



Modellierung der Habitateignung für die Waldschnepfe im Jura: Anforderungen bezüglich biotischen und abiotischen Umweltfaktoren

Florian Zellweger und Kurt Bollmann

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf

Zusammenfassung

Dieses Projekt hatte das Ziel, die Bedeutung von abiotischen, biotischen und anthropogenen Faktoren für das Vorkommen der Waldschnepfe zu ermitteln und ein Habitatmodell für die Art im Jura zu erstellen. Wir verwendeten flächig verfügbare Daten zu Klima, Waldstruktur und -zusammensetzung, Bodeneigenschaften und anthropogenen Einflüssen sowie Waldschnepfen-Präsenznachweise der Schweizerischen Vogelwarte der Jahre 2013–2016. Das Habitatmodell aus sieben Umweltvariablen prognostizierte die grössten zusammenhängenden Vorkommensgebiete für die Art im südwestlichen Teil des Schweizer Juras. Den grössten relativen Einfluss auf die Vorkommenswahrscheinlichkeit der Waldschnepfe hatten der Niederschlag in der Vegetationszeit, die künstlichen Lichtimmissionen, der Laubbaumanteil in den Wäldern und der Deckungsgrad der Strauchschicht. Die Resultate können dazu verwendet werden, um Schwerpunktgebiete für die Förderung der Waldschnepfe auszuscheiden, wobei der Lichtimmission, dem Waldmischungsgrad und dem Strauchschichtanteil eine besondere Beachtung geschenkt werden sollte.

Hintergrund

Die Waldschnepfe (*Scolopax rusticola*) zeigt in der Schweiz einen langfristig abnehmenden Trend bei der Verbreitung. Auffallend ist der Rückgang im Mittelland und im östlichen Jura (Mollet, 2015). Die Gründe für den Rückgang sind unklar und wenig untersucht. Es wird vermutet, dass mehrere Faktoren dazu beigetragen haben, wie die Zunahmen von menschlichen Störungen und der natürlichen Prädation, Einflüsse der Jagd und die Verschlechterung der Habitatqualität (Mollet, 2015). Menschlich verursachte und natürliche Entwicklungen in den Wäldern haben in den letzten Jahrzehnten den Lebensraum der Waldschnepfe verändert. Beispielsweise sind die Wälder in den höheren Lagen im Jura dichter geworden (Abegg *et al.*, 2014), was zusammen mit Entwässerungen (Drainage) von ehemals feuchten Waldstandorten (Wüst-Galley *et al.*, 2016) die Habitatqualität vielerorts beeinträchtigt haben dürfte.

Um das Wissen zum Vorkommen der Waldschnepfe in der Schweiz und über die Ursachen für die Bestandsrückgänge zu verbessern, hat das Bundesamt für Umwelt BAFU im Jahr 2014 ein Forschungsprojekt lanciert, das vom Centre Suisse de Cartographie de la Faune (CSCF, Yves Gonseth) geleitet wird. Im Rahmen dieses Projekts wurde die WSL damit beauftragt, die Habitateignung auf regionaler Ebene in Abhängigkeit von verschiedenen Umweltfaktoren zu analysieren und zu modellieren. Das Ziel war, den Einfluss von aktuellen und flächendeckend vorhandenen Daten zu Waldstruktur, Waldzusammensetzung, Bodeneigenschaften und menschlichen Einflüssen auf die Habitateignung für die Waldschnepfe zu quantifizieren und für die biogeographische Region Jura (ohne Randen) vorherzusagen. Damit ergänzt dieses Teilprojekt zwei weitere Teilprojekte der Schweizerischen Vogelwarte, welche die Veränderungen im Verbreitungsgebiet auf Landschaftsebene (10 x 10 km) aufgrund von Daten der Brutvogelatanten und die kleinräumigen Habitatpräferenzen mittels Telemetriedaten im Gebiet des Neuenburger Juras untersucht.

Methodisches Vorgehen

Um herauszufinden, welche biotischen, abiotischen und anthropogenen Umweltfaktoren das Vorkommen der Waldschnepfe auf regionaler Ebene beeinflussen, kombinierten wir Artnachweise der Schweizerischen Vogelwarte Sempach mit verschiedenen, flächig verfügbaren Umweltparametern. Insgesamt leiteten wir zwölf Parameter her; fünf zur Beschreibung der Waldstruktur und -zusammensetzung, zwei für Topographie und Boden, drei für das Klima und zwei für anthropogen bedingte Immissionen (Tabelle 1). Im Folgenden werden die Datengrundlage und Herleitung der Parameter genauer beschrieben.

Tabelle 1. Hergeleitete und verwendete Prädiktoren für die Modellierung der Habitateignung für die Waldschnepfe (*Scolopax rusticola*).

Prädiktoren und thematische Zuordnung	Definition	Einheit	Auflösung	Quelle	In Modell verwendet
<i>Waldstruktur und -zusammensetzung</i>					
Strauchschicht	Deckungsgrad der Vegetation zwischen 1.3m und 5.0 m Höhe	%	25m	LiDAR	X
Vegetationshöhe	Mittlere Vegetationshöhe	m	25m	LiDAR	X
Kronendachheterogenität	Standardabweichung der Kronendachhöhe	m	25m	LiDAR	
Waldranddichte	Waldrandanteil pro Fläche, abgeleitet aus Vector25	%	–	swisstopo	
Laubbaumanteil	Anteil Laubbaumarten, abgeleitet aus Waldmischungsgrad	%	25m	ADS (WSL)	X
<i>Topographie und Boden</i>					
Bodenrauheit	Mass für Rauheit der Geländeoberfläche	Index	2m	swissALT13D	X
Vernässungsindex	Aus der Topographie abgeleiteter seitlicher Wasserfluss (topographic wetness index)	Index	2m	swissALT13D	X
<i>Klima</i>					
Temperatur	Mittlere Temperatur während der Vegetationszeit (April bis September)	°C	100m	WSL	
Niederschlag	Mittlere monatliche Niederschlagssumme während	cm	100m	WSL	X

	der Vegetationszeit (April bis September)				
ΔNiederschlag	Veränderung des Niederschlags (jährlicher Mittelwert) zwischen den beiden Zeitperioden 1960–1980 und 1995–2015	%	100m	WSL	
<i>Menschliche Einflüsse</i>					
Stickstoffeintrag	Interpolierter Stickstoffeintrag	Kg N/ha/Jahr	100m	BAFU/Meteotest	
Lichtimmission	Interpolierter, nächtliche Kunstlichtverschmutzung der Jahre 2010–2012	Radiance, 10^{10}	1000m	Defense Meteorological Satellite Programme (DMSP)	X

