

Waldverjüngung und Totholz in Sturmflächen 10 Jahre nach Lothar und 20 Jahre nach Vivian

Thomas Wohlgemuth
Kathrin Kramer

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)*
Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)

Waldverjüngung und Totholz in Sturmflächen 10 Jahre nach Lothar und 20 Jahre nach Vivian

Mittels einer Stichprobe von 90 Windwurfflächen wurde die Verjüngungssituation 10 Jahre nach Lothar (1999) und 20 Jahre nach Vivian (1990) untersucht. Die mindestens 3 ha grossen Flächen wiesen einen Totalschaden auf und sind vom Jura über das Mittelland und die Voralpen bis in die Alpen verteilt (Lotharflächen: mittlere Höhenlage 860 m ü. M., Vivianflächen: 1428 m ü. M.). Auf den belassenen und den geräumten Lotharflächen belief die mittlere Stammzahl 7644 beziehungsweise 10 786 Stämme pro ha. Deutlich kleiner waren dagegen die Mittelwerte der höher gelegenen Vivianflächen mit 2572 in belassenen und 4600 Stämmen pro ha in geräumten Flächen. Der Anteil der Vorverjüngung belief sich in den Lotharflächen auf einen Drittel der gesamten Verjüngung und in den Vivianflächen auf einen Zehntel. Die zehn grössten Bäume pro Windwurffläche wiesen nach Lothar und Vivian mit 6.3 bzw. 6.5 m ähnliche Höhen auf. Die häufigsten Baumarten nach Lothar waren Buche (*Fagus sylvatica*), Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*), Esche (*Fraxinus excelsior*) und Fichte (*Picea abies*) und nach Vivian Fichte, Bergahorn und Vogelbeere (*Sorbus aucuparia*). In den Sturmflächen nahm die Verjüngungsdichte mit dem Boden-pH-Wert zu und mit der Höhe über Meer und dem Anteil an Hochstauden, Himbeeren und Brombeeren ab. Das Totholzvolumen belief sich in den belassenen Flächen im Mittel auf 266 (Lothar) und 285 m³ pro ha (Vivian). In geräumten Flächen lag überraschend viel Totholz, mit Werten von 74 bzw. 76 m³ pro ha. Totholz als Verjüngungssubstrat spielte vor allem in Wäldern der höheren Lagen eine Rolle, und hier besonders für Fichten. Natürliche Verjüngung kommt früher oder später in allen untersuchten Sturmflächen auf, doch ist zur Erreichung von spezifischen Bestockungszielen besonders der verdämmenden Begleitvegetation vorzubeugen. Unsere Ergebnisse stellen eine für Mitteleuropa relevante Referenz zur Einordnung von Verjüngungssituationen nach Windwurf dar.

Keywords: direct regrowth, elevation, no intervention, salvage logged, soil pH, stem density
doi: 10.3188/szf.2015.0135

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail thomas.wohlgemuth@wsl.ch

Die Orkane Lothar (1999) und Vivian (1990) verursachten in der Schweiz die grössten Waldschäden nach Sturmereignissen in den letzten 150 Jahren (Usbeck et al 2010). Sie hinterließen 13 und 5 Mio. m³ Schadholz und lösten Buchendruckeradationen aus, die in den nachfolgenden Jahren nochmals etwa dieselbe Menge an Käferholz zur Folge hatten (Meier et al 2013). Die beiden Orkane widerspiegeln die Häufung von grossen, sturmbedingten Waldschäden in Zentral- und Nordeuropa gegen die Jahrtausendwende (Schelhaas et al 2003) und bis heute (Seidl et al 2014). Es liegt in der Natur der Sache, dass nach unregelmässig auftretenden Störungen wie Sturm oder Feuer in der Regel nur einzelne, ausgewählte Schadenflächen wissenschaftlich untersucht werden. Daher gibt es nur wenige, für grössere Regionen repräsentative Angaben zum Auf-

kommen von natürlicher Verjüngung nach solchen Ereignissen. Die diesbezüglich grösste Untersuchung fand in Lothringen statt, wo 107 fünfjährige Sturmflächen in einem Gebiet von ca. 25 000 km² untersucht wurden. Dabei zeigte sich, dass die Verjüngungsdichte am besten mit einem hohen Boden-pH-Wert und der Nähe zum Sturmflächenrand korreliert (Van Couwenberghe et al 2011). In einer breit angelegten Studie zur Waldregeneration nach den verheerenden Bränden im Yellowstone-Nationalpark 1988 in den USA wurde ein erstaunlich hoher Anteil an direktem Einwuchs der Schlussbaumarten festgestellt (Turner et al 2003), was die Frage aufwirft, wie bedeutsam Pionier- beziehungsweise Vorwaldarten nach Windwürfen sind. Zur Frage des Totholzanteils auf Sturmflächen mit unterschiedlicher Behandlung gibt es ebenfalls nur wenige Literaturangaben. Zwei

Arbeiten in Schweden fanden in unterschiedlich stark geräumten Schadenflächen zwischen 13 und 42 m³ Totholz pro ha (Gibb et al 2005, Eräjää et al 2010).

Im Rahmen der Untersuchungen nach Vivian und Lothar publizierten die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) und das Bundesamt für Umwelt (BAFU) verschiedene Forschungsresultate zur Wiederbesiedlung von Sturmflächen (Schönenberger et al 2002, Angst et al 2004, Brang et al 2015, dieses Heft). Eine Erkenntnis aus den beiden Untersuchungen war, dass in Tieflagen rasch wieder Wald aufkommt, sofern die Begleitvegetation den Besiedlungsprozess nicht behindert, und dass die natürliche Verjüngung in Hochlagen infolge der kürzeren Vegetationszeit und des raschen Aufkommens von Hochstauden oder Reitgras (*Calamagrostis*) länger dauert. Die geräumten Vivianversuchsflächen wiesen tendenziell mehr Naturverjüngung auf (Schönenberger et al 2003), und der Anteil der Vorverjüngung machte zehn Jahre

nach Vivian je nach Versuchsort zwischen 9 und 52% der gesamten Stammzahl aus (Wohlgemuth et al 2002b). Die Resultate aus den wenigen Versuchsflächen variierten stark, weshalb nur beschränkt allgemeingültige Aussagen möglich waren. Diese Ungewissheit über die Generalität von Verjüngungsprozessen nach Windwurf gab Anlass für die vorliegende Studie, welche anhand einer einmaligen, möglichst repräsentativen Zustandserhebung auf grossen Sturmflächen solide Aussagen ermöglichen soll, dies 10 beziehungsweise 20 Jahre nach den Sturmereignissen Lothar und Vivian. Folgende Fragen wurden hierzu gestellt:

baumverjüngung

- Wie zahlreich und wie hoch ist die natürliche Baumverjüngung 10 beziehungsweise 20 Jahre nach dem Sturm?
- Welche Faktoren fördern die natürliche Baumverjüngung auf Sturmflächen, welche verhindern sie? Welchen Einfluss hat insbesondere die Nachbehandlung (Räumen/Belassen)?
- Welche Baumarten verjüngen sich am häufigsten nach Windwurf?
- Welche allgemeingültigen Folgerungen sind möglich?

Totholz

- Wie viel Totholz ist in geräumten und belassenen Flächen vorhanden?
- Wie stark ist das Totholz 10 beziehungsweise 20 Jahre nach Windwurf zersetzt?
- Wie häufig ist die Baumverjüngung auf Totholz in den 20 Jahre alten Vivianflächen?

Methoden

Stichprobe

Die Grundlage für die Definition der Stichprobe bildeten die mithilfe von Luftbildern erstellten Inventare der Total- und Teilschadenflächen (nach Vivian: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft [BUWAL]; nach Lothar: Scherrer Ingenieurbüro AG 2001), wobei für die Wahl der Stichprobenflächen folgende Bedingungen erfüllt sein mussten: 1) nur Totalschadenfläche, 2) Fläche ≥ 3 ha, 3) grob repräsentativ bezüglich Standort oder vorherrschender Hauptbaumart: Buchen-, Tannen-Buchen-, Tannen-Fichten- und Fichtenwald, 4) repräsentativ bezüglich der drei geografischen Regionen Jura, Mittelland und Alpen, 5) keine Aufforstung/Pflanzung nach den Sturmereignissen, 6) repräsentativ bezüglich Varianten, d.h. geräumt oder belassen, 7) möglichst ohne Jungwaldpflege seit dem Sturmereignis.

Diese Bedingungen erfüllten 66 Lotharflächen (43 geräumt, 23 belassen) und 24 Vivianflä-

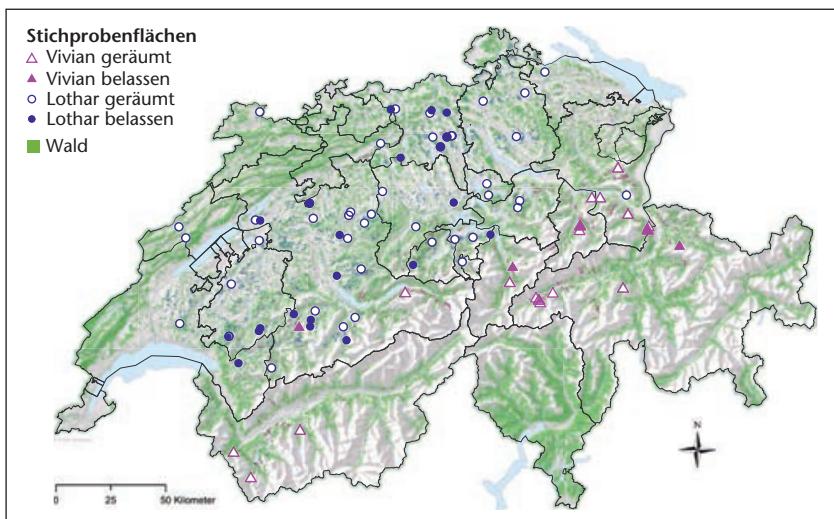


Abb 1 Lokalität der 90 Stichprobenflächen (24 Vivian- und 66 Lotharflächen).

