

Waldrandaufwertungen: Einfluss von Exposition und Wüchsigkeit des Standorts

Manuel Babbi Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen (CH)*
Stefan Widmer Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen (CH)
Marcel Blattner Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen (CH)
Bertil O. Krüsi Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen (CH)

Waldrandaufwertungen: Einfluss von Exposition und Wüchsigkeit des Standorts

Breite, artenreiche Waldränder sind in der Schweiz selten. Seit einigen Jahren wird die ökologische Aufwertung von Waldrändern daher vom Bund gefördert. Damit die beschränkten Mittel optimal eingesetzt werden können, braucht es gute Kenntnisse über die Standortfaktoren, die den Erfolg von Waldrandaufwertungen beeinflussen. Wir untersuchten an 48 aufgewerteten Waldrändern im Kanton Aargau, welchen Einfluss Exposition und Wüchsigkeit des Standorts auf den Aufwertungserfolg haben. Die Resultate zeigten, dass sowohl die Exposition als auch die Wüchsigkeit einen signifikanten Einfluss auf die Qualität der aufgewerteten Waldränder hatten. An südexponierten und an mageren Standorten war die ökologische Qualität der aufgewerteten Waldränder signifikant besser als an anders exponierten beziehungsweise an wüchsigen Standorten. Bei nicht südexponierten Lagen hatte die Wüchsigkeit des Standorts keinen nachweisbaren Einfluss auf die ökologische Qualität der aufgewerteten Waldränder. Die Wahrscheinlichkeit, dass nach Aufwertungsmassnahmen Problemarten und invasive Neophyten vorkommen und dominierende Bestände bilden, war an mageren Standorten signifikant kleiner als an wüchsigen, hingegen spielte die Exposition keine Rolle. In Zukunft sollten Waldrandaufwertungsprojekte daher bevorzugt an südexponierten und mageren Standorten durchgeführt werden. Bei anders exponierten oder bei wüchsigen Standorten sind gute Resultate zwar weniger wahrscheinlich, aber nicht unmöglich.

Keywords: forest edge ecotone, ecological improvement, orientation, soil productivity, Switzerland, Canton of Aargau

doi: 10.3188/szf.2016.0286

* Grüental, CH-8820 Wädenswil, E-Mail manuel.babbi@zhaw.ch

Waldränder sind besonders artenreich, wenn sie struktureich sind und einen ausgedehnten Strauchgürtel und Krautsaum aufweisen. Sie bieten vielen Insekten, Vögeln, Kleinsäugetern und Pflanzen einen Rückzugsort (Flückiger 1999) und haben als Vernetzungselement eine grosse Bedeutung (Bollmann et al 2009, BU-WAL 2004). Gemäss den von Babbi & Krüsi (2015) ausgewerteten Daten des dritten Landesforstinventars (Brändli 2010) waren in den Jahren 2004 bis 2006 mehr als 50% der Schweizer Waldränder «ökologisch schlecht» oder «nicht vorhanden», und nur 14% waren «wertvoll» oder «sehr wertvoll».

Um die ökologische Qualität von Waldrändern zu verbessern, werden ökologische Aufwertungsmassnahmen vom Bund gefördert (BAFU 2015). Da solche Massnahmen und die periodisch notwendigen Folgeeingriffe relativ teuer sind, sind Informationen über die Faktoren, welche eine erfolgreiche Aufwertung begünstigen, sehr erwünscht. Deshalb sollten die beschränkten finanziellen Mittel primär

an den besonders erfolgversprechenden Standorten eingesetzt werden.

In der Literatur werden südexponierte Waldränder als ökologisch besonders wertvoll beschrieben (Pro Natura 2013, Schütz & Krüsi 1994, Hondong et al 1993; Abbildung 1). Bedingt durch viel Licht und Wärme sowie allenfalls Trockenheit sollen südexponierte Waldränder eine grössere Artenvielfalt als anders exponierte Waldränder ermöglichen. Im Vergleich zur Exposition wurde auf die Fruchtbarkeit des Bodens beziehungsweise die Wüchsigkeit des Standorts in den meisten Publikationen und Priorisierungsmodellen zur ökologischen Aufwertung von Waldrändern bisher nicht oder nur am Rande eingegangen (Hepenstrick & Krüsi 2013, Dürrenmatt et al 2009). Pro Natura (2013) erwähnt, dass es an mageren Standorten weniger häufig Pflegeeingriffe braucht als an wüchsigen. Die von Spörri et al (2014) befragten Revierförster im Kanton Aargau hielten eine Südexposition und eine geringe Wüchsigkeit des Standorts für die wichtigsten Er-



Abb 1 Südexponierte Waldränder wie hier am Schenkenberg in Thalheim (Kanton Aargau) gelten als ökologisch besonders wertvoll.

folgsfaktoren bei Waldrandaufwertungen. Bei den von Spörri et al (2014) in einer Pilotstudie im Kanton Aargau untersuchten 20 aufgewerteten Waldrändern wurde allerdings kein signifikanter Zusammenhang zwischen Aufwertungserfolg und Exposition und/oder Wüchsigkeit des Standorts festgestellt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war, den Einfluss von Exposition und Wüchsigkeit des Standorts auf den Erfolg von Waldrandaufwertungen vertieft zu untersuchen. Mit rund 200 km ökologisch aufgewerteten Waldrändern bietet der Kanton Aargau dafür die idealen Voraussetzungen (BVU 2009). Im Speziellen ging es darum, im Rahmen einer grösseren Stichprobe folgende Fragen abzuklären:

- Ist der Aufwertungserfolg bei bestimmten Expositionen und Wüchsigkeiten des Standorts beziehungsweise bei bestimmten Kombinationen von Exposition und Wüchsigkeit des Standorts signifikant grösser als bei anderen?
- Auf welche Waldrandelemente sind die gegebenenfalls beobachteten Unterschiede zurückzuführen?

Material und Methoden

Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasste den ganzen Kanton Aargau mit seinen vier Forstkreisen. Die 48 untersuchten Waldränder lagen zwischen 350 und 700 m ü. M. (Abbildung 2).