Artnachweise

Die in dieser Studie verwendeten Waldschnepfennachweise stammen von der Schweizerischen Vogelwarte. Sie wurden im Rahmen der Feldarbeiten zum dritten Schweizer Brutvogelatlas in den Jahren 2013 bis 2016 mit einem standardisierten Feldprotokoll erhoben (Sattler & Strebel, 2016). Der Datensatz umfasst 331 Präsenznachweise in der biogeographischen Region Jura. Die Nachweise wurden durch freiwillige Mitarbeitende der Vogelwarte erbracht, welche in ihrem Atlasquadrat auf der Grundlage eines Expertenmodells geeignete Gebiete auswählten und diese in der Abenddämmerung zwischen Mai und Juni auf die Präsenz von Waldschnepfen kontrollierten. Zudem wurde die Entdeckungswahrscheinlichkeit ermittelt, die in allen biogeographischen Regionen praktisch bei eins lag (Sattler & Strebel, 2016).

Waldstruktur und Waldzusammensetzung

Sämtliche Variablen zur Waldstruktur wurden aus kantonalen und nationalen LiDAR-Datensätzen (Light Detection and Ranging) aus den Jahren 2002 bis 2014 hergeleitet. LiDAR ist eine Fernerkundungstechnologie, die sehr genaue Daten über die dreidimensionale Struktur von Objekten in Bodennähe liefert. Sie wird auch dazu verwendet, um die Struktur von Waldbeständen hochaufgelöst und flächendeckend zu erfassen und Parameter für die Habitatqualität herzuleiten (Zellweger & Bollmann, 2017). Die hier verwendeten LiDAR Daten weisen unterschiedliche Punktdichten auf und sind zu unterschiedlichen Jahreszeiten aufgenommen worden. Für die Kantone Aargau, Solothurn, Bern, Basel-Land, Waadt (teilweise) und Neuenburg lagen kantonale Daten mit einer Punktdichte von mindestens vier Punkten pro Quadratmeter vor. Diese Daten sind alle zwischen 2010 und 2014 erfasst worden. Für die Kantone Jura und Waadt (teilweise) verwendeten wir den nationalen LiDAR Datensatz der swisstopo (swisstopo, 2011), der in Waldgebieten im Durchschnitt eineinhalb Punkte pro Quadratmeter aufweist. Sämtliche Waldstrukturparameter (Tabelle 1) wurden mit der geländekorrigierten LiDAR-Höheninformation anhand von Rastern mit 25 Meter Maschenweite berechnet (vgl. Zellweger *et al.*, 2016) und für die mit 20 Meter gepufferte Waldfläche im Studiengebiet hergeleitet, die sich aus Vector25 ableiten lässt.

Die Waldstruktur beeinflusst die Habitatqualität für die Waldschnepfe direkt über verschiedene Habitatelemente, die Deckung, Schutz oder Brutplätze gewähren, sowie indirekt über die Auswirkungen der Waldstruktur auf das Bodenmikroklima und das Nahrungsangebot. Um diese Effekte zu erfassen, leiteten wir je einen Indikator für den Deckungsgrad der Strauchschicht, die mittlere Vegetationshöhe und die Kronendachheterogenität ab. Eine gut ausgebildete Strauchschicht verbessert die Deckungsmöglichkeiten in Bodennähe und wurde bereits in anderen Studien als

wichtiges Habitatmerkmal für Waldschnepfen identifiziert (Duriez *et al.*, 2005; Brüngger & Estoppey, 2008; Braña *et al.*, 2013). Die Vegetationshöhe entspricht der durchschnittlichen Bestandeshöhe und ist ein Indikator für die Entwicklungsstufe (Sukzessionsstadium) der Waldbestände (Falkowski *et al.*, 2009). Die Variabilität in der Kronendachhöhe ist ein Indikator für die vertikale Bestands-heterogenität. Studien zur Habitateignung von anderen Waldvogelarten haben gezeigt, dass die aus LiDAR abgeleitete mittlere Vegetationshöhe, die Kronendachheterogenität und der Strauchschichtdeckungsgrad einen wesentlichen Einfluss auf die Habitateignung haben können (Zellweger *et al.*, 2013; Rechsteiner *et al.*, 2017). Generell gehen wir davon aus, dass sich die Habitateignung mit zunehmender Vegetationshöhe erhöht, wobei sich geschlossene Waldbestände mit grossen Vegetationshöhen (z.B. Hallenwälder mit wenig oder fehlendem Unterwuchs) eher negativ auf die Habitateignung auswirken dürften.

Um den Effekt von Waldrändern zu testen, haben wir sämtliche Waldränder aus der Waldmaske (Vector25 (swisstopo, 2014)) extrahiert und in ein Raster umgewandelt, um anschliessend den Anteil an Waldrändern pro Fläche zu berechnen.

Der Laubbaumanteil wurde aus dem aus ADS80 Luftbildern der swisstopo abgeleiteten Waldmischungsgradlayer der WSL hergeleitet (Waser, 2013). Der Laubbaumanteil dürfte ein wichtiger Faktor für die Habitatqualität der Waldschnepfe sein, da die Streue der Bäume einen grossen Einfluss auf die Qualität des Oberbodens und seine Zusammensetzung (z.B. Humusgehalt) hat und damit das Vorkommen und die Abundanz der Waldschnepfennahrung (u.a. Regenwürmern) beeinflusst (Duriez *et al.*, 2005; Cesarz *et al.*, 2016). Die Erfahrungen aus dem Telemetrieprojekt und gemeinsame Feldbegehungen legen die Vermutung nahe, dass in unserem Studiengebiet eine unimodale Beziehung zwischen Laubbaumanteil und Habitateignung für die Waldschnepfe besteht.