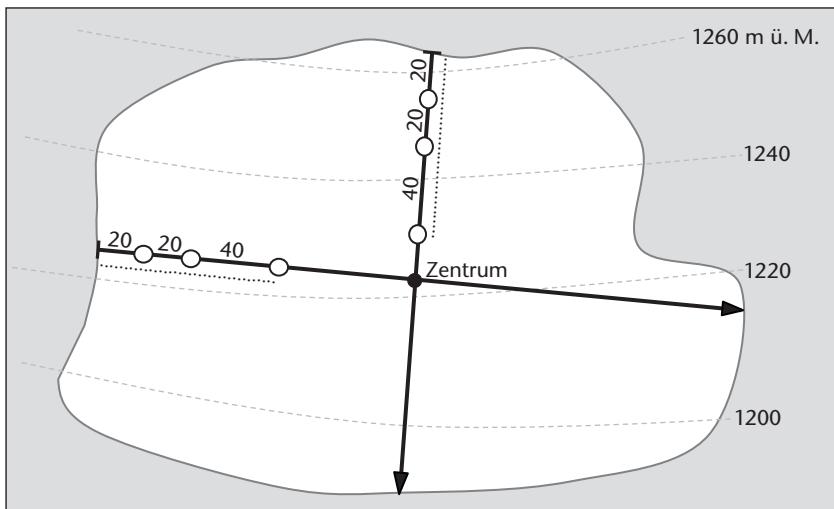


Abb 2 Anordnung der Probekreise für die Verjüngungsaufnahmen (Kreise; 20, 40 und 80 m vom Sturmflächenrand entfernt) und der Stichprobe für die Vegetationszuordnung (Punkte) auf den Sturmflächen.

	Region					Mittlere Höhenlage (m ü. Meer)
	Jura	Mittelland	Voralpen	Alpen	Total	
Vivian						
belassen			1	5	6	1426
geräumt			3	15	18	1429
<i>Total</i>			4	20	24	1428
Lothar						
belassen	3	9	11		23	908
geräumt	5	24	14		43	834
<i>Total</i>	8	33	25		66	860
Vivian und Lothar						
belassen	3	9	12	5	29	1016
geräumt	5	24	17	15	61	1010
<i>Total</i>	8	33	29	20	90	

Tab 1 Anzahl Windwurfflächen nach Sturmereignis, Behandlung und Region sowie mittlere Höhenlage.

chen (18 bzw. 6) in einem Gebiet von ca. 20 000 km² (Tabelle 1, Abbildung 1). Geografische Lücken im Jura und in der Nordostschweiz können auf das Fehlen grosser Sturmflächen in diesen Regionen zurückgeführt werden. Im Gegensatz zu den vielen Lotharflächen im Mittelland und in der Hügelzone der Voralpen, die im Mittel auf 860 m ü. M. liegen, beschränken sich die Vivianflächen auf Gebiete entlang der Voralpen und Teile der Zentralalpen. Entsprechend liegen diese Stichprobenflächen rund 570 m höher, auf im Mittel 1428 m ü. M.

Zielvariablen: Baumverjüngung und Totholz

In jeder Stichprobenfläche wurden die Koordinaten von sechs Probekreisen bestimmt, jeweils drei entlang eines vertikalen Transeks, der Hangfalllinie von oben nach unten folgend, und drei entlang eines horizontalen Transeks, der Höhenlinie folgend (Abbildung 2). Der Abstand der drei Probekreise zum Sturmflächenrand betrug auf beiden Transekten 20, 40 und 80 m, um die vermutete Abnahme der Stammzahldichte mit zunehmender Entfernung von den Samenbäumen zu untersuchen. Die Probekreiszentren wurden im Büro festgelegt und im Feld mittels GPS (Garmin Colorado 300) einge messen. In Höhenlagen oberhalb von 1200 m ü. M. erfolgten die Erhebungen in der Regel in 50 m² und in tieferen Lagen in 20 m² grossen Kreisen (Horizontalflächenprojektion), um der Abnahme der Verjüngungsdichte mit zunehmender Höhe Rechnung zu tragen (Wohlgemuth et al 2008, Bachofen 2009). In allen Vivianflächen, auch jenen vier unterhalb 1200 m ü. M., betrug die Grösse der Probekreise aus Konsistenzgründen 50 m². Für alle Bäume und Sträucher mit einer Mindesthöhe von 20 cm und einer Stammbasis innerhalb des Probekreises wurden folgende Parameter erhoben: Art, Höhe (cm), Brusthö heindurchmesser (BHD; mm) und Substratunterlage (Boden oder Totholz). Bei Stockausschlägen war je-

weils der höchste Trieb für die Vermessung massgebend. Die Zähl- und Messdaten beziehen sich auf den Zustand der Pflanzen am Ende der Vegetationsperiode 2009. Um festzustellen, ob eine Gehölzpflanze vor dem Windwurfereignis oder danach gekeimt war (Vor- oder Nachverjüngung), wurde das Alter entweder mittels Zählung der Astquirle oder Knospenschuppennarben oder durch Schätzung eruiert. Während bei Nadelbäumen eine derartige Beurteilung recht zuverlässig ist, bleiben bei Laubbäumen oft Zweifel. In solchen Fällen wurde das Alter durch Jahrringzählungen bei Bäumen vergleichbarer Grösse ausserhalb der Probekreise im Analogieschluss zugeordnet. Sämtliche Stammzahlen sind auf Hektarwerte umgerechnet.

In jedem Probekreis wurde liegendes und stehendes Totholz von mindestens 10 cm Dicke und 10 cm Länge erfasst, sofern das Holz nicht bereits von Humus überdeckt war. Das Volumen jedes Holz stücks errechnete sich aus der Kegelstumpfformel.

Jedes Holzstück wurde einer der folgenden drei Totholzkategorien zugeordnet: 1) Stamm liegend, 2) Stamm stehend <1.3 m und 3) Stamm stehend ≥1.3 m. Alle Kubaturen sind auf Werte pro Hektare umgerechnet.

Die Definition des Zersetzunggrades jedes Holzstückes basiert auf der achtstufigen Skala von Zielonka (2006a), unter Berücksichtigung folgender Parameter: Eindringtiefe des Taschenmessers (0 cm bis durchgehend weich), Form des Stammquerschnittes (rund, abgeflacht), Präsenz/Absenz von Ästen, Präsenz/Absenz von Rinde.

Erklärende Variablen: Boden, Vegetationsbedeckung

In jedem Probekreis wurde je eine Bodenprobe aus dem humosen Oberboden (Ah-Horizont) und der mineralischen Bodenschicht für die pH-Bestimmung (0.01 M CaCl₂) entnommen (1080 Proben).

Entlang der zwei Transekte wurde vom Sturmflächenrand bis zum Zentrum des dritten Probekreises (je 80 m) in Abständen von 2 m eine Zuordnung der Vegetation exakt am jeweiligen Messpunkt aus der Vogelperspektive vorgenommen, unter Berücksichtigung folgender Kategorien: Baum (Überdeckung/Gehölzüberschirmung), Adlerfarn, andere Farne, Brombeeren, Himbeeren, Beeren (Gattung *Vaccinium*), Grasartige (Gräser, Binsen, Seggen), Hochstauden (inkl. anderer Vegetation), keine Vegetation. Pro Stichprobenfläche resultierten auf diese Weise 82 (2 × 41) Vegetationszuordnungen. Aus der Anzahl Zuordnungen ergaben sich prozentuale Anteile der Kategorien pro Windwurffläche. Als weitere Parameter wurden die Exposition, die Neigung, die Höhenlage, die Nähe der Probekreise zum Sturmflächenrand und der Verbiss (Jahresverbiss am Terminaltrieb, artweise als Prozent verbissener Pflanzen) erhoben.

Datenanalyse

Die Beschreibung der Verjüngungssituation 10 beziehungsweise 20 Jahre nach Windwurf bezieht sich auf alle 90 Stichprobenflächen. Dabei basieren die hier präsentierten Analysen auf den gemittelten Werten der sechs Probekreise pro Stichprobenfläche. Vergleiche zwischen Lothar- und Vivianflächen sowie zwischen den Behandlungen «geräumt» und «belassen» nehmen jeweils Bezug auf die mittleren Werte der betreffenden Stichprobenflächen.

Zusammenhänge der Verjüngungsdichten mit verschiedenen Umweltfaktoren wurden mittels linearer Regressionsmodelle berechnet. Komplexere statistische Analysen unter gleichzeitiger Berücksichtigung mehrerer Variablen sind in einer anderen Arbeit publiziert (Kramer et al 2014). Alle statistischen Auswertungen und Darstellungen der Felddaten erfolgten mit der Open-Source-Statistiksoftware R Version 3.0.2 (R Development Core Team 2013).