Auswahl der Waldränder

Von den rund 200 km aufgewerteten Waldrändern im Kanton Aargau wurden nur jene berücksichtigt, die mindestens 100 m lang waren und zwischen 2007 und 2012 aufgewertet oder zum letzten Mal gepflegt worden waren, da die Wirkung von Aufwertungseingriffen gemäss Spörri et al (2014) zwei bis sieben Jahre nach dem Eingriff am besten zur Geltung kommt. Die Daten zu den einzelnen Waldrandaufwertungen wurden von der Abteilung Wald des Kantons Aargau zur Verfügung gestellt.

Basierend auf dem digitalen Höhenmodell DHM25 (Geodaten © swisstopo DV084370) wurde mit dem geografischen Informationssystem ArcGIS 10.1 von Esri flächendeckend für den ganzen Kanton Aargau die Exposition des Geländes ermittelt und anschliessend in die zwei Kategorien Süd (von Südost über Süd bis Südwest) und nicht Süd (restliche Expositionen) eingeteilt. Aufgrund der vom Kanton Aargau zur Verfügung gestellten pflanzensoziologischen Karte der Waldstandorte des Kantons Aargau (Stocker et al 2009) und der von Schmider et al (2003) vorgeschlagenen Klassifizierung wurden die Waldränder der Kategorie mager beziehungsweise wüchsig zugeordnet. Waldränder an Standorten mit mittlerer Wüchsigkeit wurden nicht berücksichtigt. Anschliessend wurden die Waldränder einem der folgenden vier Straten zugeteilt: südexponiert & mager (s-m), südexponiert & wüchsig (s-w), nicht südexponiert & mager (ns-m) und nicht südexponiert & wüchsig (ns-w). Südexponierte Waldränder an nordexponierten Hängen wurden nachträglich ausgeschlossen. Die resultierende Karte wurde anschliessend im GIS mit dem Layer jener Waldränder verschnitten, welche zwischen 2007 und 2012 aufgewertet wurden und mindestens 100 m lang waren. In jedem der vier Straten wurden schliesslich zufällig 15 Stichprobenpunkte (zwölf Haupt- und drei Reservepunkte) ausgewählt (Abbildung 2).

Ökologische Bewertung der Waldränder

Die ökologische Qualität der 48 untersuchten Waldränder wurde im Herbst 2014 mit dem Schlüssel zur ökologischen Bewertung von Waldrändern¹ – in der Folge Waldrandschlüssel genannt – ermittelt. Mit dieser Methode wurde die Qualität der Waldränder auf einer Länge von 100 m anhand von 16 relevanten Parametern beurteilt. Eine detaillierte Beschreibung der Methode ist bei Spörri et al (2014) zu finden.

Bei Waldrändern, die auf einer Länge von mehr als 100 m aufgewertet worden waren, diente die Mitte der aufgewerteten Strecke als Mittelpunkt für den zu untersuchenden 100 m langen Waldrandabschnitt. Im Feld wurde geprüft, ob die gemäss GIS-Analyse ermittelte Stratumzuordnung (Exposition und Wüchsigkeit des Standorts) und der Zeitpunkt des letzten Aufwertungseingriffs der Realität entsprachen. War ein Kriterium nicht erfüllt, wurde auf einen Reservewaldrand ausgewichen.

Statistische Auswertungen

Die univariaten Analysen erfolgten mit dem Statistikprogramm R 3.1.2². Um Aussagen zu signifikanten Unterschieden bei einzelnen Parametern

1 KRÜSI BO (2014) Schlüssel zur ökologischen Bewertung von Waldrändern. www.zhaw.ch/iunr/waldrand (22.7.2016)

2 www.R-project.org (22.7.2016)

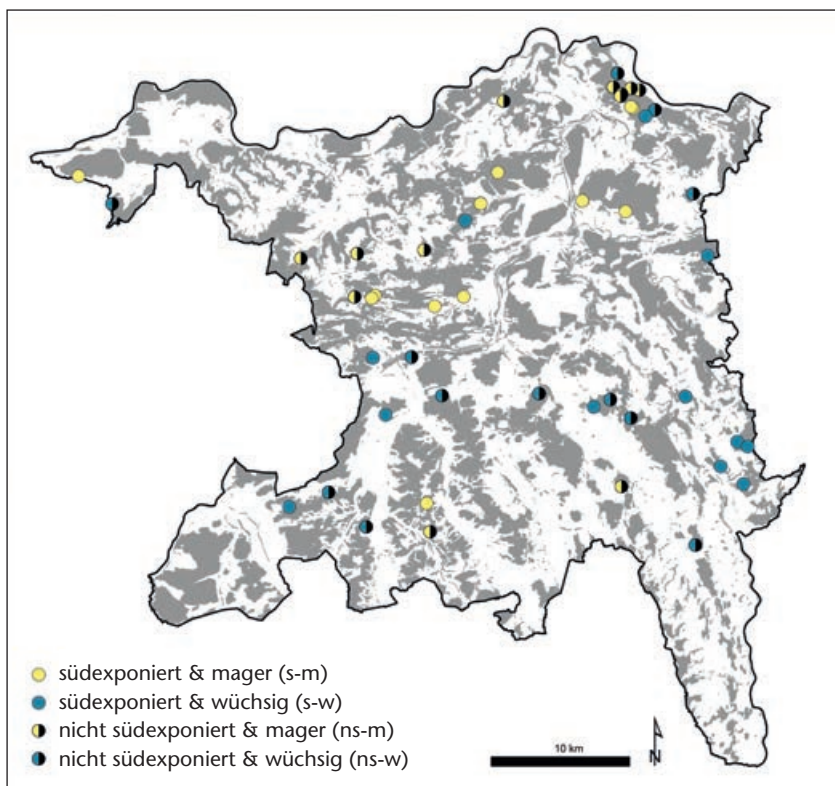


Abb 2 Lage der 48 untersuchten aufgewerteten Waldränder im Kanton Aargau (Geodaten © swisstopo DV084370). Die grauen Flächen zeigen die Waldgebiete.