Topographie und Boden

Für die Berechnung der topographischen Variablen verwendeten wir das aktuellste nationale Geländemodell der swisstopo (swissALTI3D Version 2016) mit einer Maschenweite von zwei Metern. Dabei haben wir die Waldfläche mit 50 Metern gepuffert, womit die waldnahen Weiden und Wiesen im Layer ebenfalls berücksichtigt sind, die von der Waldschnepfe zur Nahrungssuche aufgesucht werden können. Eine genaue Beschreibung der Berechnungsverfahren ist in Zimmermann & Roberts (2001) zu finden. Kleinräumige topographische Merkmale wie die Bodenrauheit sind für die Habitateignung der Waldschnepfe wichtig, weil sich dieser Vogel vorwiegend in Bodennähe aufhält und dort auf Deckung und geschützte Brutplätze angewiesen ist. Wir gehen davon aus, dass sich steigende Werte von Bodenrauheit positiv auf die Habitateignung auswirken. Der Vernässungsindex (topographic wetness index) ergibt sich aus dem topographischen Wasserfluss und beeinflusst wichtige Bodenmerkmale wie beispielsweise den Oberboden-pH, der wiederum das Regenwurmangebot für die Waldschnepfe beeinflusst. Da Waldschnepfen feuchte Standorte bevorzugt aufsuchen (Glutz von Blotzheim, 1986), sich zu viel Vernässung aufgrund der Staunässe aber negativ auf die Bodenfauna auswirkt, gehen wir von einer unimodalen Beziehung zwischen Vernässungsindex und Habitateignung aus.

Klimadaten

Die Temperatur und Niederschlagswerte basieren auf interpolierten Daten von rund 300 Messstationen (www.meteosuisse.ch) aus den Jahren 1981 bis 2010. Wir berücksichtigten die mittleren monatlichen Werte in der Vegetationszeit (April bis September) (Zellweger *et al.*, 2016). Analog zu den topographischen Variablen wurden die Klimadaten nur auf der mit 50 Metern

gepufferten Waldfläche berücksichtigt. Gebiete mit relativ viel Niederschlag dürften sich positiv auf die Habitataignung auswirken, da dort häufig frische, feuchte Böden vorkommen. Diese werden von der Waldschnepfe bevorzugt aufgesucht (Glutz von Blotzheim, 1986) und dürften sich positiv auf die Nahrungssuche auswirken, da sie dort mit dem Schnabel besser im Oberboden stochern können. Die zeitliche Veränderung des Niederschlags gibt Aufschluss darüber, wo es trockener oder feuchter geworden ist. Bei Trockenheit ziehen sich die Regenwürmer in tiefere Bodenhorizonte zurück und sind somit für die Waldschnepfen als Nahrungsquelle nicht verfügbar. Wir erwarteten demzufolge eine Verminderung der Habitatqualität in Gebieten, wo es in den letzten Jahrzehnten trockener wurde.

Menschlicher Einfluss: Stickstoffeintrag und Lichtverschmutzung

Wir haben den Einfluss des Menschen auf die regionale Brutverbreitung der Waldschnepfe anhand der zwei Einflussfaktoren Stickstoffeintrag und Lichtverschmutzung untersucht. Der modellierte, atmosphärische Stickstoffeintrag wurde vom BAFU und der Firma Meteotest zur Verfügung gestellt und bezieht sich auf das Jahr 2010 (Rihm & Ackermann, 2016). Die Rasterzellengrösse dieses Layer ist 100 Meter und repräsentiert die mit 50 m gepufferte Waldmaske (siehe Topographie). Die Herleitung des Layers basiert auf verschiedenen Inputdaten wie Stickstoffdioxid (NO₂)- und Ammonium (NH₃)-Emissionen sowie dem Niederschlag und der Temperatur und ist in Rihm & Ackermann (2016) ausführlich beschrieben. Der Eintrag von Stickstoff beeinflusst biogeochemische Prozesse im Boden und ist in Wäldern besonders hoch. Obwohl der Einfluss auf die Fauna der Schweiz bislang wenig untersucht ist, gibt es Grund zur Annahme, dass der erhöhte Stickstoffeintrag die Fauna beeinflusst, sei es direkt über Veränderungen der Bodeneigenschaften wie dem pH und der damit verbundenen Nahrungsverfügbarkeit im Boden oder indirekt über Veränderungen in der Pflanzenzusammensetzung und -diversität. Aufgrund der anhaltenden Stickstoffeinträge der letzten Jahrzehnte können wir nicht ausschliessen, dass sich erhöhte Stickstoffeinträge negativ auf die Habitataignung für die Waldschnepfe auswirken.

Um den direkten und stetigen Einfluss des Menschen zu untersuchen, haben wir im Unterschied zu anderen Studien nicht die Gebäude- oder Bewohnerdichte als Variablen im Modell verwendet, sondern die Lichtimmission im Untersuchungsgebiet hergeleitet. Für eine nachtaktive Art dürfte die Lichtverschmutzung eine wesentlichere und direktere Einflussgrösse sein als die Gebäudedichte, welche die menschliche Präsenz im Gebiet nur indirekt und ungenau abbildet. Die negative Wirkung von Lichtimmission auf Wildtiere ist aus anderen Studien bekannt (Navara & Nelson, 2007; Newport *et al.*, 2014; Bliss-Ketchum *et al.*, 2016) und wir gehen deshalb von einer analogen Wirkung auf die nachtaktive Waldschnepfe aus. Die Daten zur nächtlichen Lichtimmission stammen vom Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) aus den Jahren 2010/12, haben eine Auflösung von 1 km und wurden uns von Sarah Radford und Felix Kienast (WSL) zur Verfügung gestellt.

Modellierung

Für die Modellierung der Habitataignung wurden die Umweltbedingungen an den Standorten mit Waldschnepfennachweisen mit den Umweltbedingungen im übrigen Raum des Studiengebiets verglichen. Hierfür wurden 10'000 zufällig gewählte Pseudoabsenz-Standorte in Flächen mit mindestens 33% Waldanteil ausgewählt. Die Analysen wurden mit drei Auflösungen (Skalen, räumliche Bezugsflächen) durchgeführt: 100 m (1 ha), 500 m (25 ha), 1 km (1 km²). Somit wurden sämtliche Umweltvariablen auf die drei genannten Auflösungen aggregiert. Dadurch war es uns

möglich, die Wahl des Endmodells hinsichtlich der statistischen Güte in Beziehung zur räumlichen Auflösung der Umweltvariablen zu treffen.