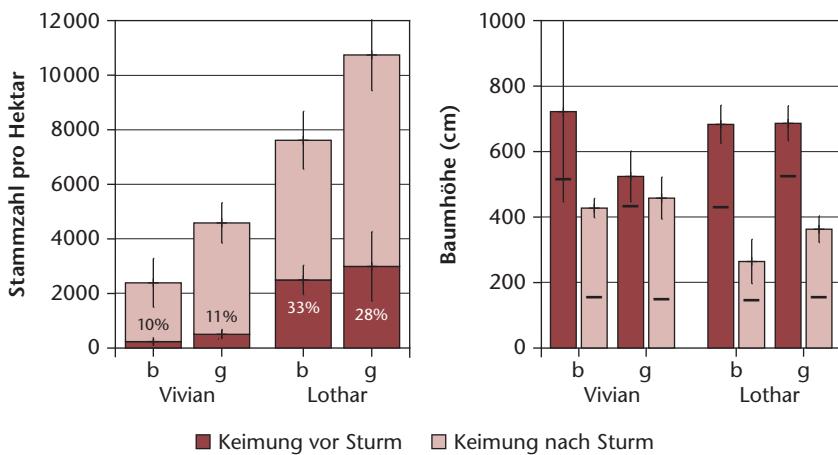


Abb 3 Verjüngungsdichte (links) und Baumhöhen (rechts) in Vivian- (20-jährig) und Lotharflächen (10-jährig), unterteilt nach Behandlung (b: belassen, g: geräumt) und Zeitpunkt der Keimung (vor oder nach dem Sturm). Links: mittlere Stammzahl der Bäume ≥ 20 cm Höhe; die Prozentzahlen geben den Anteil der Vorverjüngung an der Gesamtdichte an. Rechts: mittlere Höhe der zehn höchsten Bäume/Sträucher pro Stichprobenfläche (Säulen). Vertikale Striche geben die Standardfehler an und horizontale Striche (rechts) die mittleren Höhen aller Gehölzpflanzen.

Resultate

Verjüngungsdichte

Insgesamt wurden 12 003 Bäume und 1395 Sträucher mit einer Höhe von mindestens 20 cm gezählt (total 13 398 Individuen) und 1689 Totholzstücke vermessen. In den Vivianflächen standen 20 Jahre nach dem Sturmereignis im Durchschnitt 2572 Bäume (Median: 1433) und 728 Sträucher pro ha in belassenen und 4600 Bäume (Median: 3516) und 580 Sträucher in geräumten Flächen (Abbildung 3, links, Tabelle 2). Die Werte für die Baumdichte reichten von 700 bis 78 073 Stämmen pro ha, wobei der Unterschied der Mittelwerte zwischen belassenen und geräumten Flächen nicht signifikant war (t-Test: $p=0.17$). Die Verjüngungsdichten in den jüngeren und generell tiefer gelegenen Lotharflächen waren im Mittel zwei- bis dreimal so hoch wie in den Vivianflächen (t-Test: geräumte Flächen $p=0.07$; belassene Flächen: $p=0.02$). In belassenen Flächen wurden im Durchschnitt 7644 Bäume pro ha gezählt (Median: 5917) und in geräumten Flächen 10 786 (Median: 7333), wobei die Werte in den einzelnen Flächen von 750 bis 78 083 Stämmen pro ha reichten. Auch in den Lotharflächen unterschieden sich die Dichten zwischen belassenen und geräumten Flächen nicht signifikant (t-Test: $p=0.12$). Dichten von weniger als 1000 Bäumen pro ha wurden nur in einer Vivian- und in zwei Lotharflächen gefunden. Bezuglich der Verjüngungszahlen herrschte auf den insgesamt 90 Stichprobenflächen eine grosse Heterogenität, die sich an den grossen Standardfehlern ablesen lässt. Die Unterschiede zwischen den Verjüngungsdichten in Vivian- und Lotharflächen springen auch geografisch ins Auge (Abbildung 4). Im Mittelland variieren die Stammzahlen der Lotharflächen stark, mit auffällig grossen Werten im Aargauer Mittelland sowie im Berner Oberland.

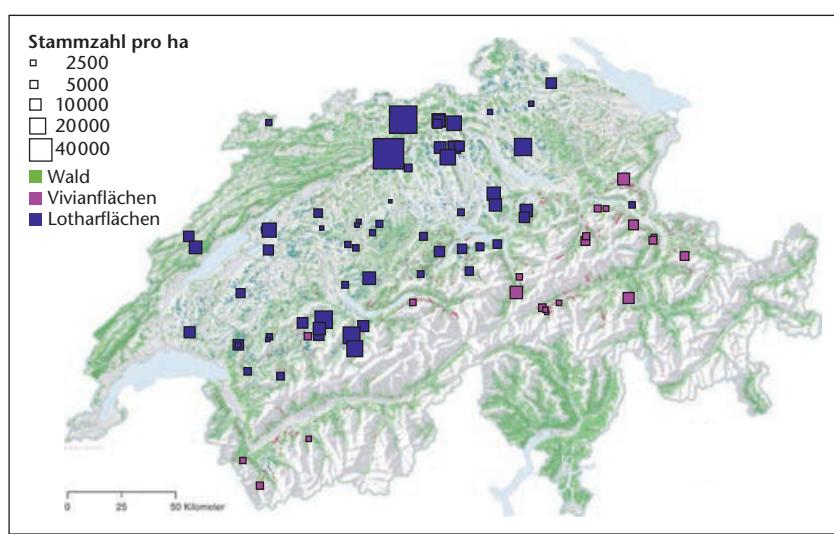


Abb 4 Stammzahlen in den 90 Stichprobenflächen.

Baum- und Straucharten

Im Vergleich zu den Vivianflächen wuchsen in den Lotharflächen generell mehr Laubbäume. Die schattentoleranten Arten Buche (*Fagus sylvatica*) und Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*) sowie auch die Esche (*Fraxinus excelsior*) waren nicht nur zahlreich in der Vorverjüngung, sondern wiesen als Erstbesiedler nach dem Sturm grössere Dichten auf als Birke (*Betula pendula*), Weide (*Salix* sp.) und Aspe (*Populus tremula*). Unter den zahlreichsten Sträuchern befanden sich Roter Holunder (*Sambucus racemosa*), Alpenerle (*Alnus viridis*) und Geissblatt (*Lonicera* sp.) in Vivianflächen und Geissblatt, Roter Holunder und Hasel (*Corylus avellana*) in Lotharflächen.

Vorverjüngung

In den Vivianflächen machte die Vorverjüngung nur 10% in belassenen und 11% in geräumten Flächen an der gesamten Verjüngung aus (Abbildung 3).

Art	Vivian				Art	Lothar			
	belassen		geräumt			belassen		geräumt	
	vor (St./ha)	nach (St./ha)	vor (St./ha)	nach (St./ha)		vor (St./ha)	nach (St./ha)	vor (St./ha)	nach (St./ha)
Bäume					Bäume				
Fichte	150 ± 68	922 ± 437	369 ± 166	1720 ± 424	Buche	862 ± 311	1739 ± 703	1543 ± 778	2440 ± 1056
Bergahorn	17 ± 17	189 ± 70	6 ± 3	765 ± 461	Bergahorn	396 ± 150	915 ± 395	381 ± 248	1067 ± 240
Vogelbeere	33 ± 21	206 ± 107	54 ± 24	478 ± 172	Fichte	628 ± 178	751 ± 335	288 ± 96	870 ± 250
Lärche		478 ± 471	13 ± 10	235 ± 139	Esche	139 ± 88	210 ± 127	360 ± 254	1313 ± 333
Birke		28 ± 22	39 ± 20	370 ± 195	Vogelbeere	153 ± 63	548 ± 217	56 ± 19	460 ± 129
Weide	11 ± 7	211 ± 98		187 ± 37	Tanne	188 ± 81	412 ± 207	119 ± 32	278 ± 74
Esche		17 ± 11		167 ± 161	Weide	4 ± 4	295 ± 91	34 ± 18	311 ± 65
Buche	11 ± 11	11 ± 11	17 ± 13	137 ± 118	Birke	16 ± 9	44 ± 21	58 ± 23	337 ± 265
Aspe		50 ± 34		19 ± 9	Hagebuche	4 ± 4	11 ± 11	68 ± 51	221 ± 165
Tanne	11 ± 11	22 ± 16	4 ± 4	7 ± 6	Vogelkirsche	47 ± 26	43 ± 30	30 ± 15	76 ± 28
Grauerle		17 ± 17		2 ± 2	Eiche		72 ± 43		122 ± 34
Bergföhre		11 ± 11			Aspe			4 ± 3	159 ± 121
Ulme				9 ± 9	Mehlbeere	8 ± 4	61 ± 34	3 ± 2	19 ± 10
Föhre				2 ± 2	Eibe	36 ± 20		27 ± 13	4 ± 4
Mehlbeere			2 ± 2		Spitzahorn			12 ± 12	35 ± 28
					Linde	14 ± 11	14 ± 11	4 ± 3	6 ± 3
					Föhre		14 ± 14		16 ± 7
					Traubenkirsche				21 ± 21
					Lärche			2 ± 2	14 ± 8
					Ulme			8 ± 6	2 ± 2
					Douglasie	4 ± 4	4 ± 4		6 ± 4
					Feldahorn				
					Nussbaum				6 ± 3
					Speierling		4 ± 4	2 ± 2	
					Grauerle				4 ± 4
					Roteiche	4 ± 4			
					Strobe		4 ± 4		
Summe	233 ± 82	2161 ± 898	502 ± 175	4098 ± 742	Summe	2503 ± 539	5141 ± 1064	2999 ± 1275	7787 ± 1314
Summe	2394 ± 916		4600 ± 704		Summe	7644 ± 1292		10786 ± 2207	
Sträucher					Sträucher				
Rot. Holunder	72 ± 35	456 ± 156	13 ± 5	165 ± 52	Geissblatt	59 ± 36	158 ± 97	21 ± 9	226 ± 86
Alpenerle	28 ± 28	89 ± 58	19 ± 15	174 ± 138	Rot. Holunder	75 ± 32	115 ± 41	10 ± 5	203 ± 47
Geissblatt	11 ± 7	61 ± 36	13 ± 7	107 ± 48	Hasel	17 ± 15	57 ± 31	2 ± 2	91 ± 36
Hasel		11 ± 7	2 ± 2	39 ± 19	Pulverholz	51 ± 51	83 ± 83		2 ± 2
Rose spec.				48 ± 29	Rose spec.		65 ± 33		22 ± 11
					Schw. Holunder	7 ± 7	18 ± 13	1 ± 1	47 ± 20
					Gem. Schneeball		11 ± 8		52 ± 41
					Alpenerle		5 ± 4		42 ± 41
					Hornstrauch				41 ± 24
					Gem. Pfaffenh.				33 ± 27
					Alpenkreuzdorn	1 ± 1	17 ± 17		
					Goldregen	1 ± 1	10 ± 10		
					Johannisbeere		7 ± 5		2 ± 2
					Weissdorn				8 ± 5
					Stechpalme				4 ± 4
					Seidelbast				2 ± 2
					Sommerflieder				2 ± 2
					Berberitze		1 ± 1		
					Wachholder		1 ± 1		
					Woll. Schneeball				1 ± 1
Summe	111 ± 59	617 ± 193	46 ± 19	533 ± 151	Summe	212 ± 73	550 ± 169	33 ± 10	776 ± 132
Summe	728 ± 250		580 ± 165		Summe	762 ± 230		809 ± 133	