des Waldrandschlüssels zwischen den verschiedenen Expositionen und zwischen den unterschiedlichen Wüchsigkeiten der Standorte machen zu können, wurden Zweistichproben-t-Tests durchgeführt. Waren die Daten aufgrund des Shapiro-Wilk-Tests normalverteilt, wurde der Welch-Test, ansonsten der Wilcoxon-Test verwendet. Um die signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Straten – das heisst zwischen den vier Kombinationen von Exposition und Wüchsigkeit des Standorts – herauszukristallisieren, wurde eine ANOVA durchgeführt. Waren die Daten nicht normalverteilt, wurde der Kruskal-Wallis-Test verwendet. Mit dem Tukey-Post-hoc-Test wurde untersucht, welche Straten sich signifikant voneinander unterschieden. Das Signifikanzniveau betrug für alle Auswertungen $\alpha = 0.05$.

Mit einer linearen multiplen Regressionsanalyse wurde untersucht, welche Parameter im Waldrandschlüssel einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtpunktzahl der untersuchten Waldränder hatten. Das Ziel war die Entwicklung eines Modells in Form einer Regressionsgleichung, mit welcher die Gesamtpunktzahl von Waldrändern mit möglichst wenigen Parametern vorausgesagt werden kann. Zuerst wurden alle 16 Parameter des Waldrandschlüssels in das Modell integriert. Dann wurde jener Parameter entfernt, der im Modell den höchsten p-Wert erzielte und somit den geringsten Einfluss auf die Gesamtpunktzahl hatte. Dieses Vorgehen wurde so lange fortgeführt, bis im Modell nur noch signifikante Parameter enthalten waren. Für die Validie-

rung wurde das Modell an einem zweiten Datensatz – den von Spörri et al (2014) untersuchten Waldrändern – getestet, indem die Regressionsgleichung mit den signifikanten Parametern anhand dieser Daten neu berechnet wurde. Anschliessend wurden die Regressionsgleichungen mit dem Breusch-Pagan-Test auf Heterogenität, mit dem Durbin-Watson-Test auf Autokorrelation und mit dem Variance Inflation Factor (VIF) auf Multikollinearität getestet.

Da es sich bei den zwei Parametern «Krautsaumtyp» und «botanische Vielfalt der Waldbodenvegetation» nicht um metrische, sondern um ordinal skalierte Merkmale handelte, wurden die im Waldrandschlüssel zugeteilten Punktzahlen anstelle der im Feld eingetragenen Begriffe verwendet.

Resultate

Exposition und Wüchsigkeit des Standorts beeinflussen die Qualität

Von den 48 untersuchten, aufgewerteten Waldrändern wurden gemäss Waldrandschlüssel sechs Waldränder (13%) als sehr wertvoll (≥ 59 Punkte), 25 (52%) als wertvoll (49–58 Punkte), 16 (33%) als befriedigend (39–48 Punkte) und einer (2%) als ungenügend (29–38 Punkte) eingestuft. Sowohl Exposition als auch Wüchsigkeit des Standorts hatten einen signifikanten Einfluss auf die Qualität der Waldränder. Südexponierte Waldränder erreichten im Mittel eine signifikant höhere Punktzahl als nicht südexponierte (53.5 vs. 48.5 Punkte, $p = 0.006$; Tabelle 1). Die Waldränder an mageren Standorten hatten im Mittel eine signifikant höhere Punktzahl als jene an wüchsigen Standorten (53.2 vs. 48.8 Punkte, $p = 0.016$). Südexponierte Waldränder und Waldränder an mageren Standorten waren zudem artenreicher als nicht südexponierte Waldränder und solche auf wüchsigen Standorten. Süd-exponierte Waldränder hatten signifikant mehr Laubgehölzarten in der Baumschicht als nicht süd-exponierte, und Waldränder an mageren Standorten hatten signifikant mehr Gehölz- und Dornstraucharten in der Strauch- und Krautschicht als Waldränder an wüchsigen Standorten. An südexponierten Waldrändern waren die Krautsäume signifikant breiter und länger als an nicht südexponierten. An mageren Standorten waren die Strauchgürtellänge und die Belaubungsdichte signifikant grösser als an wüchsigen Standorten. An mageren Standorten waren Problemarten und invasive Neophyten signifikant weniger dominant als an wüchsigen (Tabelle 1).

Neophyten, Problemarten und Kleinstrukturen

An 14 (29%) der 48 untersuchten Waldränder wurden Neophyten der schwarzen Liste oder der Watch-Liste des nationalen Daten und Informations-

Parameter	Einheit	Exposition			Wüchsigkeit		
		nicht süd n=24	süd n=24	p	wüchsig n=24	mager n=24	p
Punktzahl	Punkte	48.5	53.5	0.006	48.8	53.2	0.016
Waldrandtiefe	m	16.4	18.5	0.248	17.9	17.0	0.734
Strauchgürteltiefe	m	9.1	10.2	0.477	9.2	10.1	0.338
Krautsaumtiefe	m	3.6	7.3	0.017	5.2	5.8	0.975
Strauchgürtellänge	%	83.8	83.3	0.983	77.7	89.4	0.010
Krautsaumlänge	%	77.1	94.0	0.002	87.4	83.7	0.491
Belaubungsdichte	%	90.9	93.8	0.848	89.0	95.7	0.036
Laubgehölzarten in der Baumschicht	Anzahl	5.6	7.2	0.043	6.5	6.3	0.754
Gehölzarten in der Strauch- und Krautschicht	Anzahl	16.6	16.8	0.804	14.9	18.5	<0.0001
Dornstraucharten in der Strauch- und Krautschicht	Anzahl	1.9	2.5	0.175	1.5	3.0	<0.001
Verzahnungsgrad	Wert	1.0	1.1	0.082	1.0	1.0	0.716
Anzahl Kleinstrukturen	Anzahl	7.3	9.0	0.178	8.0	8.4	0.893
Länge des vorgelagerten Strauchgürtels	%	5.8	9.5	0.268	5.8	9.5	0.268
Längenausdehnung Problemarten und invasive Neophyten	%	24.9	25.0	0.541	32.0	17.8	0.031
Invasive Neophyten in Baum-, Strauch- und Krautschicht	Anzahl	0.3	0.4	0.866	0.3	0.4	0.317