Für die Modellierung wählten wir Generalisierte Lineare Modelle (GLM) mit dem Ziel, die Vorkommenswahrscheinlichkeit (Habitateignung) der Waldschnepfe in Abhängigkeit der Umweltvariablen zu berechnen. Dazu verwendeten wir sieben der zwölf hergeleiteten Umweltvariablen (Tabelle 1). Nicht berücksichtigt wurden Waldranddichte, Kronendachheterogenität, Temperatur, Veränderung des Niederschlags in den letzten 30 Jahren und Stickstoffeintrag. Die Waldranddichte zeigte in den Voranalysen einen leicht negativen, aber schwachen Einfluss auf die Habitateignung. Der relative Beitrag dieser Variable zum Modell war gering. Dies erschwert die ökologische, praxisorientierte Interpretation der Modellergebnisse. Wir haben deshalb entschieden, die Waldranddichte nicht in den Endmodellen zu verwenden. Ebenso die Kronendachheterogenität wegen Multikorrelationsproblemen. Da unser Studiengebiet mitten im Verbreitungsgebiet der Waldschnepfe in Europa liegt, kann die Temperatur kein direkt limitierender Faktor für das Vorkommen der Art sein. Allfällige Effekte von Temperatur auf die Habitateignung wären indirekt, z.B. über die Baumartenzusammensetzung, die wir separat als erklärende Variable im Habitatmodell berücksichtigen. Insofern ist die Interpretation eines allfälligen Temperatureffekts auf die Habitateignung erschwert und die Analyse der Wirkung von direkten Habitatprädiktoren wird dadurch beeinträchtigt. Voranalysen zur Veränderung des Niederschlags haben gezeigt, dass die Berechnung der Niederschlagsanomalien stark von methodischen Aspekten beeinflusst ist und je nach gewählter Methode für die Interpolation der Niederschlagswerte unterschiedliche räumliche Muster der Niederschlagsanomalien entstehen. Dies erschwert eine fundierte Interpretation allfälliger Zusammenhänge mit der Habitatqualität. In Kombination mit den Resultaten aus den Voranalysen, welche auf einen relativ geringen statistischen Effekt der Niederschlagsanomalie hinweisen, sehen wir in der vorliegenden Studie von dieser Variable ab. Die Voranalysen zum Stickstoffeintrag zeigten einen negativen Zusammenhang mit der Vorkommenswahrscheinlichkeit der Waldschnepfe. Aufgrund der Schwierigkeit, dieses Muster im Jura mit seinen gepufferten Kalkböden hinsichtlich Boden-pH und allfälligen indirekten Auswirkungen auf das Regenwurmangebot zu interpretieren (Problem der Scheinkorrelation; B. Frey WSL, pers. Mitteilung), verzichteten wir für die Endmodelle auf diesen Umweltparameter. Diese Entscheidung verringerte ausserdem die Gefahr eines „overfitting“ des Modells, da der Stickstoffeintrag positiv mit dem Parameter Lichtimmission korreliert war (pearson correlation coefficient $r = 0.39$, $p < 0.001$).

Die Modellgüte wurde anhand der „area under the receiver operating characteristic curve“ (AUC) und der „true skill statistic“ (TSS) Werte evaluiert, welche mittels einer fünfmal wiederholten, dreifachen Kreuzvalidierung berechnet wurden. Die modellierte Beziehung zwischen den Umweltvariablen und der Vorkommenswahrscheinlichkeit stellen wir mittels Reaktionskurven grafisch dar. Dies ermöglicht eine ökologische Interpretation der statistischen Effekte. Weiter berechneten wir für jede Auflösung den relativen Einfluss der Umweltvariablen. Zuletzt wurden die Modellergebnisse in den Raum projiziert und Karten mit der Habitateignung erstellt.

Resultate

Die Modellergebnisse aus der dreifachen Kreuzvalidierung zeigen eine sehr zufriedenstellende Modellgüte (AUC-Medianwerte > 0.88 ; TSS-Medianwerte > 0.63) (Abbildung 1). Beim AUC steigt die Modellgüte mit abnehmender Auflösung (bzw. zunehmender Skala), beim TSS nimmt sie mit der Auflösung ab. Diese Effekte sind aber nicht signifikant.

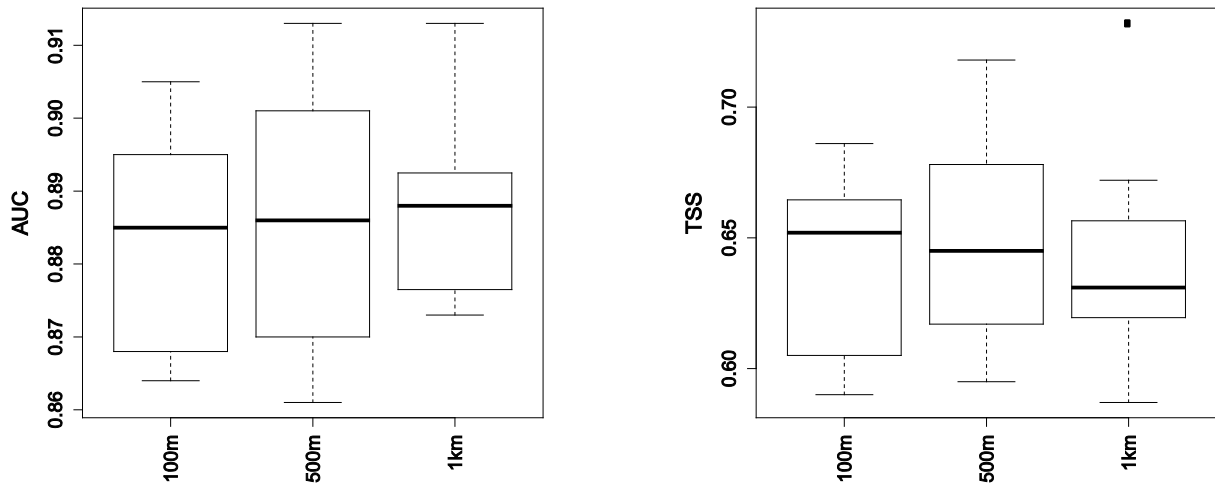


Abbildung 1. Modellevaluation: Boxplots der AUC- und TSS-Werte aus dreifach kreuzvalidierten (fünfmal wiederholt) Modellen mit drei räumlichen Auflösungen. Sämtliche AUC und TSS Werte deuten auf eine gute bis sehr gute Modellgüte hin.

