. Die Anteile in den acht Sektoren wurden entsprechend der Abb. 8 in Bruderer & Liechti (1990) geschätzt. Als Basisrichtung der Zugvögel wurden 225° angenommen und die Windsituation in vier Kategorien gruppiert. Rx entspricht den Positionen in der Richtungsmatrix (vgl. 2.4; Modellparameter directionWeights).

		NW	N	NE	W	-	E	SW	S	SE
		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	Z	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈
Gegenwind	< 5 m/s	0,010	0,250	0,577	0,001	NA	0,150	0,001	0,001	0,010
	5–10 m/s	0,010	0,141	0,307	0,001	NA	0,300	0,001	0,010	0,230
	10–20 m/s	0,001	0,001	0,010	0,001	NA	0,150	0,010	0,350	0,477
Seitenwind NW	< 5 m/s	0,001	0,184	0,630	1E-21	NA	0,184	1E-21	1E-21	0,001
	< 5 m/s	0,010	0,150	0,677	0,001	NA	0,150	0,001	0,001	0,010
	5–10 m/s	0,010	0,010	0,477	0,001	NA	0,470	0,001	0,001	0,030
	10–20 m/s	0,001	0,010	0,150	0,001	NA	0,677	0,001	0,010	0,150
Rückenwind	< 5 m/s	0,010	0,200	0,577	0,001	NA	0,200	0,001	0,001	0,010
	5–10 m/s	0,010	0,140	0,700	0,001	NA	0,137	0,001	0,001	0,010
	10–20 m/s	0,001	0,086	0,600	0,001	NA	0,300	0,001	0,001	0,010
Seitenwind SO	< 5 m/s	0,010	0,350	0,477	1E-21	NA	0,172	1E-21	1E-21	0,001
	< 5 m/s	0,010	0,350	0,477	0,001	NA	0,159	0,001	0,001	0,001
	5–10 m/s	0,120	0,450	0,387	0,010	NA	0,030	0,001	0,001	0,001
	10–20 m/s	0,100	0,777	0,100	0,010	NA	0,010	0,001	0,001	0,001

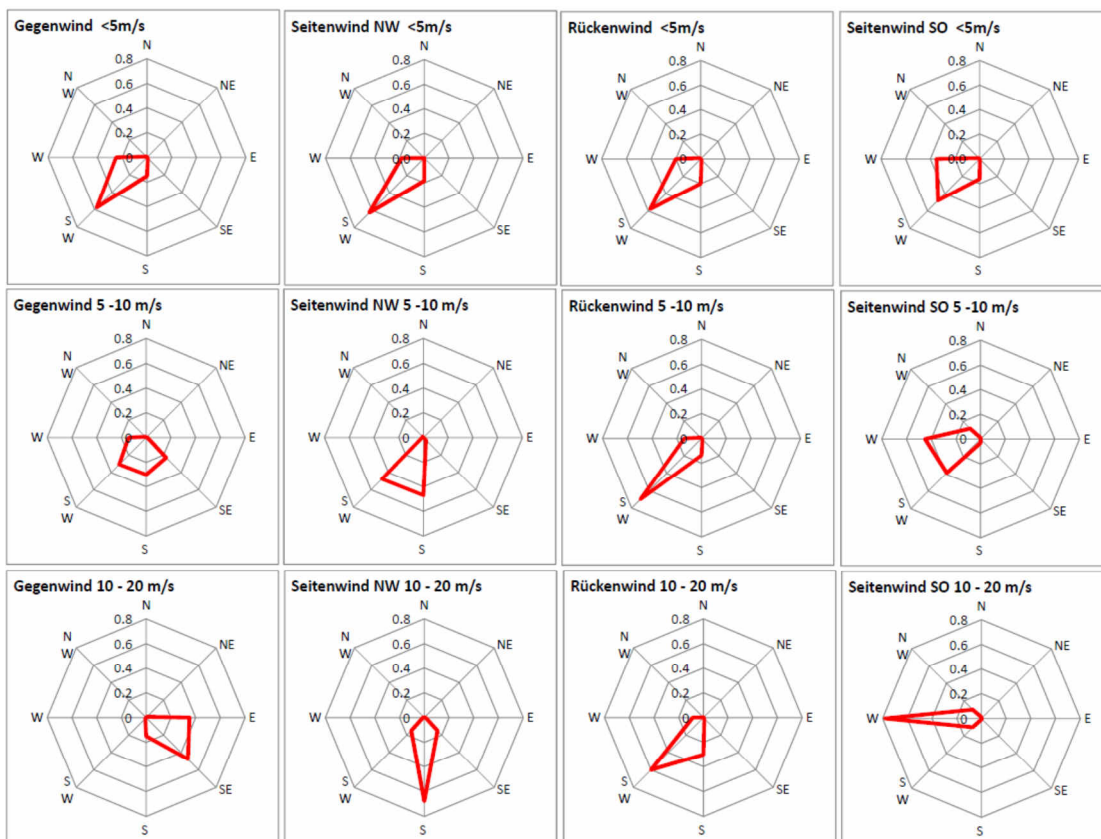


Abb. A1. Grafische Darstellung der Modellparameter aus der obenstehenden Tabelle.