Tab 2 Verjüngungsdichte (Mittelwert ± Standardfehler) in belassenen und geräumten Windwurfflächen, aufgeteilt nach Vivian (20-jährig) und Lothar (10-jährig) und dem Zeitpunkt der Keimung der Bäume (vor oder nach dem Sturm).

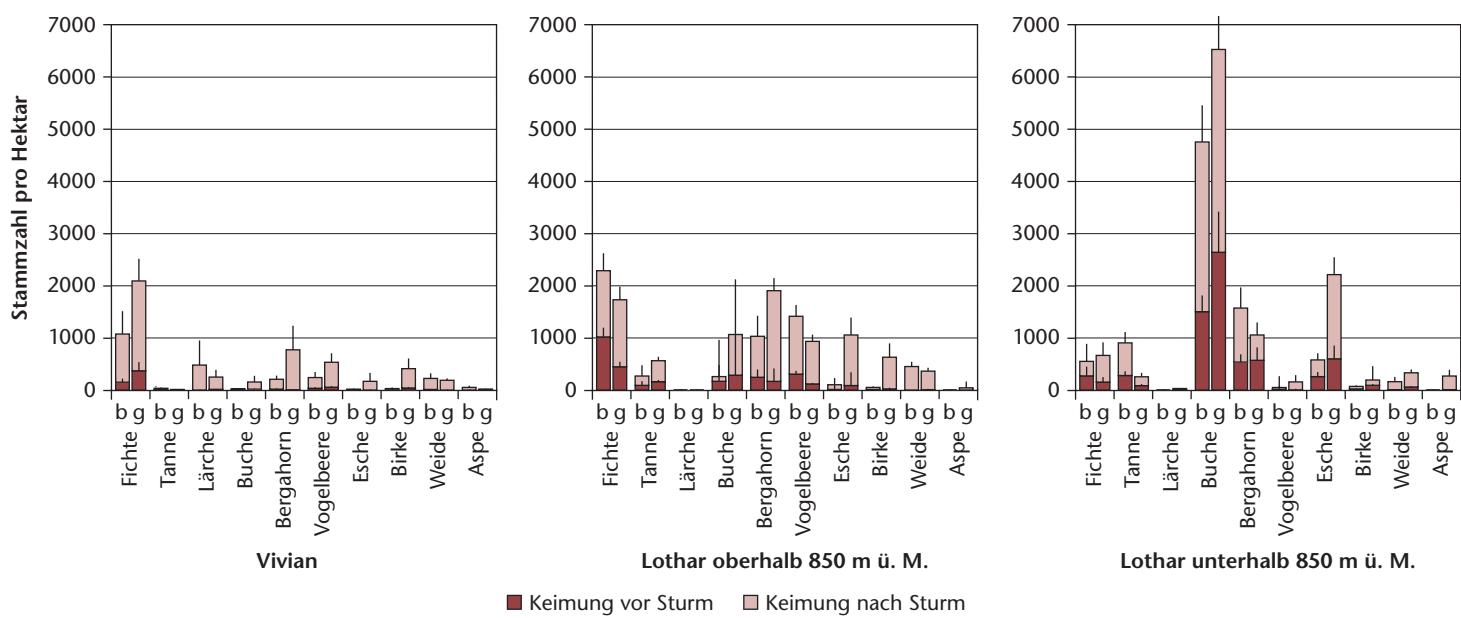


Abb 5 Verjüngungsdichten der häufigsten zehn Baumarten in Vivian- (links) und Lotharflächen der höheren (>850 m ü. M.; Mitte) und tieferen Lagen (<850 m. ü. M.; rechts), unterteilt nach Behandlung (b: belassen, g: geräumt) und Zeitpunkt der Keimung (vor oder nach dem Sturm). Vertikale Striche zeigen die Standardfehler an.

dung 3). Dagegen belief sich dieser Anteil in den Lotharflächen mit 33% und 28% auf einen Drittel respektive einen Viertel der gesamten Verjüngung.

Die Vorverjüngung bestand in Vivianflächen vor allem aus Fichten (*Picea abies*) und Vogelbeeren (*Sorbus aucuparia*; Abbildung 5). 20 Jahre nach dem Sturm machte ihr Anteil je Art 14% in den belassenen Flächen und 18% respektive 10% in den geräumten Flächen aus. In den Lotharflächen keimten rund ein Drittel der Buchen und ein Viertel der Bergahorne bereits vor dem Sturmereignis. Bei den Fichten machten die diesbezüglichen Anteile in den belassenen Flächen 45% und in den geräumten 24% aus. Auch viele Eschen, Vogelbeeren, Tannen (*Abies alba*), Eichen (*Quercus* sp.) und Kirschen (*Prunus avium*) verjüngten sich noch unter dem Schirm des intakten Waldes. In den höheren Lagen fallen auch die grossen Anteile der Fichte (44% in belassenen Flächen) sowie der Tanne, Buche, Vogelbeere und des Bergahorns in der Vorverjüngung auf.

Nachverjüngung

Nach dem Sturmereignis siedelten sich in Vivianflächen besonders Fichte, Lärche (*Larix decidua*), Bergahorn, Vogelbeere und Birke an, unterhalb von 1000 m ü. M. auch Esche (Abbildung 5). Die Stammzahlen der Fichten waren vergleichbar mit jenen in den höher gelegenen Lotharflächen. Buche, Esche, Bergahorn und Fichte waren in Lotharflächen am zahlreichsten in der Nachverjüngung. Fast ausschliesslich nach dem Sturmereignis samten Weide, Birke und Aspe als typische Pioniere an.

Baumhöhen

Lothar- und Vivianflächen unterschieden sich bezüglich der Baumhöhen nach 10 beziehungsweise 20 Jahren nicht stark (Abbildung 3, rechts, Tabelle 3): In den Lotharflächen waren die Bäume mit mittleren Höhen von 2.30 m (belassen) und 2.50 m (geräumt) etwas grösser als in den Vivianflächen, wo die entsprechenden Werte 2.16 m und 2.00 m betru-

	Vivian		Lothar	
	belassen	geräumt	belassen	geräumt
Mittlere Baumhöhe (m)	2.16 \pm 0.47	2.00 \pm 0.21	2.50 \pm 0.27	2.30 \pm 0.16
Vor Sturm gekeimt	4.91 \pm 1.95	4.28 \pm 0.58	4.29 \pm 0.44	5.20 \pm 0.48
Nach Sturm gekeimt	1.63 \pm 0.18	1.50 \pm 0.11	1.35 \pm 0.16	1.44 \pm 0.12
t-Test vor/nach Sturm	ns	***	***	***
Mittlere Höhe der 10 höchsten Bäume (m)	6.50 \pm 0.88	5.57 \pm 0.45	6.32 \pm 0.55	6.28 \pm 0.38
Vor Sturm gekeimt	7.21 \pm 2.76	5.23 \pm 0.77	6.82 \pm 0.58	6.85 \pm 0.54
Nach Sturm gekeimt	4.27 \pm 0.30	4.57 \pm 0.64	2.64 \pm 0.68	3.62 \pm 0.41
t-Test vor/nach Sturm	ns	ns	***	***
Mittlere Strauchhöhe (m)	1.09 \pm 0.20	0.99 \pm 0.11	1.18 \pm 0.20	1.53 \pm 0.14
Mittlere Totholzmenge (m ³ /ha)	284.7 \pm 45.5	76.4 \pm 11.6	266.1 \pm 23.8	73.8 \pm 7.8

Tab 3 Baum- und Strauchhöhen sowie Totholzanteile in Vivian- und Lotharflächen (Mittelwert \pm Standardfehler).