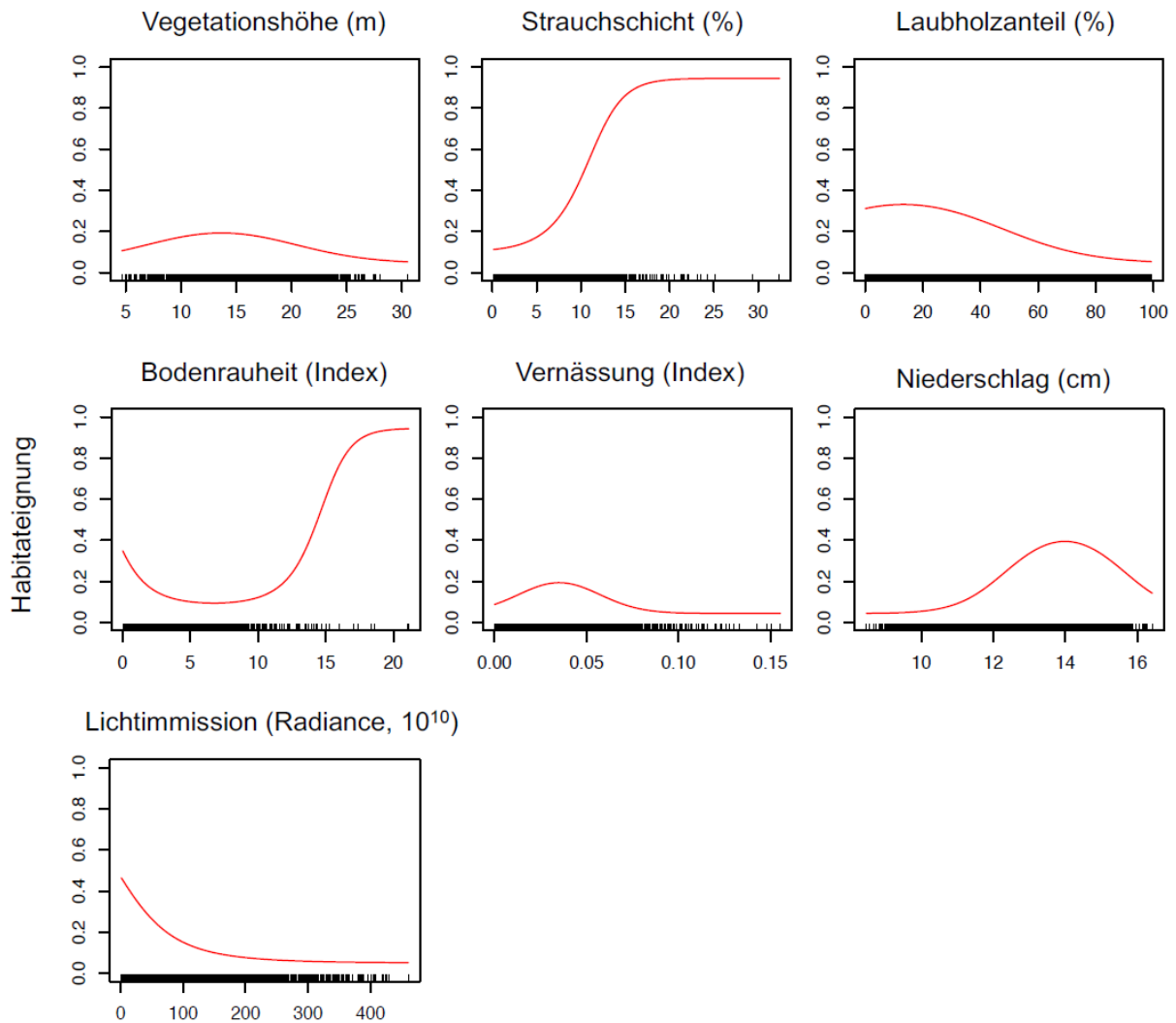


Abbildung 2. Reaktionskurven der Beziehungen zwischen den Umweltvariablen und der Habitateignung (Waldschnepfen Vorkommenswahrscheinlichkeit) für das Modell mit Auflösung 1 km (die Reaktionskurven sind bei allen drei Auflösungen etwa gleich). Die kleinen Striche unmittelbar über der x-Achse zeigen die Stichprobenverteilung.

Die Beziehungen zwischen den Umweltvariablen und der Habitateignung entsprechen weitgehend den oben genannten Erwartungen (Abbildung 2). Abweichungen ergaben sich lediglich bei der Bodenrauheit, bei welcher bei tiefen Werten (<4) ein negativer Einfluss auf die Habitateignung modelliert wurde, die erst wieder ab Werten >12 stark ansteigt. Die Bedeutung dieses Zusammenhangs wird jedoch abgeschwächt durch den geringen relativen Beitrag dieser Variable zum Modell (Abbildung 3). Wie erwartet zeigten der Vernässungsindex und der Niederschlag eine unimodale Beziehung zur Habitateignung.

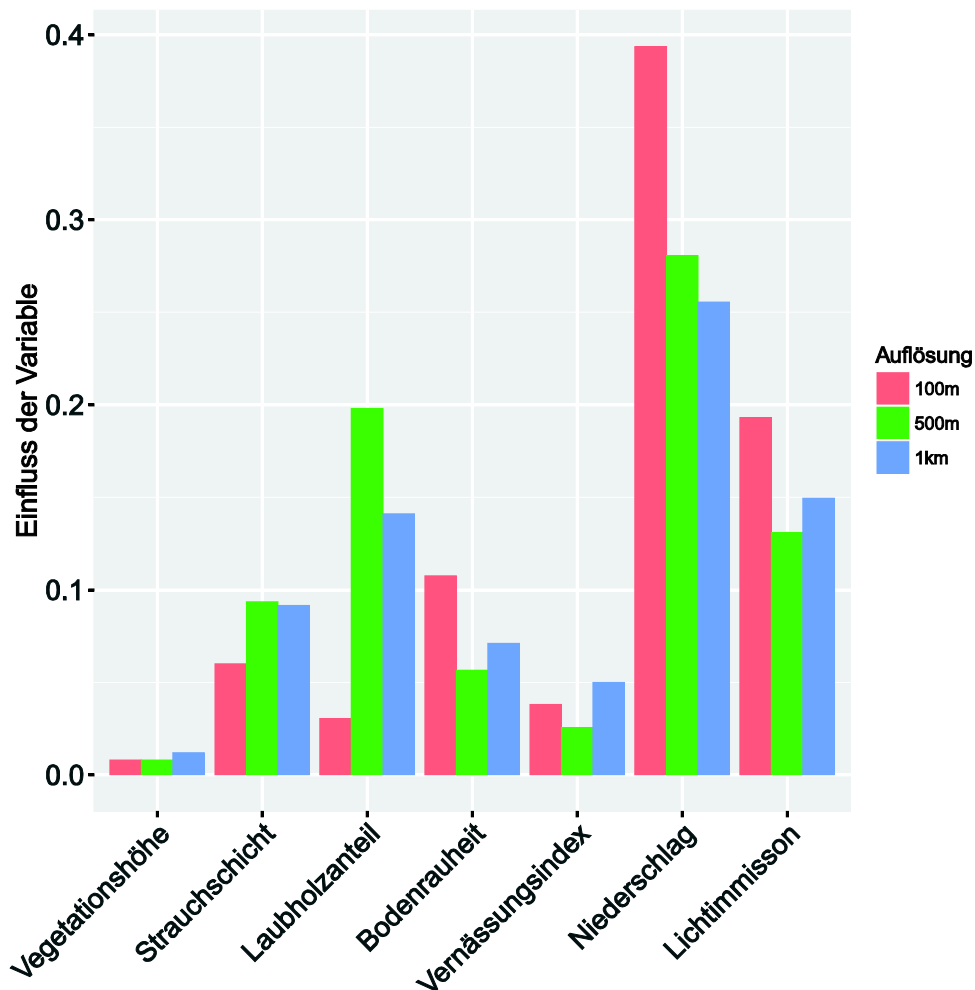


Abbildung 3. Relativer Einfluss der erklärenden Variablen für verschiedene räumliche Auflösungen.