Tab 1 Ausprägung der im Waldrandschlüssel berücksichtigten Parameter an unterschiedlich exponierten beziehungsweise unterschiedlich wüchsigen Standorten. Angegeben sind die Mittelwerte. Signifikante Unterschiede sind fett markiert ($\alpha = 0.05$). Nicht aufgeführt sind die nicht metrischen Parameter «Krautsaumtyp» und «botanische Vielfalt der Waldbodenvegetation».

zentrums der Schweizer Flora³ gefunden. Die Exposition und die Wüchsigkeit des Standorts hatten keinen signifikanten Einfluss auf die Anzahl Neophytenarten in der Baum-, Strauch- und Krautschicht (Tabelle 1). An insgesamt acht Waldrändern wurde die Robinie (*Robinia pseudoacacia*) gefunden, an zwei der Seidige Hornstrauch (*Cornus sericea*), und an je einem der Sommerflieder (*Buddleja davidii*), das Drüsige Springkraut (*Impatiens glandulifera*), die Armenische Brombeere (*Rubus armeniacus*), die Kanadische Goldrute (*Solidago canadensis*) und die Schneebeere (*Symphoricarpos albus*).

Neben Neophyten kann sich das gehäufte Auftreten von anderen Arten negativ auf die Artenvielfalt auswirken. Die häufigsten Problemarten waren Brombeeren (*Rubus spp.*; an 44 der 48 untersuchten Waldränder), gefolgt von der Waldrebe (*Clematis vitalba*; 27), der Ackerkratzdistel (*Cirsium arvense*; 10), dem Adlerfarn (*Pteridium aquilinum*; 9) und dem Schilf (*Phragmites australis*; 3). Von Neophyten und/oder Problemarten stark oder sehr stark betroffen waren 18% der untersuchten Waldränder. Kaum betroffen waren 37% der Waldränder, das heisst, Neophyten und Problemarten waren auf maximal 10% des untersuchten Waldrandabschnitts vorhanden. Besonders oft war dies an Waldrändern auf mageren Standorten der Fall.

Sämtliche Waldränder wiesen mindestens eine Kleinstruktur auf, und 43 der 48 untersuchten Waldränder (90%) wiesen vier oder mehr Kleinstrukturen auf. Maximal wurden an einem Waldrand 24 Kleinstrukturen gezählt. Von den insgesamt 393 erfassten Objekten waren 48% Asthaufen, 27% Baumstrünke, 15% stehendes Totholz, 4% offene besonnte Bodenstellen, 3% umgekippte Wurzelteller, 2% Stein-

haufen und 1% Tümpel. Exposition und Wüchsigkeit des Standorts hatten keinen signifikanten Einfluss auf die Anzahl Kleinstrukturen (Tabelle 1).

Südexponierte Waldränder auf mageren Standorten am wertvollsten

Die aufgewerteten Waldränder des Stratums südexponiert & mager erreichten im Mittel signifikant höhere Punktzahlen als die Waldränder der anderen drei Straten (Abbildung 3). Signifikante Unterschiede zwischen den vier untersuchten Straten gab es ausserdem bei der «Krautsaumlänge», den «Gehölzarten in der Strauch- und Krautschicht», den «Dornstraucharten in der Strauch- und Krautschicht», der «Anzahl Kleinstrukturen» sowie der «Länge des vorgelagerten Strauchgürtels» (Tabelle 2). Insgesamt gab es nur an 15% der untersuchten Waldränder einen vorgelagerten Strauchgürtel: an fünf Waldrändern des Stratums südexponiert & mager und an zwei nicht südexponierten & wüchsigen Standorten. Aufgrund der ungleichen Stichprobenverteilung beim Parameter «Länge des vorgelagerten Strauchgürtels» wurden mit dem Tukey-Post-hoc-Test – im Gegensatz zum weniger konservativen Fisher-Post-hoc-Test – keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

Modell zur Bewertung von Waldrändern

Die lineare multiple Regressionsanalyse zeigte, dass von den insgesamt 16 Parametern des Waldrandschlüssels nur neun die Gesamtpunktzahl der aufgewerteten Waldränder signifikant beeinflussten ($R^2_{\text{adjusted}} = 0.906$; $p < 0.0001$). Bei den meisten dieser neun Parameter konnte ein starker Effekt auf die

³ www.infoflora.ch/de/flora/neophyten (22.7.2016)

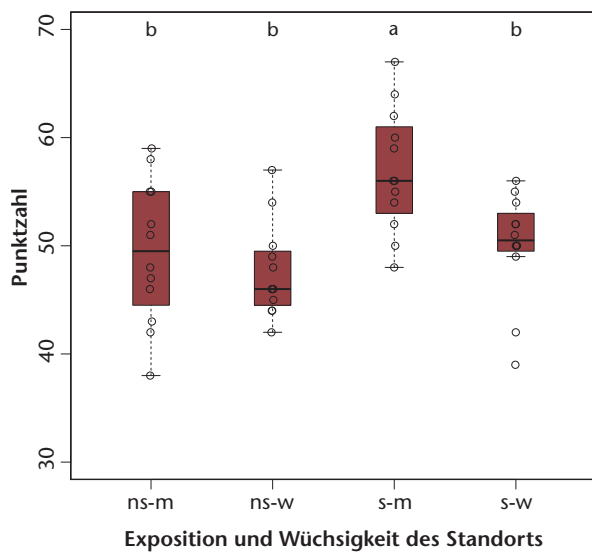


Abb 3 Punktzahlen der aufgewerteten Waldränder der vier Straten. Die an südexponiert & mageren Standorten (s-m) aufgewerteten Waldränder erreichten signifikant höhere Punktzahlen als jene an den nicht südexponiert & mageren (ns-m), nicht südexponiert & wüchsigen (ns-w) und südexponiert & wüchsigen (s-w) Standorten (n=12 pro Stratum). Straten mit unterschiedlichen Buchstaben waren signifikant verschieden.