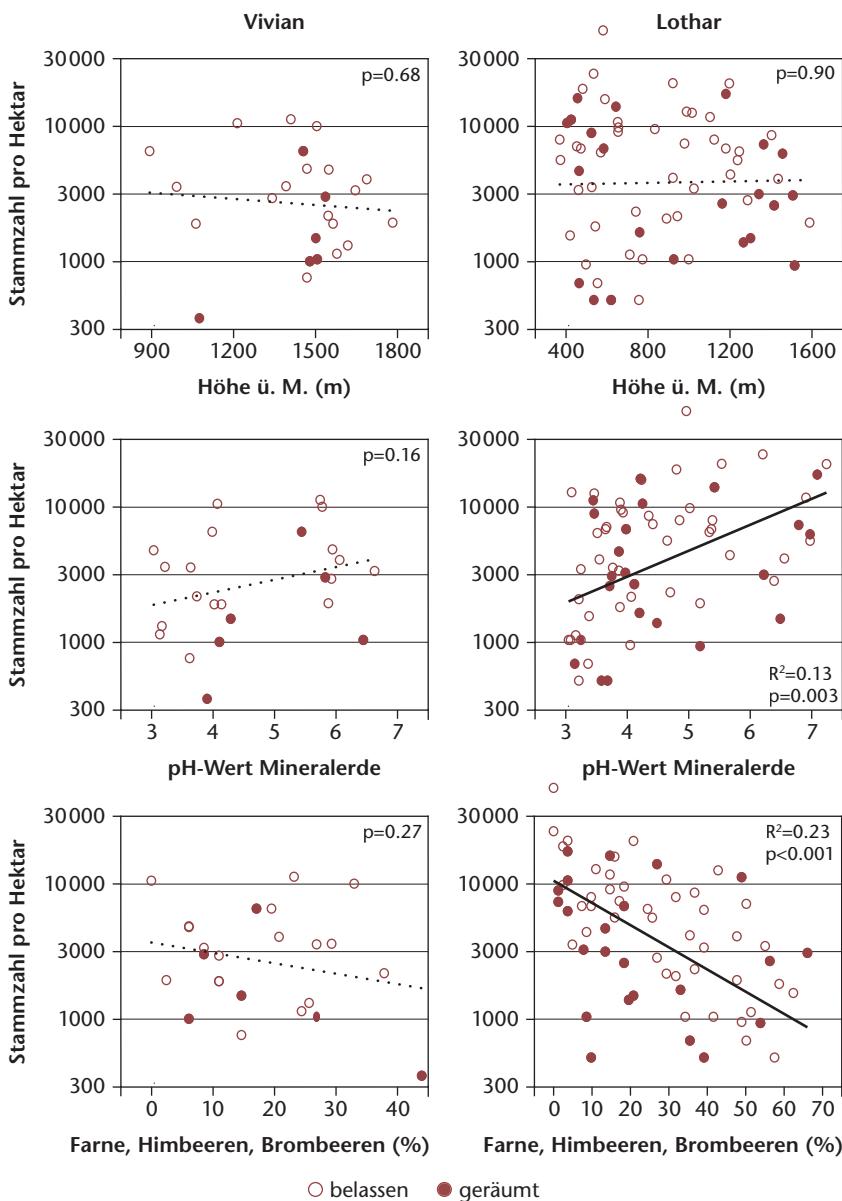


Abb 6 Dichte der nach dem Sturmereignis gekeimten Bäume vs. Höhe ü. M. (oben), pH-Wert der Mineralerde (Mitte) und Vegetationsdecke (Farne, Himbeeren, Brombeeren; unten) in belassenen und geräumten Flächen. Durchgezogene Regressionslinien sind signifikant.

gen. Die zehn grössten Bäume waren sowohl in den Lothar- als auch in den Vivianflächen ähnlich hoch (6.32 m bzw. 6.50 m). Während in Vivianflächen zwischen den vor und nach dem Sturmereignis gekeimten Bäumen kein signifikanter Größenunterschied mehr feststellbar war, stammten die grössten Bäume in den zehn Jahre alten Lotharflächen in der Regel aus dem Verjüngungsvorrat, mit Höhen von durchschnittlich 6.82 m (belassen) und 6.85 m (geräumt).

Die natürliche Verjüngung beeinflussende Faktoren

Wie bereits oben beschrieben übte die Behandlung (Belassen oder Räumen) keinen deutlichen Einfluss auf die Verjüngungsdichte aus. Erstaunlicherweise bestand nur ein geringer Zusammenhang zwischen der Höhenlage der Sturmflächen und der

Verjüngungsdichte (Abbildung 6). Bei gemeinsamer Betrachtung von Vivian- und Lotharflächen nahm die Verjüngungsdichte mit steigender Höhenlage nur geringfügig, aber signifikant ab ($R^2=0.06$, $p=0.02$). Einzel betrachtet hing die Verjüngungsdichte weder in den Vivian- noch in den Lotharflächen von der Höhe über Meer ab. Dagegen bestand ein signifikanter positiver Zusammenhang zwischen der Baumdichte und dem pH-Wert des Mineralbodens in den Lotharflächen ($R^2=0.13$; $p=0.003$): Auf neutral bis leicht basischer Unterlage standen mehr Bäume als auf sauren Böden. Zudem korrelierte die Verjüngungsdichte in den Lotharflächen negativ mit der Dichte der Begleitvegetation (Farne inkl. Adlerfarn, Himbeeren oder Brombeeren; $R^2=0.23$, $p<0.001$). Während in Vivianflächen häufig Hochstauden (Mittelwerte 15–22%; Standardfehler [SF] 4–6%), Reitgras (10–15%; SF je 4%) und Himbeeren (7–9%; SF 2–4%) den Boden bedeckten, waren in Lotharflächen vor allem Brombeeren (11–16%; SF je 3%) zu grösseren Anteilen vorhanden (Abbildung 7).

In den Lotharflächen der Tieflagen (Buchen- und Tannen-Buchenwald) stellten wir eine geringe, doch immerhin signifikante Abnahme der Verjüngungsdichten in den Probekreisen mit zunehmender Distanz zum Sturmflächenrand fest. In den höher gelegenen, von Nadelbäumen dominierten Vivian- und Lotharflächen spielte die Distanz zum Sturmflächenrand keine Rolle für die Verjüngungsdichte.

Zwischen der Verbissintensität und der Verjüngungsdichte bestand kein direkter Zusammenhang. Doch in mehrfaktoriellen Regressionsanalysen zeigte sich, dass die Verbissintensität in Interaktion mit der Flächenbehandlung (belassen/geräumt) die Stammzahlen negativ beeinflusste, wenn entweder alle Sturmflächen oder nur Vivianflächen berücksichtigt wurden (GLM-Modelle in Kramer et al 2014). In Modellen mit Lotharflächen war kein Zusammenhang zwischen den Stammzahlen und der Verbissintensität festzustellen. In belassenen Flächen fanden wir zudem weniger starken Verbiss als in geräumten Flächen. Bei den Baumarten waren Bergahorn, Vogelbeere und Weide in allen Sturmflächen sowie Tanne in den Lotharflächen stark verbissen. Die Verbissintensität bei der Tanne lag sowohl in belassenen als auch in geräumten Flächen deutlich über dem kritischen Wert von 9% verbissener Endtriebe pro Jahr (Eiberle & Nigg 1987).

Totholz

Sowohl in Vivian- als auch in Lotharflächen bewegten sich die Totholzmengen auf ähnlichem Niveau. In den belassenen Sturmflächen wurden durchschnittlich 266.1 (Lothar) und 284.7 m³ pro ha (Vivian) Totholz gefunden (Tabelle 3), mit etwas kleineren Medianwerten (251.6 und 259.2 m³ pro ha). Sowohl in belassenen als auch in geräumten Flächen ist ein signifikanter Anstieg der Totholzmen-

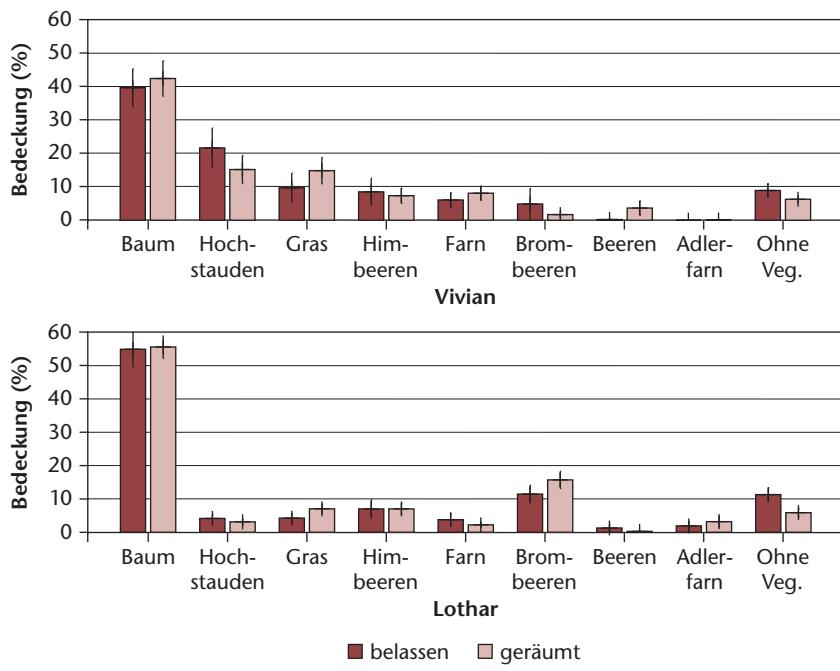


Abb 7 Mittlere Vegetationsbedeckung von Vivian- (20-jährig; oben) und Lotharflächen (10-jährig; unten), unterteilt nach Vegetationskategorie und Behandlung (belassen, geräumt). Vertikale Linien zeigen die Standardfehler an.