Der grösste relative Einfluss auf die Habitateignung hatte der Niederschlag, gefolgt von der nächtlichen Kunstlichtimmission (Abbildung 3). Mit zunehmender Lichtimmission verringert sich die Habitateignung deutlich. Die unimodale Beziehung des mittleren monatlichen Niederschlags zur Vorkommenswahrscheinlichkeit der Waldschnepfe hatte ihr Maximum bei etwa 14 cm. Der Laubbaumanteil war ebenfalls eine wichtige Variable, vor allem bei den Auflösungen von 500 m und 1 km. Die Einflüsse der Strauchschicht und der Bodenrauheit waren im Modell etwa gleich gross. Der Vernässungsindex und die mittlere Vegetationshöhe waren relativ unbedeutende Variablen. Generell fällt auf, dass bei der Variablenbedeutung relative grosse Unterschiede zwischen der höchsten Auflösung (100 m) und der mittleren (500 m) und groben (1 km) Auflösung bestehen. Bei der höchsten Auflösung ist dieser Unterschied beim Niederschlag und beim Laubholzanteil sogar

gegenläufig. Dies dürfte ein Hinweis darauf sein, dass die Resultate vor allem hinsichtlich der mittleren und groben Variablenauflösung interpretiert werden sollten.

Die räumliche Projektion der Habitateignung zeigt eine deutliche Zunahme geeigneter Flächen von Nordosten gegen Südwesten (Abbildung 4). Der weitaus grösste Teil des Habitatpotenzials befindet sich westlich der Linie Neuchâtel – Le Locle mit zwei auffälligen Konzentrationen im Vallée de Joux und um den Mont Tendre sowie im westlichen Teil des Vallée de la Brévine.

Diskussion und Interpretation

Die Präferenz der Waldschnepfe für grosse zusammenhängende Wälder (Glutz von Blotzheim, 1986) wird durch das Habitatmodell für das Studiengebiet bestätigt. Zudem steigt die Vorkommenswahrscheinlichkeit der Art im Gebiet mit dem Anteil an Tannen-Buchenwäldern und Tannen-Fichtenwäldern. Auf regionaler Ebene wird die Habitatqualität für die Waldschnepfe massgeblich vom Niederschlag und der Kunstlichtimmission beeinflusst und steigt vom östlichen zum westlichen Jura an. Die Habitatqualität erhöht sich im Studiengebiet mit steigenden Niederschlagswerten und nimmt bei hohen Werten wieder ab. Dieser Verlauf dürfte darauf zurückzuführen sein, dass Waldschnepfen feuchte Standorte für die Nahrungssuche bevorzugen und deshalb in Kalkgebieten wie dem Jura auf niederschlagsreiche Wälder angewiesen sind. Die abfallende Kurve bei zu hohen Niederschlagswerten könnte damit zusammenhängen, dass der Niederschlag mit zunehmender Höhe zunimmt, die Regenwurmabundanz und -aktivität jedoch in höheren Lagen wegen tieferen Bodentemperaturen zurückgeht (Cortez, 1998).

Die negative Wirkung von nächtlichem Kunstlicht auf die Vorkommenswahrscheinlichkeit der Waldschnepfe weist auf eine direkte oder indirekte Beeinträchtigung der Waldschnepfe hin, wie sie bereits für zahlreiche Organismen nachgewiesen ist (Gaston *et al.*, 2013). Dies ist grundsätzlich nicht erstaunlich, weil die Waldschnepfe als dämmerungs- und nachtaktive und scheue Vogelart sowohl in ihrem Tag-Nacht Rhythmus als auch in der Wahrnehmung (visual perception) oder der nächtlichen Orientierung im Gelände beeinflusst werden dürfte. Wahrscheinlich ist auch, dass sich das Prädationsrisiko wie bei anderen nachtaktiven Arten unter künstlich aufgehellten Nachtbedingungen erhöht (Vásquez, 1994). Kunstlicht kann so das Zeit-Energiebudget der Waldschnepfe für die Nahrungsaufnahme verschlechtern, weil offene Wiesen und Weiden, die ein besseres Regenwurmangebot aufweisen als Wälder, unter dem nächtlichen Einfluss von Lichtimmission später oder gar nicht zur Nahrungssuche aufgesucht werden (Braña *et al.* 2010). Andererseits korreliert die Variable Lichtimmission auch mit der Gebäudedichte im Studiengebiet und dadurch indirekt mit der verfügbaren Waldfläche, die im westlichen Jura grösser ist als im Osten. Wir können deshalb nicht ausschliessen, dass andere anthropogene Faktoren, wie z.B. die Präsenz von Menschen im Gebiet, die Vorkommenswahrscheinlichkeit der Waldschnepfe negativ beeinflussen.