Gesamtpunktzahl nachgewiesen werden (Tabelle 3). Die übrigen Parameter des Waldrandschlüssels zeigten keinen signifikanten Effekt. Mit der Regressionsgleichung

$$y = 24.9721 + b_1 \times x_1 + \dots + b_9 \times x_9$$

basierend auf den neun signifikanten Parametern, konnte die Punktzahl der 48 untersuchten Waldrän-

der sehr genau berechnet werden. 12.5% (6 Waldränder) wiesen keine, 45.8% (22) ± 1 Punkt, 27.1% (13) ± 2 Punkte und 14.6% (7) ± 3 Punkte Differenz gegenüber den im Feld mit dem Waldrandschlüssel ermittelten Punktzahlen auf, bei einem Mittelwert von 51 Punkten.

Die Anwendung der Regressionsgleichung auf den Datensatz von Spörri et al (2014) – mit den gleichen neun Parametern, aber mit den für diese Waldränder neu berechneten Regressionskoeffizienten – zeigte, dass das Modell nicht 1:1 auf einen anderen Datensatz angewendet werden kann. Trotz der der ähnlich guten Werte ($R^2_{\text{adjusted}} = 0.889$; $p < 0.0001$) waren die Punktedifferenzen insgesamt etwas grösser. So wiesen 30% (6) der 20 untersuchten Waldränder keine, 20% (4) ± 1 Punkt, 25% (5) ± 2 Punkte, 10% (2) ± 3 Punkte und 15% (3) ± 5 Punkte Differenz gegenüber den von Spörri et al (2014) im Feld mit dem Waldrandschlüssel ermittelten Punktzahlen auf, bei einem Mittelwert von 49.6 Punkten.

Diskussion

Exposition und Wüchsigkeit wichtig

Anders als bei der Untersuchung von Spörri et al (2014) hatten in der vorliegenden Untersuchung sowohl die Exposition als auch die Wüchsigkeit des Standorts einen signifikanten Einfluss auf die ökologische Qualität der Waldränder. Dass südexponierte Waldränder und Waldränder auf mageren Standorten eine höhere ökologische Qualität aufweisen als anders exponierte Waldränder oder solche

Parameter	Einheit	Straten				p
		ns-m n=12	ns-w n=12	s-m n=12	s-w n=12	
Punktzahl	Punkte	49.5_b	47.6_b	56.9_a	50.0_b	0.001
Waldrandtiefe	m	14.3	18.5	19.7	17.3	0.114
Strauchgürteltiefe	m	8.0	10.2	12.2	8.2	0.110
Krautsaumtiefe	m	3.5	3.8	8.1	6.5	0.105
Strauchgürtellänge	%	90.2	77.4	88.6	78.0	0.080
Krautsaumlänge	%	70.9_b	83.3_{ab}	96.5_a	91.6_{ab}	0.016
Belaubungsdichte	%	97.4	84.3	94.0	93.6	0.076
Laubgehölzarten in der Baumschicht	Anzahl	6.1	5.1	6.4	8.0	0.077
Gehölzarten in der Strauch- und Krautschicht	Anzahl	18.4_a	14.8_b	18.7_a	15.0_b	0.002
Dornstraucharten in der Strauch- und Krautschicht	Anzahl	2.8_a	1.0_b	3.2_a	1.9_{ab}	0.002
Verzahnungsgrad	Wert	1.0	0.9	1.1	1.1	0.343
Anzahl Kleinstrukturen	Anzahl	5.6_b	9.1_{ab}	11.2_a	7.0_{ab}	0.026
Länge des vorgelagerten Strauchgürtels	%	0.0_a	11.7_a	19.0_a	0.0_a	0.015
Längenausdehnung Problemarten und invasive Neophyten	%	17.5	32.3	18.0	31.8	0.163
Invasive Neophyten in Baum-, Strauch- und Krautschicht	Anzahl	0.3	0.3	0.4	0.4	0.745

Tab 2 Ausprägung der im Waldrandschlüssel berücksichtigten Parameter bei den vier untersuchten Kombinationen von Exposition und Wüchsigkeit des Standorts: nicht südexponiert & mager (ns-m), nicht südexponiert & wüchsig (ns-w), südexponiert & mager (s-m) und südexponiert & wüchsig (s-w). Angegeben sind die Mittelwerte. Fett markiert sind Parameter mit signifikanten Unterschieden zwischen mindestens zwei Straten ($\alpha = 0.05$). Werte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Nicht aufgeführt sind die nicht metrischen Parameter «Krautsaumtyp» und «botanische Vielfalt der Waldbodenvegetation».

Parameter	Regressions- koeffizient b_{1-9}	p
Strauchgürteltiefe	0.371	<0.0001
Krautsaumtiefe	0.460	<0.0001
Strauchgürtellänge	0.040	0.023
Krautsaumlänge	0.069	<0.0001
Laubgehölzarten in der Baumschicht	0.633	<0.0001
Gehölzarten in der Strauch- und Krautschicht	0.279	0.010
Dornstraucharten in der Strauch- und Krautschicht	1.226	<0.0001
Länge des vorgelagerten Strauchgürtels	0.049	0.001
Längenausdehnung Problemarten und invasive Neophyten	-0.046	<0.001

Tab 3 Mit den neun signifikanten Parametern des Waldrandschlüssels und der dazugehörigen Regressionsgleichung $y = 24.9721 + b_1 \times x_1 + \dots + b_9 \times x_9$ konnte die Punktzahl der aufgewerteten Waldränder sehr exakt berechnet werden ($R^2_{adjusted} = 0.906$; $p = <0.0001$). Die Werte x_1 – x_9 entsprechen den mit dem Waldrandschlüssel im Feld erhobenen Messwerten.