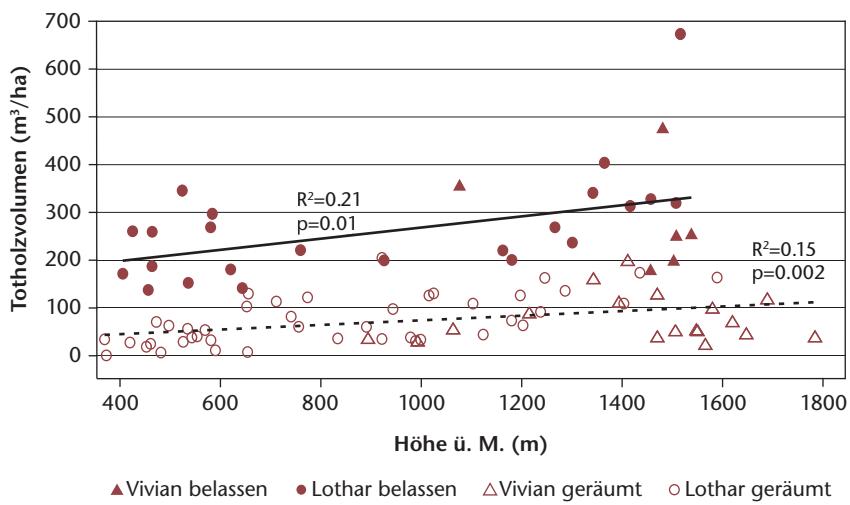


Abb 8 Totholzmengen in Vivian- und Lotharflächen als Funktion der Höhe über Meer.

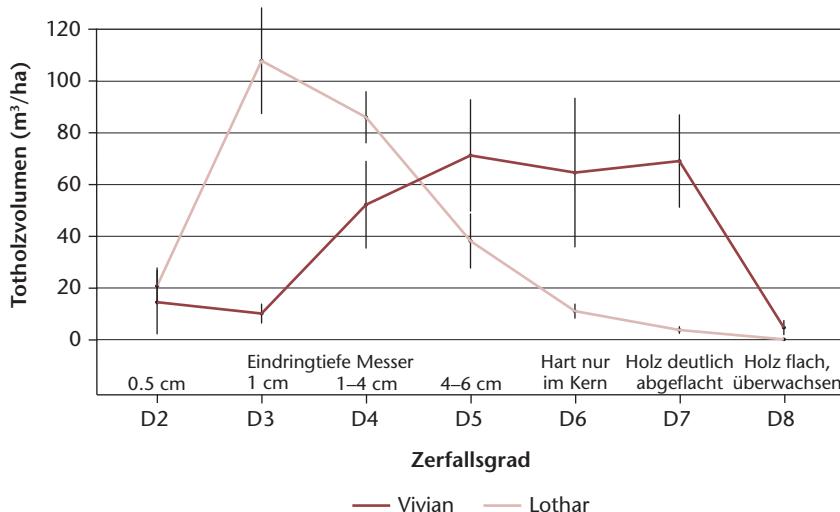


Abb 9 Zersetzunggrad des Totholzes, vereinfacht nach Zielonka (2006a) auf belassenen Vivian- (20-jährig) und Lotharflächen (10-jährig). Vertikale Linien zeigen die Standardfehler an.

gen mit der Höhenlage feststellbar ($R^2=0.21$ und $R^2=0.15$; Abbildung 8). Beim Totholz handelte es sich vorwiegend um liegende Stämme. Auf den geräumten Flächen lagen im Mittel immer noch zwischen 73.8 (Lothar) und 76.4 m^3 pro ha (Vivian) Totholz (Mediane: 60.6 und 53.2 m^3 pro ha). Nur fünf Lotharflächen (alle geräumt) unterschritten ein Volumen von 20 m^3 pro ha, was 6% aller Sturmflächen entspricht.

Erwartungsgemäss war das Totholz auf den älteren Vivianflächen stärker zersetzt als auf den jüngeren Lotharflächen (Abbildung 9). In den Vivianflächen herrschten Zersetzungsgrade von D4 bis D7 vor (Rinden fehlen, ein Messer dringt zwischen 1 cm und vollständig in den Stamm ein), in Lotharflächen dagegen erst Grade von D3 und D4 (Rinde z.T. noch vorhanden, Eindringtiefe des Messers bis 1 cm). Während das Totholz auf zwei Dritteln der Vivianflächen von jungen Bäumchen (≥ 20 cm Höhe; 72 Stämme in 16 Flächen als Nachverjüngung taxiert) besiedelt war, fanden sich entsprechend nur in einem Viertel der Lotharflächen Bäumchen auf diesem Substrat (63 Stämme in 17 Flächen). Die relativen Verjüngungsdichten auf Totholz in Vivianflächen unterschieden sich überraschenderweise nicht von jenen auf dem Waldboden. Allerdings waren die Bäumchen auf Totholz mit durchschnittlich 96.1 cm deutlich kleiner als jene auf dem Waldboden (146.9 cm). Drei Viertel der Bäumchen auf Totholz waren Fichten, gefolgt von der Vogelbeere mit rund 10%. Totholzverjüngung wurde besonders in höheren Lagen notiert (90% der Flächen oberhalb von 1100 m ü. M.).

Diskussion

Unsere umfangreiche Stichprobe zur natürlichen Verjüngung auf grossen Sturmflächen ist geprägt von einer beträchtlichen Heterogenität in der Dichte, die von spärlichen 700 Stämmen pro ha 20 Jahre nach Vivian bis zu Dickungen mit 78 083 Stämmen pro ha zehn Jahre nach Lothar reichen. Wie Vergleiche mit Verjüngungsstudien nach Windwurf in Deutschland und der Slowakei zeigen (1500 bis 52 000 Stämme pro ha), ist eine solche Heterogenität nicht aussergewöhnlich (Kompa & Schmidt 2006, Jonášová et al 2010). Doch sind diesen Daten für vergleichende Betrachtungen deutliche Grenzen gesetzt, was sich zum Beispiel darin äussert, dass für signifikante Mittelwertunterschiede die Streuung der Daten oft zu gross ist. Trotzdem lassen sich wichtige Erkenntnisse im Rahmen der Teststatistik ableiten.

Räumen oder liegen lassen

Eine erste wichtige Erkenntnis ist, dass die Baumverjüngung auf geräumten Flächen tenden-

ziell, aber nicht signifikant dichter ist als in belassenen Sturmflächen. Dieser Befund bestätigt die früheren Beobachtungen in den vier Vivian-Versuchsflächen (Schönenberger 2002), der erweiterten Analyse von Sturmbeobachtungsflächen (Brang & Wohlgemuth 2013) sowie einer Studie zu sturmgeworfene Fichtenwäldern in Estland (Ilisson et al 2007). Eine vollständige Räumung von Sturmflächen ist in der Regel mit starken Veränderungen der Bodenoberfläche verbunden, wodurch einerseits bereits vorhandene Verjüngung zerstört wird, andererseits aber auch optimale Keimbedingungen auf Mineralerde für die Samen der meisten Baumarten entstehen. In der Bilanz ergibt sich durch die Räumung eine vorübergehend vorteilhafte Situation für die Ansiedlung von Waldbäumen (Wohlgemuth et al 2002b).

Insgesamt bestehen keine grossen Unterschiede in der Baumartenzusammensetzung zwischen geräumten und belassenen Flächen (Kramer et al 2014): Die Baumarten Fichte, Tanne, Buche, Bergahorn und Esche herrschten in der Verjüngung auf den Sturmflächen beider Behandlungsvarianten zum grössten Teil vor. Auf geräumten Flächen waren Fichte, Bergahorn und Vogelbeere in höheren Lagen zahlreicher als in belassenen Flächen, und ebenso waren in geräumten Flächen der Tieflagen Buche, Esche und Birke zahlreicher als in belassenen Flächen. Wir stellten somit vielerorts einen direkten Einwuchs von Schlussbaumarten fest anstatt der klassischen Abfolge von Vorwald- zu Schlusswaldarten (z.B. Scherzinger 1996). Ein mehrheitlich direkter Einwuchs mit Schlussbaumarten wurde auch nach Waldbrand im Yellowstone-National-Park in den USA beobachtet (Romme et al 2011).

Angesichts der grossen Totholzmengen, die in belassenen Sturmflächen übrig bleiben, erstaunt auf den ersten Blick die bescheidene Zahl an Moderholzverjüngung. Unsere Erhebungen zeigen deutlich, dass praktisch nur Fichten in höheren Lagen von diesem Substrat profitieren können, wobei der Zersetzunggrad allenfalls eine untergeordnete Rolle spielt. Zu erwähnen ist, dass sich bereits vor dem Sturm vorhandenes und damit stärker zersetzes Totholz kurz nach einem Windwurf bestens als Keimbeet eignen würde (Zielonka 2006b, Svoboda et al 2010). Doch hierfür müsste Totholz im intakten Wald reichlich vorhanden sein. In den Vivianflächen wuchsen etwa gleich viele Bäumchen auf Totholz wie auf dem Waldboden. Im Unterschied zum rasch zuwachsenden Waldboden bleibt Totholz als Keimbeet über eine längere Zeit erhalten und leistet damit einen Beitrag zur Waldstruktur. Verjüngung auf Totholz ist umso wichtiger in Sturmflächen der hochmontanen und subalpinen Zone, wo Hochstauden oder Gräser rasch einwachsen und die Baumverjüngung generell behindern können (Imbeck & Ott 1987, Frehner et al 2005, Svoboda et al 2010).