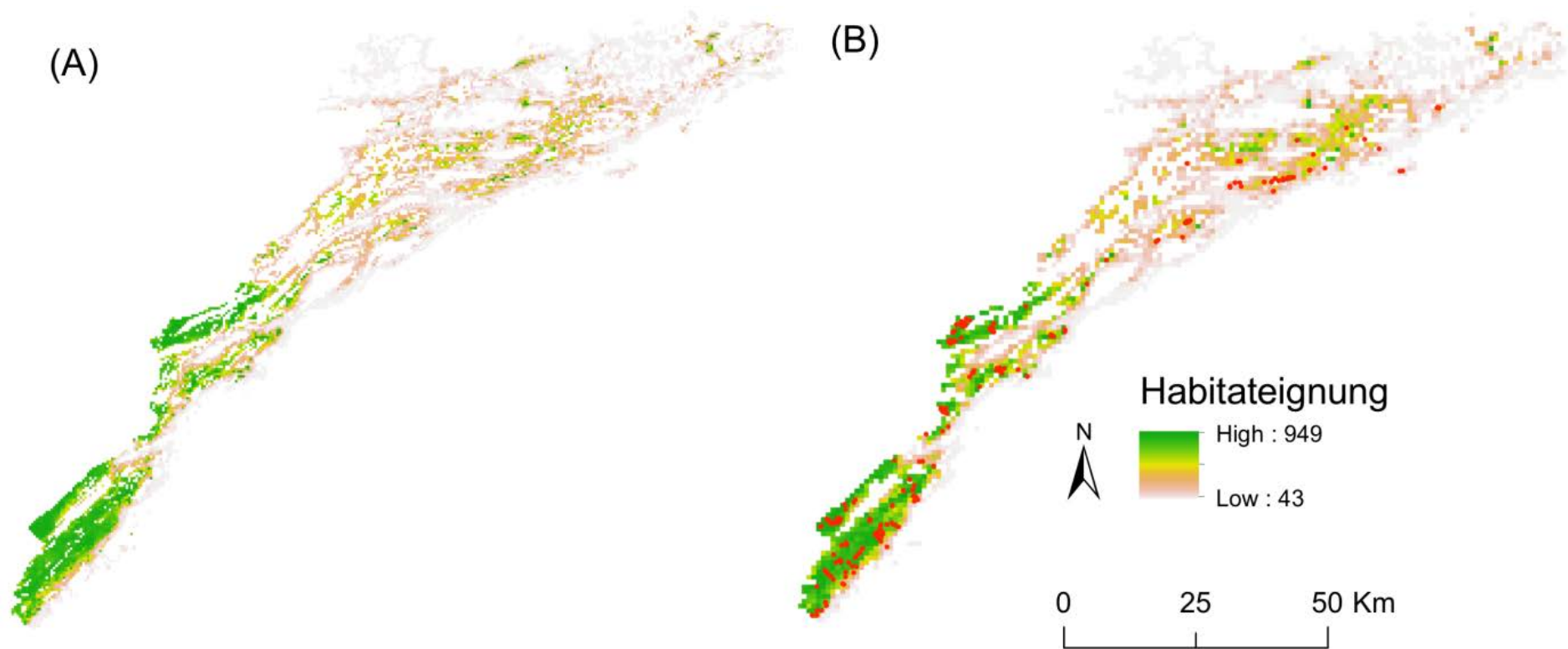


Abbildung 4. Räumliche Vorhersage der Habitataignung für die Waldschnepfe in der biogeographischen Region Jura (ohne Randen, SH) in den räumlichen Auflösungen (Skalen) 500 m (A) und 1000 m (B). Die roten Punkte in (B) zeigen die Orte mit den Waldschnepfennachweisen, die für die Modellierung verwendet wurden. Die Vorhersage wurde nur für Flächen (Rasterzellen) mit mindestens 33% Waldanteil ausgeführt. Die Artnachweise im Gebiet Unterberg-Bettlachstock werden durch das Modell nur mittelmässig vorhergesagt.

Unsere Resultate unterstreichen die Bedeutung von Waldstruktur und Baumartenzusammensetzung als Strukturvariablen für die Habitateignung der Waldschnepfe auf regionaler Ebene. Der positive Effekt eines erhöhten Strauchschichtanteils, wie er auch von Braña *et al.* (2013) nachgewiesen wurde, dürfte auf gute Deckungsmöglichkeiten in Bodennähe zurückzuführen sein. Diese Eigenschaft kann sowohl für Tageseinstände als auch für die Nahrungssuche und die Neststandorte von Bedeutung sein. Weiter kann ein erhöhter Strauchschichtdeckungsgrad und das damit verbundene Mikroklima eine positive Wirkung auf die Bodenbeschaffenheit und Bodenfeuchtigkeit haben, was sich wiederum positiv auf das Nahrungsangebot auswirkt. Die Strauchschicht ist auch ein wichtiger Bestandteil im Lebensraum des Haselhuhns (*Bonasa bonasia*), ebenfalls eine bodenbrütende Art, die im Jura sympatrisch mit der Waldschnepfe vorkommt (Rechsteiner *et al.*, 2017). Die Variable Strauchschicht gibt auch einen indirekten Hinweis zum Kronenschlussgrad der Wälder, den wir aus methodischen Gründen (LiDAR-Winterbefliegungen) nicht einwandfrei ermitteln konnten. Die starke Abnahmen der Habitatqualität bei Strauchschichtanteilen < 15% weist darauf hin, dass Waldbestände mit hohem Kronenschlussgrad wenig geeignet sind. Gemäss unseren Analysen ist ein Laubbaumanteil bis zu 30% optimal für die Waldschnepfe. Dies hängt wohl damit zusammen, dass durch die leicht abbaubare Laubstreu Kleinstandorte entstehen, die gute Lebens- und Nahrungsgrundlagen für streueersetzernde Organismen sind und indirekt die Nahrungsverfügbarkeit und -zugänglichkeit für Waldschnepfen während des Tages erhöhen. Ein Mischungsgrad mit einem Laubholzanteil von 10% bis 30% in Kombination mit einem Strauchschichtanteil von mindestens 15% dürfte die Habitateignung für die Waldschnepfe verbessern.

Topographische Bodenvariablen hatten einen relativ geringen Einfluss auf die modellierte Habitateignung auf regionaler Ebene. Dies ist wohl darauf zurückzuführen, dass die hier verwendeten Datenaufösungen zu grob sind, um mikrotopographische Effekte aufzuzeigen. Unsere Ergebnisse sind hilfreich, wenn es darum geht, regionale Schwerpunkte zu setzen und das Verständnis für regional wichtige Umwelt- und Habitatfaktoren für das Vorkommen der Art zu fördern. Eine Schwierigkeit bei der Interpretation der Resultate besteht darin, dass es sich bei den Präsenznachweisen um Balzflüge handelt. Diese finden zwar in den Streifgebieten der Art statt, haben aber nur einen eingeschränkten räumlichen Bezug zu den sommerlichen Tageseinständen der Art (Beni Homberger, pers. Mitteilung). Deshalb sollten die Resultate dieser Studie nur dazu verwendet werden, um Waldschnepfenlebensräume generell zu charakterisieren. Für konkrete, bestandspezifische Empfehlungen für Lebensraumaufwertungen in Schwerpunktgebieten dürften die Resultate aus dem Projektmodul der Schweizerischen Vogelwarte mit individuell besenderten Waldschnepfen und fein aufgelösten Standortfaktoren wie Bestandsstruktur, Bestandszusammensetzung, Bodenvegetation und -beschaffenheit sowie Erschliessung mit Strassen und Wegen aufschlussreicher sein. Bei solchen feinskalierten Habitatanalysen wäre es sinnvoll, wenn der organische Auflagenhorizont mitberücksichtigt würde.