auf wüchsigen Standorten, deckt sich mit den Erfahrungen der von Spörri et al (2014) befragten Revierförster im Kanton Aargau. Der positive Einfluss der Südexposition auf die Waldrandqualität wurde oft postuliert (z.B. Hepenstrick & Krüsi 2013, Pro Natura 2013, Dürrenmatt et al 2009, Coch 1995) und zum Teil auch mit Daten belegt (z.B. Brändli & Ulmer 1999, Schütz & Krüsi 1994, Hondong et al 1993), wobei südexponierte Waldränder je nach Studie entweder aufgrund der höheren Gehölzartenvielfalt (Brändli & Ulmer 1999) oder aufgrund der mächtigeren Ausbildung des Strauchgürtels (Schütz & Krüsi 1994) eine höhere ökologische Qualität aufwiesen als anders exponierte Waldränder. Eine grössere Anzahl von Gehölzarten in der Strauch- und Krautschicht an südexponierten Waldrändern konnte in der vorliegenden Untersuchung nicht bestätigt werden. Einzig eine signifikant höhere Anzahl Laubgehölzarten in der Baumschicht wurde festgestellt. So gesehen weisen südexponierte Waldränder tendenziell trotzdem eine höhere Artenvielfalt auf als Waldränder mit einer anderen Exposition. Gemäss Brändli & Ulmer (1999) wiesen bei der Auswertung des zweiten Landesforstinventars süd- bis westexponierte Waldränder die höchste und nord- bis ostexponierte Waldränder die niedrigste ökologische Qualität auf.

Die Resultate der vorliegenden Studie, wonach aufgewertete Waldränder an mageren Standorten eine signifikant höhere Punktzahl und eine grössere Vielfalt von Gehölz- und Dornstraucharten in der Strauch- und Krautschicht aufweisen als solche an wüchsigen Standorten, weisen darauf hin, dass die Wüchsigkeit einen ähnlich wichtigen Standortfaktor wie die Exposition darstellt. Die grössere Vielfalt bei den Gehölzarten könnte damit zusammenhängen, dass es im Aargauer Jura, wo sich die Mehrzahl der mageren Standorte dieser Studie befindet, allgemein mehr Arten geben könnte als im Mittelland (Wohlgemuth 1996). In der Literatur (Pro

Natura 2013, Schütz & Krüsi 1994, Hondong et al 1993) wird die Wüchsigkeit des Standorts jedoch kaum als wichtiger Parameter für das ökologische Potential eines Waldrandes diskutiert, sondern eher im Zusammenhang mit dem erhöhten Auftreten von Problemarten nach einer Aufwertung oder der Häufigkeit der notwendigen Pflegeeingriffe erwähnt. Das grosse ökologische Potenzial von Waldrändern an mageren Standorten wird in keiner der uns bekannten Publikationen explizit erwähnt. Ein Grund für die bisher geringe Beachtung der Wüchsigkeit des Standorts könnte damit zusammenhängen, dass in der Schweiz bis heute keine detaillierte und flächendeckende Karte der Waldstandorte existiert, wobei die Situation aber diesbezüglich laufend besser wird.

Südexponierte und magere Standorte am günstigsten

Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit von erfolgreich verlaufenden Waldrandaufwertungen an südexponierten & mageren Standorten am grössten und das Risiko von Misserfolgen am kleinsten ist. Weisen die Waldränder einen vorgelagerten Strauchgürtel auf, ist die Wahrscheinlichkeit für eine günstige ökologische Bewertung besonders gross. Einerseits natürlich aufgrund des zusätzlichen Waldrandelements, das zu einer höheren Punktezahl führt, andererseits weil ein vorgelagerter Strauchgürtel eine gute Waldrandpflege und eine bloss extensive Nutzung des angrenzenden Freilandes indiziert und deswegen auch die übrigen Waldrandparameter tendenziell höhere Werte erzielen. Zu den am besten bewerteten Objekten gehörten zwei Waldränder – beide südexponiert und mager – mit vorgelagertem Strauchgürtel, welche von Pro Natura Aargau aufgewertet worden sind. Während der eine Waldrand zusätzlich durch eine Waldrandtiefe von 35 m überzeugte, fiel der andere durch ausgeprägte Buchten sowie einen gut ausgebildeten und gepflegten Krautsaum auf. Dieses Beispiel zeigt, dass die Art der Nutzung des angrenzenden Freilandes bei Waldrandaufwertungen von erheblicher Bedeutung ist.

Nicht optimale Standortbedingungen können bis zu einem gewissen Grad vermutlich durch eine sorgfältig durchgeführte Waldrandaufwertung und eine regelmässige Pflege kompensiert werden und somit trotzdem zu einer hohen ökologischen Bewertung führen. Die bessere ökologische Qualität der Waldränder des Stratum südexponiert & mager ist aber nicht nur auf den vorgelagerten Strauchgürtel zurückzuführen, sondern auch auf die Parameter «Krautsaumtiefe» und «Krautsaumlänge». Eine mögliche Erklärung könnte wiederum die Bewirtschaftungsintensität sein, welche an südexponierten & mageren Standorten tendenziell geringer ist als bei den übrigen Straten. Nicht überraschend, aber auf-

fällig ist die Häufung von südexponierten & mageren Waldrändern im nördlichen Kantonsteil (Abbildung 2), der gemäss Wohlgemuth (1996) floristisch artenreicher ist als der südliche Kantonsteil, was den Aufwertungserfolg eventuell zusätzlich positiv beeinflusst haben könnte.