Verjüngung vor und nach dem Sturmereignis

Eine Stütze in der nachhaltigen Schutzwaldpflege ist der Verjüngungsvorrat (Frehner et al 2005). In Vivianflächen machte dieser Anteil nur rund 10% aus. Zu einem gewissen Grad mag die methodisch bedingte Ungenauigkeit bezüglich des Keimzeitpunktes der Grund für diesen erstaunlich geringen Anteil sein. Doch viel eher dürfte dies auf der Tatsache gründen, dass um 1990 viele Wälder der Schweiz generell dicht standen und daher wenig Licht für das Aufkommen von Verjüngung boten (Wohlgemuth et al 2002a), besonders in den Nadelwäldern der höheren Lagen. Während in solchen Wäldern die Fichte am häufigsten in der Vorverjüngung vertreten ist, findet man in den tiefer gelegenen Lotharflächen, wo rund 30% der Verjüngung aus dem Vorrat stammten, mehr Laubholzarten (Buche, Bergahorn, Esche), die in Windwurfblössen rasch auf veränderte Ressourcenverhältnisse reagieren können (Davis et al 2000).

Gemessen an ihrer Dichte fällt die Vorverjüngung 10 und 20 Jahre nach den Stürmen nicht stark ins Gewicht und könnte deshalb voreilig unterschätzt werden. Doch die Bäume aus dem Verjüngungsvorrat waren zumindest in den Lotharflächen regelmässig grösser als jene der nach dem Windwurf aufgewachsenen Verjüngung.

Hoher Totholzanteil

Erwartungsgemäss sind in den belassenen Flächen grosse Totholzmengen vorhanden, und nicht überraschend ist die Totholzmenge in den Hochlagen grösser als in den Tieflagen. Die Volumina liegen jedoch deutlich unter den Mittelwerten des Holzvorrats für Wälder in der Schweiz, welche sich zwischen 327 m³/ha (Durchschnitt Alpen) und 475 m³/ha (Durchschnitt Voralpen) bewegen (Cioldi et al 2010). Wir nehmen deshalb an, dass vorratsreiche windgeworfene Bestände nach den Windwürfen in der Regel geerntet wurden (Priewasser et al 2013), und dass sich unter den wenigen belassenen Flächen ertragsärmere oder jüngere Bestände befanden. Erstaunlich viel Totholz blieb in geräumten Sturmflächen übrig. Unsere diesbezüglichen Medianwerte (53 und 61 m³/ha) übersteigen nicht nur die in schwedischen Vergleichsstudien angegebenen Mengen (Gibb et al 2005, Eräjää et al 2010), sondern auch den geforderten Minimalwert von 20 bis 50 m³/ha für den Erhalt der Biodiversität in verschiedenen Wäldern der Tiefland- und Montanlagen in den Alpen und der Borealzone (Müller & Bütler 2010). Gemäss dem Landesforstinventar 2009/13 betrug das mittlere Totholzvolumen in Schweizer Wäldern 24 m³/ha (Lachat et al 2014), was einer Verdopplung des Totholzvolumens seit dem zweiten Landesforstinventar (1993/95) entspricht (Brassel & Brändli 1999). Obwohl viel Totholz in Sturmflächen liegt

oder steht, kann dieses Habitat für Tier- und Pflanzenarten nicht als nachhaltig bezeichnet werden, da der Nachschub von neuem Totholz über eine längere Periode fehlen wird.

Einflussfaktoren auf die Baumverjüngung nach Windwurf

Die Verjüngungsdichten auf den 90 untersuchten Sturmflächen variieren zwar stark, doch können folgende generellen Aussagen bezüglich der Faktoren, welche das Aufkommen von natürlicher Baumverjüngung beeinflussen, festgehalten werden:

- Höhe über Meer: Die Verjüngung in hoch gelegenen Sturmflächen wächst generell weniger dicht, weniger rasch und auch weniger artenreich. Dieser Befund bestätigt frühere Analysen (z.B. Wohlgermuth et al 2008, Bachofen 2009).
- Zeit seit dem Windwurf: Auf den tiefer gelegenen und jüngeren Lotharflächen wachsen die Bäume in zehn Jahren etwa gleich hoch wie die Bäume in den 20-jährigen Vivianflächen. Als wachstumslimitierender Faktor ist die verkürzte Vegetationszeit in höheren Lagen zu nennen (Schönenberger 2002).
- Boden-pH-Wert: In Sturmflächen auf neutraler bis leicht basischer Unterlage stehen mehr Bäume als auf saurem Untergrund. Das Ergebnis bestätigt Untersuchungen aus Lothringen (Van Couwenberghe et al 2011). Ganz generell wachsen in unseren Breitengraden auf kalkreicherem Böden mehr Pflanzen- und dementsprechend auch mehr Baumarten als auf sauren Unterlagen (Pärtel 2002, Ewald 2003).
- Vegetationsbedeckung: Viele Hochstauden, Himbeeren oder Brombeeren behindern die aufkommende Verjüngung, ein Phänomen mit Langzeitwirkung, welches auch weltweit bei Regenerationsprozessen nach Störungen in Wäldern festgestellt wurde (Royo & Carson 2006).
- Distanz zum Sturmflächenrand: Für die Besiedlung von grossen Sturmflächen kann die Distanz zum intakten Sturmflächenrand eine bedeutende Rolle spielen (z.B. Lässig et al 1995). Ein derartiger Effekt konnte in den tiefer gelegenen Lotharflächen bestätigt werden und dürfte besonders mit den hier zahlreich vorhandenen Buchen zusammenhängen. Im Gegensatz zu Nadelbaumsamen, die durch Wind zahlreich verbreitet werden, sind der Ausbreitung von Bucheckern starke Grenzen gesetzt.
- Verbiss: Nur im Zusammenspiel mit anderen Einflussfaktoren war ein negativer Effekt von Verbiss auf die Verjüngungsdichten feststellbar. Eine frühere Untersuchung auf zwei Lotharflächen im Schweizer Mittelland bestätigt den generell geringeren Verbiss in belassenen als in geräumten Flächen (Moser et al 2008). Demgegenüber steht jedoch ein Experiment am Gandberg im Glarnerland, das zeigt, dass Gämsen in montaner und subalpiner Lage die

aufkommende Fichtenverjüngung unabhängig vom Raumwiderstand stark verbeissen (Kupferschmid & Bugmann 2005).

- Behandlung: Das Räumen einer Sturmfläche übt einen geringen positiven, jedoch nicht signifikanten Einfluss auf die Verjüngungsdichte aus. Obwohl durch das Räumen die Zahl der vorverjüngten Bäumchen reduziert wird, überwiegen die Vorteile der vorübergehend vegetationsarmen, aufgeschürteten Bodenoberfläche, die als optimales Substrat für die Samenkeimung und den Anwuchs der meisten Baumarten dient.
- Totholz: In grossen Mengen übrig gebliebenes Totholz hat bisher nur in höheren Lagen und dort besonders für Fichten als Keimsubstrat gedient. Auf Totholz kann zeitlich verzögert Verjüngung stattfinden, was langfristig zu einem strukturreichen Wald beiträgt.

Folgerungen

In allen untersuchten Sturmflächen wurde natürliche Verjüngung gefunden, in Tieflagen deutlich zahlreicher und raschwüchsiger als in den Hochlagen. Sturmflächen verjüngen sich auch ohne Pflanzung. Die Heterogenität der Stammzahlen ist aber beträchtlich. Unsere Resultate legen nahe, dass die Bedeutung des Verjüngungsvorlates mit zunehmendem Alter der Sturmflächen abnimmt. So ist der prozentuale Anteil der Vorverjüngung in den alten Vivianflächen mit 10% deutlich kleiner als jener der jüngeren Lotharflächen, wo die Vorverjüngung fast einen Drittels ausmacht. Eine Räumung der Sturmflächen wirkt sich nicht negativ auf die Verjüngungsdichte aus. Generell fördern ein eher kalkhaltiger Untergrund, ein geringer Vegetationsbewuchs sowie die Nähe des Sturmflächenrandes (in Buchenwäldern) die natürliche Baumverjüngung. Typische Vorwaldarten wie Vogelbeere, Birke, Weide oder Pappel fallen in der Artenzusammensetzung erstaunlich wenig ins Gewicht. Dagegen stellt der direkte Einwuchs mit Schlussbaumarten ein typisches Muster in der Verjüngung dar. Totholz spielt als Verjüngungssubstrat insbesondere in Hochlagen eine Rolle, wo vor allem die Fichte davon profitiert. Auf grossen Sturmflächen, wo rasch eine Schutz- oder Nutzfunktion durch nachwachsende Bäume erzielt werden soll, kann eine verdämmende Vegetation (Brombeeren in Tieflagen, Hochstauden in Hochlagen) zu massiven Verzögerungen führen. Mit gezielter Pflege oder mit Pflanzungen kann hier eine Förderung oder ein Vorsprung gegenüber den natürlich ablaufenden Prozessen erzielt werden. Fichtenverjüngung in Hochlagen kann durch Liegenlassen des Sturmholzes unterstützt werden.

Mit den hier präsentierten Ergebnissen liegt eine für Mitteleuropa relevante Quantifizierung vor,

die als Referenz zur Einordnung von Verjüngungssituationen nach Windwürfen dienen wird. ■

Eingereicht: 22. September 2014, akzeptiert (mit Review): 24. Dezember 2014

Dank

Wir danken Hansheinrich Bachofen, Dramane Keita und Peer Appelfelder für die Unterstützung im Feld, Peter Brang für die konzeptionelle Mitarbeit. Die hier vorgestellte Auswertung ist Teil des Projekts «Wiederbewaldung Windwurfflächen», das vom Bundesamt für Umwelt und von den Kantonen Aargau, Bern, Freiburg, Jura, Luzern, Obwalden, St. Gallen, Solothurn, Schwyz, Waadt, Wallis und Zürich finanziert wurde.