WSL, 14.12.2018

Literatur

- Abegg, M., Brändli, U.-B., Cioldi, F., Fischer, C., Herold-Bonardi, A., M., H., Keller, M., Meile, R., Rösler, E., Speich, S., Traub, B. & Vidondo, B. (2014) Swiss national forest inventory - Result table No. 178337: stand density (SDI) <https://doi.org/10.21258/1357585>. Birmensdorf, Swiss Federal Research Institute WSL.
- Bliss-Ketchum, L.L., de Rivera, C.E., Turner, B.C. & Weisbaum, D.M. (2016) The effect of artificial light on wildlife use of a passage structure. *Biological Conservation* **199**, 25–28.
- Braña, F., González-Quirós, P., Prieto, L. & González, F. (2013) Spatial Distribution and Scale-Dependent Habitat Selection by Eurasian Woodcocks *Scolopax rusticola* at the South-Western Limit of its Continental Breeding Range in Northern Spain. *Acta Ornithologica*, **48**, 27–37.
- Braña, F., Prieto, L. & Gonzalez-Quiros, P. (2010) Habitat change and timing of dusk flight in the Eurasian woodcock: a trade-off between feeding and predator avoidance? *Annales Zoologici Fennici* **47**, 206–214.
- Brüngger, M. & Estoppey, F. (2008) Exigences écologiques de la bécasse des bois *Scolopax rusticola* dans les préAlpes de Suisse occidentale. *Nos Oiseaux* **55**, 27–37.
- Cesarz, S., Craven, D., Dietrich, C. & Eisenhauer, N. (2016) Effects of soil and leaf litter quality on the biomass of two endogeic earthworm species. *European Journal of Soil Biology*, **77**, 9–16.
- Cortez, J. (1998) Field decomposition of leaf litters: Relationships between decomposition rates and soil moisture, soil temperature and earthworm activity. *Soil Biology & Biochemistry* **30**, 783–793.
- Duriez, O., Ferrand, Y., Binet, F., Corda, E., Gossmann, F. & Fritz, H. (2005) Habitat selection of the Eurasian woodcock in winter in relation to earthworms availability. *Biological Conservation*, **122**, 479–490.
- Falkowski, M.J., Evans, J.S., Martinuzzi, S., Gessler, P.E. & Hudak, A.T. (2009) Characterizing forest succession with lidar data: An evaluation for the Inland Northwest, USA. *Remote Sensing of Environment* **113**, 946–956.
- Gaston, K.J., Bennie J., Davies, T.W. & Hopkins, J. (2013) The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal. *Biological Reviews*, **88**, 912–927.
- Glutz von Blotzheim, U.N. (1986) *Handbuch der Vögel Mitteleuropas. Charadriiformes, Band 7, Teil 2 (2. Auflage)*, AULA-Verlag, Wiesbaden.
- IAP (2004) Wie geht es unserem Wald. Ergebnisse aus Dauerbeobachtungsflächen von 1984 bis 2004. Bericht 2. Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch.
- Mollet, P. (2015) Die Waldschnepfe (*Scolopax rusticola*) in der Schweiz – Synthese 2014. Schweizerische Vogelwarte, Sempach. 21 S.
- Navara, K.J. & Nelson, R.J. (2007) The dark side of light at night: physiological, epidemiological, and ecological consequences. *Journal of Pineal Research* **43**, 215–224.
- Newport, J., Shorthouse, D.J. & Manning, A.D. (2014) The effects of light and noise from urban development on biodiversity: Implications for protected areas in Australia. *Ecological Management & Restoration* **15**, 204–214.
- Rechsteiner, C., Zellweger, F., Gerber, A., Breiner, F.T. & Bollmann, K. (2017) Remotely sensed forest habitat structures improve regional species conservation. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, doi: 10.1002/rse2.46.
- Rihm, B. & Ackermann, B. (2016) Critical Loads of Nitrogen and their Exceedances. Swiss contribution to the effects-oriented work under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE). Federal Office for the Environment, Bern. Environmental Studies no. 1642. 78 S.
- Sattler, T. & Strebler, N. (2016) Analyse der Waldschnepfennachweise während der Atlasperiode 2013–2016. Schweizerische Vogelwarte, Sempach. 22 S.
- swisstopo (2011) *DTM-AV, DOM-AV @ 5704 000 000*. http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/height/dom_dtm-av.html (09.07.2013).
- swisstopo (2014) *VECTOR25*. <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/landscape/vector25.html> (28.01.2014).
- Thimonier, A., Waldner, P., Graf Pannatier, E., Braun, S., Achermann, B., Rhim, B. & Augustin, S. (2015) Gesundheit und Vitalität. *Waldbericht 2015. Zustand und Nutzung des Schweizer Waldes* (Hrsg. A.

- Rigling & H.P. Schaffer), Bundesamt für Umwelt, Bern, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. S. 44–45.
- Vásquez, R.A. (1994) Assessment of predation risk via illumination level: facultative central place foraging in the cricetid rodent *Phyllotis darwini*. *Behavioral Ecology and Sociobiology* **34**, 375–381.
- Waser, L.T. (2013) Stand und Perspektiven einer landesweiten Baumartenklassifikation mit digitalen Luftbildern. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* **164**, 95–103.
- Wüst-Galley, C., Mössinger, E. & Leifeld, J. (2016) Loss of the soil carbon storage function of drained forested peatlands. *Mires and Peat*, **18**, 1–22.
- Zellweger, F. & Bollmann, K. (2017) Der Schweizer Wald und seine Biodiversität: LiDAR ermöglicht neue Waldstrukturanalysen. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, **168**, 142–150.
- Zellweger, F., Braunisch, V., Baltensweiler, A. & Bollmann, K. (2013) Remotely sensed forest structural complexity predicts multi species occurrence at the landscape scale. *Forest Ecology and Management*, **307**, 303–312.
- Zellweger, F., Baltensweiler, A., Ginzler, C., Roth, T., Braunisch, V., Bugmann, H. & Bollmann, K. (2016) Environmental predictors of species richness in forest landscapes: abiotic factors versus vegetation structure. *Journal of Biogeography*, **43**, 1080–1090.
- Zimmermann, N.E. & Roberts, D.W. (2001) Final report of the MLP climate and biophysical mapping project. Swiss Federal Research Inst. WSL, Birmensdorf, Switzerland and Utah State Univ., Logan, USA.