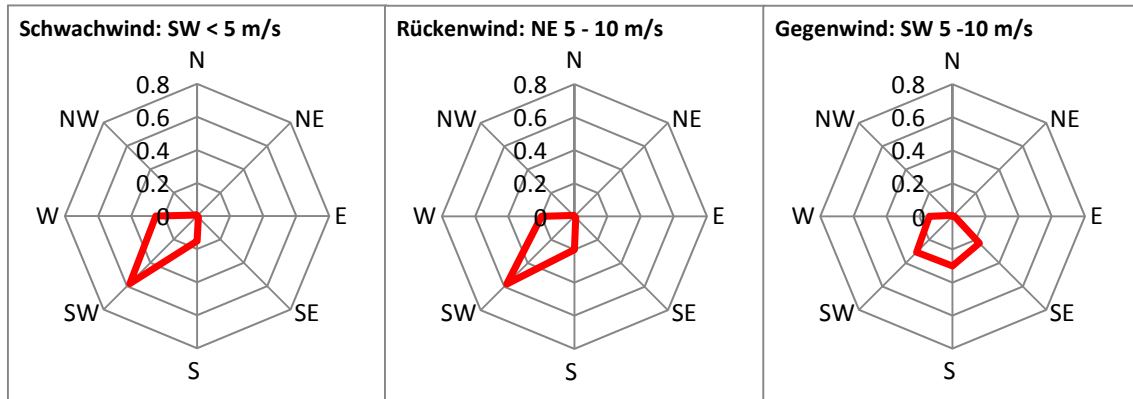
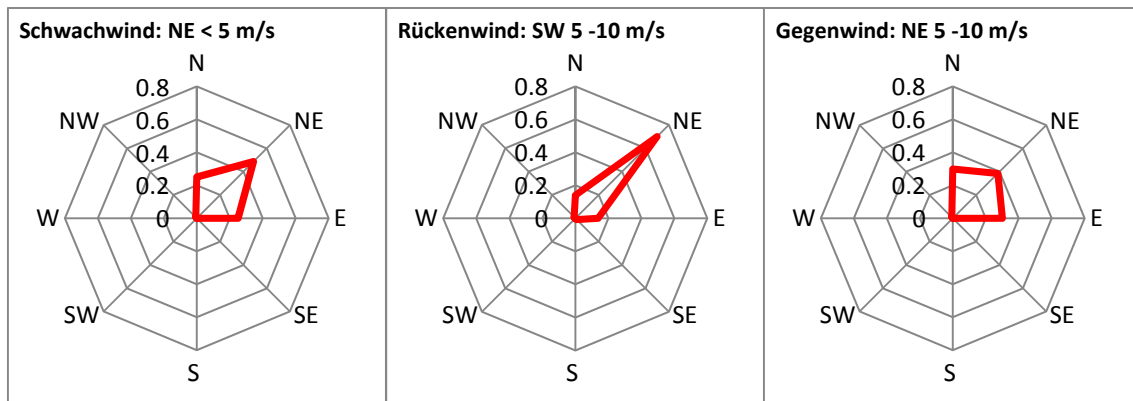
Herbst**Frühling**

Abb. A2. Auswahl der Richtungsverteilungen, welche im Modell für die Berechnung der Konfliktpotenzialkarte eingesetzt wurden. Die Abbildungen zeigen die drei Windsituationen, unter denen Vogelzug im Herbst und im Frühling hauptsächlich beobachtet werden kann. Dargestellt sind die Wahrscheinlichkeiten, mit welcher die Vögel eine der acht im Modell möglichen Windrichtungen wählen (Modellparameter *directionWeights*). Die Richtungsverteilungen für den Herbst entsprechen den Beobachtungen von Bruderer & Liechti 1990. Für die Gegenwindssituation im Herbst wurden eine Richtungsverteilung zwischen derjenigen bei Wind < 5 m/s und 5–10 m/s gewählt, mit einer Gewichtung 2:1 (siehe Abb. A1). Die Richtungsverteilung für den Frühling beruhen auf Radarbeobachtungen in Wideumont (NL), wo die Flugrichtungen nicht durch die Topografie beeinflusst wurden (eigene, unveröffentlichte Daten).

Anhang B

Parameter, welche für die Simulation der Zugdichten und Flughöhen unter drei Windsituationen gewählt wurden, unter welchen die Hauptmasse der Vögel zieht.

	Schwachwind	Rückenwind	Gegenwind
niter	700	700	700
bidrNb	100	100	100
aSigm	0.005	0.005	0.008
bSigm	200	300	200
flydown	10	0	30
initialHeight	100	200	100
direction Weights	siehe Anhang A, Abb. A2		
fun	quantile3	quantile3	quantile3
rad	41	33	21