Für den Misserfolg von Waldrandaufwertungen mitverantwortlich ist das Vorhandensein von Problemarten und invasiven Neophyten. Einheimische Pflanzenarten wie die Brombeere (*Rubus* sp.) oder die Waldrebe (*Clematis vitalba*) und Neophyten können von Waldrandaufwertungen unter Umständen erheblich profitieren. Bei einem starken Auftreten können sie den Erfolg der Aufwertung schmälern oder gar infrage stellen (Tidow et al 1997). Die Vermutung, dass solche Arten an Waldrändern an wüchsigen Standorten eher ein Problem darstellen – das heisst mit einer grösseren Deckung vorkommen (Pro Natura 2013, Tidow et al 1997) –, hat sich in dieser Untersuchung bestätigt. Die Wahrscheinlichkeit, dass nach Aufwertungsmassnahmen Problemarten und invasive Neophyten vorkommen und dominierende Bestände bilden, war in unserer Studie an wüchsigen Standorten signifikant grösser als an mageren, wobei die Exposition interessanterweise keine Rolle spielte.

Modell zur Bewertung von Waldrändern

Das Regressionsmodell hat gezeigt, dass für eine zuverlässige Abschätzung der ökologischen Qualität der untersuchten 48 Waldränder bereits neun der 16 im Waldrandschlüssel verwendeten Parameter genügen. Am wichtigsten waren die Parameter «Strauchgürteltiefe», «Krautsaumtiefe», «Krautsaumlänge», «Laubgehölzarten in der Baumschicht», «Dornstraucharten in der Strauch- und Krautschicht», «Längenausdehnung der Problemarten und invasiven Neophyten», gefolgt von den etwas weniger signifikanten Merkmalen – geordnet nach abnehmender Bedeutung – «Länge des vorgelagerten Strauchgürtels», «Gehölzarten in der Strauch- und Krautschicht» sowie «Strauchgürtellänge». Eine weitere Vereinfachung wäre durch Weglassen der Parameter «Strauchgürtellänge» und «Länge des vorgelagerten Strauchgürtels» möglich. Der Aufwand für die Beurteilung der Waldrandqualität im Feld würde sich dadurch – abgesehen von der Anreise – um etwa einen Drittel reduzieren.

Die Anwendung der Regressionsgleichung auf die Daten aus Spörri et al (2014) machte deutlich, dass das in dieser Studie entwickelte Regressionsmodell nicht ungeprüft auf einen anderen Datensatz angewendet werden sollte. Streng genommen gilt das Modell nur für aufgewertete Waldränder im Kanton Aargau, das heisst für ökologisch wertvolle Waldränder mit einer mittleren Punktzahl von etwa 50. Es ist damit zu rechnen, dass das Modell bei Waldrändern mit einer schlechteren ökologischen

Qualität, das heisst bei tieferen Punktzahlen, weniger gut funktioniert.

Fazit für die Praxis

Insgesamt erzielten die 48 untersuchten, aufgewerteten Waldränder im Kanton Aargau mit durchschnittlich 51 Punkten bei allen Beurteilungskriterien deutlich bessere Werte als die 410 von Krüsi et al (1997) und von Babbi & Krüsi (2015) untersuchten, nicht aufgewerteten Waldränder mit durchschnittlich 28.1 (n=410) beziehungsweise 25.5 (n=59) Punkten. Zusammenfassend kann von einem äusserst gelungenen Naturschutzprojekt gesprochen werden. Die in Spörri et al (2014) beschriebenen Erfahrungen aus rund 20 Jahren Waldrandaufwertungen im Kanton Aargau und die Erkenntnisse aus der vorliegenden Untersuchung sollten in künftigen Projekten unbedingt mitberücksichtigt werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass sowohl Exposition als auch Wüchsigkeit des Standorts das ökologische Potenzial von Waldrändern und damit die Chancen für erfolgreiche Waldrandaufwertungen massgeblich beeinflussen. Bei den finanziellen Unterstützungen der öffentlichen Hand gibt es bereits Programme, welche die Exposition als Kriterium verwenden (BVU 2009). Die vorliegende Studie legt den Schluss nahe, dass der aus den forstlichen Standortkarten abgeleitete Faktor Wüchsigkeit in künftigen Programmvereinbarungen möglichst auch berücksichtigt werden sollte.

In Zukunft sollten Waldrandaufwertungsprojekte bevorzugt an südexponierten & mageren Standorten durchgeführt werden, weil hier die Erfolgchancen am grössten und die Risiken für Misserfolge am kleinsten sind. Bei anderen Kombinationen von Exposition und Wüchsigkeit sind gute Resultate zwar weniger wahrscheinlich, aber – wie die vorliegende Studie gezeigt hat – keineswegs unmöglich. ■

Eingereicht: 15. März 2016, akzeptiert (mit Review): 8. Juli 2016

Dank

Wir danken der Abteilung Wald des Kantons Aargau für die Kommunikation mit den betroffenen Förstern und die Erlaubnis, die GIS-Daten zu nutzen, welche uns freundlicherweise vom AGIS Service Center zur Verfügung gestellt wurden. Dr. Ivo Kaelin und Dr. Peter Kauf vom Institut für Angewandte Simulation der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften unterstützten uns bei den statistischen Analysen. Wir danken auch dem Bundesamt für Umwelt, ohne dessen Unterstützung der vorliegende Artikel nicht zustande gekommen wäre.

Literatur

- BABBI M, KRÜSI BO (2015)** Ökologische Bewertung der Waldränder in der Schweiz. Vergleich der Methoden LFI und Krüsi, Umrechnung der LFI-Ökotonwerte in Krüsi-Punktzahlen und Beurteilung der Qualitätsentwicklung in den letzten 20 Jahren (LFI2–LFI4). Wädenswil: Zürcher Hochschule Angewandte Wissenschaften. 57 p.
- BAFU (2015)** Handbuch Programmvereinbarungen im Umweltbereich 2016–2019. Mitteilung des BAFU als Vollzugsbehörde an Gesuchsteller. Bern: Bundesamt Umwelt, Umwelt-Vollzug 1501. 266 p.
- BOLLMANN K, BERGAMINI A, SENN-IRLET B, NOBIS M, DUELLI P ET AL (2009)** Konzepte, Instrumente und Herausforderungen bei der Förderung der Biodiversität im Wald. Schweiz Z Forstwes 160: 53–67. doi: 10.3188/szf.2009.0053
- BRÄNDLI UB (2010)** Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL. 312 p.
- BRÄNDLI UB, ULMER U (1999)** Naturschutz und Erholung. In: Brasel P, Brändli UB, editors. Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993–1995. Birmensdorf: Eidg Forsch.anstalt WSL. pp. 279–329.
- BUWAL (2004)** Waldprogramm Schweiz (WAP-CH). Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Schriftenreihe Umwelt 363. 117 p.
- BVU (2009)** Waldrandregeln 2009. Aarau: Departement Bau Verkehr Umwelt. 6 p.
- COCH T (1995)** Waldrandpflege. Grundlagen und Konzepte. Radebeul: Neumann. 240 p.
- DÜRRENMATT R, EISENHUTA, BEER W (2009)** Erfassung des Ökologischen Potenzials der Waldränder im Kanton Bern. Schweiz Z Forstwes 160: 275–281. doi: 10.3188/szf.2009.0275
- FLÜCKIGER PF (1999)** Der Beitrag von Waldrandstrukturen zur regionalen Biodiversität. Basel: Uni Basel, PhD Thesis. 314 p.
- HEPENSTRICK D, KRÜSI BO (2013)** GIS-basierte Priorisierung von Waldrandaufwertungen mit ökologischen und ökonomischen Kriterien. Wädenswil: Zürcher Hochschule Angewandte Wissenschaften. 41 p.
- HONDONG H, LAGNER S, COCH T (1993)** Untersuchungen zum Naturschutz an Waldrändern. Zürich: Bristol-Stiftung. 196 p.
- KRÜSI BO, SCHÜTZ M, TIDOW S (1997)** Waldränder in der Schweiz. Ökologischer Zustand, botanische Vielfalt und Aufwertungspotenzial. Schweizer Wald 97 (4): 5–19.
- PRO NATURA (2013)** Waldränder ökologisch aufwerten. Leitfaden für die Praxis. Basel: Pro Natura, Beiträge zum Naturschutz in der Schweiz 33. 42 p.
- SCHMIDER P, WINTER D, LÜSCHER P (2003)** Wälder im Kanton Thurgau. Frauenfeld: Thurgauische Naturforschende Gesellschaft. 268 p.
- SCHÜTZ M, KRÜSI BO (1994)** Sind südexponierte Waldränder besonders wertvoll? Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anst WSL, Inf.bl Forsch.bereich Landsch 20: 1–2.
- SPÖRRI K, BABBI M, KRÜSI BO (2014)** 20 Jahre ökologische Aufwertung von Waldrändern im Kanton Aargau: erste Erfolgskontrolle. Schweiz Z Forstwes 165: 313–320. doi: 10.3188/szf.2014.0313
- STOCKER R, BURGER T, ELSENER O, LIECHTI T, PORTMANN-ORLOWSKI K ET AL (2009)** Die Waldstandorte des Kantons Aargau. Aarau: Departement Bau Verkehr Umwelt. 226 p.
- TIDOW S, SCHÜTZ M, KRÜSI BO (1997)** Probleme bei Bewertung und Pflege von Waldrändern. Birmensdorf: Eidg Forsch.anst WSL, Inf.bl Forsch.bereich Landsch.ökol 33: 1–4.
- WOHLGEMUTH T (1996)** Ein floristischer Ansatz zur biogeographischen Gliederung der Schweiz. Bot Helv 106: 227–260.

Revalorisation des lisières: influences de l'exposition et de la fertilité du milieu

Les lisières larges avec une grande variété d'espèces sont rares en Suisse. Pour cette raison, la Confédération soutient depuis quelques années l'amélioration écologique des lisières. Il faut de bonnes connaissances sur les conditions stationnelles qui influencent la revalorisation des lisières afin d'utiliser les moyens limités de manière optimale. Nous avons examiné 48 lisières revalorisées dans le canton d'Argovie afin de déterminer quelles influences l'exposition et la fertilité de la station ont sur la réussite de la revalorisation. Les résultats démontrent qu'aussi bien l'exposition que la fertilité de la station ont une influence significative sur la qualité des lisières revalorisées. La qualité des lisières revalorisées était significativement meilleure sur les stations exposées au sud et maigres que pour les autres expositions et des stations plus fertiles. La fertilité de la station pour les expositions autres que celle au sud n'a pas d'influence sur la qualité écologique des lisières revalorisées. La probabilité que des plantes problématiques ou des néophytes envahissantes apparaissent après les mesures de revalorisation et forment des peuplements dominants était significativement plus petite sur des stations maigres que fertiles; par contre l'exposition ne joue aucun rôle. A l'avenir, les projets de revalorisation des lisières devraient être réalisés de préférence sur les stations orientées au sud et maigres. De bons résultats pour des stations avec d'autres orientations ou fertiles sont moins probables, quoique pas impossibles.

Upgrading of forest edges: impacts of orientation and site fertility

Wide, species-rich forest edges are rare in Switzerland. For some years now, the ecological improvement of forest edges has therefore been encouraged by the federal government. In order to make optimal use of the limited resources, we need a good knowledge of the site factors that influence the success of upgrading treatments. We studied 48 improved forest edges in Canton Aargau to understand the impacts of orientation and site fertility on the success of the improvement measures. The results showed that both orientation and site fertility had a significant impact on the quality of the enhanced forest edges. On south-facing and nutrient-poor sites, the ecological quality of the improved forest edges was significantly better than on nutrient-rich sites oriented towards other directions. On sites which were not south-facing fertility had no significant effect on the ecological quality of the improved forest edges. On nutrient-poor sites, the risk that problematic or invasive plant species become dominant after upgrading treatments was much smaller than on nutrient-rich sites. The orientation of the forest edge, on the other hand, had no significant effect on that risk. In the future, therefore, forest edge enhancement projects should preferably be carried out on south-facing and nutrient-poor sites. On sites with other expositions or with high fertility, successful upgradings are less likely but not impossible.