Literatur

- ANGST C, BÜRGI A, DUELLI P, EGLI S, HEINIGER U ET AL (2004) Waldentwicklung nach Windwurf in tieferen Lagen der Schweiz 2000–2003. Schlussbericht eines Projektes im Rahmen des Programms «Lothar-Evaluations- und Grundlagenprojekte». Birmensdorf: Eidg Forsch.anstalt WSL. 98 p.
- BACHOFEN H (2009) Nachhaltige Verjüngung in ungleichförmigen Beständen. Schweiz Z Forstwes 160: 2–10. doi: 10.3188/szf.2009.0002
- BRANG P, HILFIKER S, WASEM U, SCHWYZER A, WOHLGEMUTH T (2015) Langzeitforschung auf Sturmflächen zeigt Potenzial und Grenzen der Naturverjüngung. Schweiz Z Forstwes 166: 147–158. doi: 10.3188/szf.2015.0147
- BRANG P, WOHLGEMUTH T (2013) Natürliche Wiederbewaldung von Sturmflächen: Schlussbericht des Projektes Wiederbewaldung Windwurfflächen 2008–2012. Birmensdorf: Eidg Forsch. anstalt WSL. 99 p.
- BRASSEL P, BRÄNDLI UB, EDITORS (1999) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Zweitauftnahme 1993–1995. Bern: Haupt. 442 p.
- CIOLDI F, BALTEINSWEILER A, BRÄNDLI UB, DUC P, GINGLER C ET AL (2010) Waldressourcen. In: Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Birmensdorf: Eidg Forsch.anstalt WSL. pp. 31–113.
- DAVIS MA, GRIME JP, THOMPSON K (2000) Fluctuating resources in plant communities: a general theory of invasibility. J Ecol 88: 528–534.
- EIBERLE K, NIGG H (1987) Grundlagen zur Beurteilung des Wildverbiss im Gebirgswald. Schweiz Z Forstwes 138: 747–785.
- ERÄJÄÄ S, HALME P, KOTIAHO JS, MARKKANEN A, TOIVANEN T (2010) The volume and composition of dead wood on traditional and forest fuel harvested clear-cuts. Silva Fenn 44: 203–211.
- EWALD J (2003) The calcareous riddle: Why are there so many calciphilous species in the central European flora? Folia Geobot 38: 357–366.
- FREHNER M, WASSER B, SCHWITTER R (2005) Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft. 564 p.
- GIBB H, BALL JP, JOHANSSON T, ATLEGRIM O, HJALten J ET AL (2005) Effects of management on coarse woody debris volume and composition in boreal forests in northern Sweden. Scand J For Res 20: 213–222.
- ILISSON T, KOSTER K, VODDE F, JOGISTE K (2007) Regeneration development 4–5 years after a storm in Norway spruce dominated forests, Estonia. For Ecol Manage 250: 17–24.
- IMBECK H, OTT E (1987) Verjüngungsökologische Untersuchungen in einem hochstaudenreichen subalpinen Fichtenwald, mit spezieller Berücksichtigung der Schneearblagerung und der Lawinenbildung. Davos: Eidg Inst Schnee- Lawinenforsch, Mitt 42. 202 p.
- JONÁSÓVÁ M, VÁVROVÁ E, CUDLÍN P (2010) Western Carpathian mountain spruce forest after a windthrow: Natural regeneration in cleared and uncleared areas. For Ecol Manage 259: 1127–1134.
- KOMPA T, SCHMIDT W (2006) Zur Verjüngungssituation in südniedersächsischen Buchen-Windwurfgebieten nach einem lokalen Orkan von 1997. Forstarchiv 77: 3–19.
- KRAMERK, BRANG P, BACHOFEN H, BUGMANN H, WOHLGEMUTH T (2014) Site factors are more important than salvage logging for tree regeneration after wind disturbance in Central European forests. For Ecol Manage 331: 116–128.
- KUPFERSCHMID AD, BUGMANN H (2005) Effect of microsites, logs and ungulate browsing on *Picea abies* regeneration in a mountain forest. For Ecol Manage 205: 251–265.
- LACHAT T, BRANG P, BOLLIGER M, BOLLMANN K, BRÄNDLI UB ET AL (2014) Totholz im Wald: Entstehung, Bedeutung und Förderung. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL, Merkbl Prax 52. 12 p.
- LÄSSIG R, EGLI S, ODERMATT O, SCHÖNENBERGER W, STÖCKLI B ET AL (1995) Beginn der Wiederbewaldung auf Windwurfflächen. Schweiz Z Forstwes 146: 893–911.
- MEIER F, FORSTER B, ENGESER R (2013) Borkenkäfer – sehr ruhige Buchdrucker-Situation. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch. anstalt WSL. 3 p.
- MOSER B, SCHÜTZ M, HINDENLANG KE (2008) Resource selection by roe deer: are windthrow gaps attractive feeding places? For Ecol Manage 255: 1179–1185.
- MÜLLER J, BÜTLER R (2010) A review of habitat thresholds for dead wood: a baseline for management recommendations in European forests. Eur J For Res 129: 981–992.
- PÄRTEL M (2002) Local plant diversity patterns and evolutionary history at the regional scale. Ecology 83: 2361–2366.
- PRIEWASSER K, BRANG P, BACHOFEN H, BUGMANN H, WOHLGEMUTH T (2013) Impacts of salvage-logging on the status of deadwood after windthrow in Swiss forests. Eur J For Res 132: 231–240.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2013) R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.
- ROMME WH, BOYCE MS, GRESSWELL RE, MERRILL EV, WAYNE M ET AL (2011) Twenty years after the 1988 Yellowstone fires: Lessons about disturbance and ecosystems. Ecosystems 14: 1196–1215.
- ROYO AA, CARSON WP (2006) On the formation of dense under-story layers in forests worldwide: consequences and implications for forest dynamics, biodiversity, and succession. Can J For Res 36: 1345–1362.
- SCHELHAAS MJ, NABUURS GJ, SCHUCK A (2003) Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. Glob Chang Biol 9: 1620–1633.
- SCHERZINGER W (1996) Naturschutz im Wald. Qualitätsziele einer dynamischen Waldentwicklung. Stuttgart: Ulmer. 447 p.
- SCHÖNENBERGER W (2002) Post windthrow stand regeneration in Swiss mountain forests: the first ten years after the 1990 storm Vivian. Forest Snow Landsc Res 77: 61–80.
- SCHÖNENBERGER W, ANGST C, BRÜNDL M, DOBBERTIN M, DUELLI P ET AL (2003) Vivians Erbe: Waldentwicklung nach Windwurf im Gebirge. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL, Merkbl Prax 36. 12 p.
- SCHÖNENBERGER W, FISCHER A, INNES JL (2002) Vivian's legacy in Switzerland – impact of windthrow on forest dynamics. Forest Snow Landsc Res 77: 1–224.
- SEIDL R, SCHELHAAS MJ, RAMMER W, VERKERK PJ (2014) Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. Nat Clim Chang 4: 806–810.

- SVOBODA M, FRAVER S, JANDA P, BACE R, ZENÁHLÍKOVÁ J (2010) Natural development and regeneration of a Central European montane spruce forest. *For Ecol Manage* 260: 707–714.
- TURNER MG, ROMME WH, TINKER DB (2003) Surprises and lessons from the 1988 Yellowstone fires. *Front Ecol Environ* 1: 351–358.
- USBECK T, WOHLGEMUTH T, DOBBERTIN M, PFISTER C, BÜRGI A ET AL (2010) Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007. *Agric For Meteorol* 150: 47–55.
- VAN COUWENBERGHE R, COLLET C, LACOMBE E, GEGOUT JC (2011) Abundance response of western European forest species along canopy openness and soil pH gradients. *For Ecol Manage* 262: 1483–1490.
- WOHLGEMUTH T, BÜRGI M, SCHEIDECKER C, SCHÜTZ M (2002A) Dominance reduction of species through disturbance – a proposed management principle for central European forests. *For Ecol Manage* 166: 1–15.
- WOHLGEMUTH T, KULL P, WÜTRICH H (2002B) Disturbance of microsites and early tree regeneration after windthrow in Swiss mountain forests due to the winter storm Vivian 1990. *Forest Snow Landsc Res* 77: 17–47.
- WOHLGEMUTH T, CONEDERA M, KUPFERSCHMID ALBISSETTI A, MOSER B, USBECK T ET AL (2008) Effekte des Klimawandels auf Windwurf, Waldbrand und Walddynamik im Schweizer Wald. *Schweiz Z Forstwes* 159: 336–343. doi: 10.3188/szf.2008.0336
- ZIELONKA T (2006A) Quantity and decay stages of coarse woody debris in old-growth subalpine spruce forests of the western Carpathians, Poland. *Can J For Res* 36: 2614–2622.
- ZIELONKA T (2006B) When does dead wood turn into a substrate for spruce replacement? *J Veg Sci* 17: 739–746.

Régénération et bois mort sur les surfaces de chablis 10 ans après Lothar et 20 ans après Vivian

Un relevé par échantillonnage sur 90 surfaces de chablis a permis d'étudier l'avancement de la régénération 10 ans après Lothar (1999) et 20 ans après Vivian (1990). Ces surfaces d'au moins 3 ha ont été totalement détruites, et se situent du Jura jusqu'aux Alpes, en passant par le Plateau et les Préalpes (surfaces Lothar: 860 m d'altitude en moyenne, surfaces Vivian: 1428 m). Sur les surfaces Lothar laissées en l'état et celles qui ont été nettoyées, le nombre moyen de tiges est de 7644, resp. 10 786 par ha. Les valeurs moyennes sont par contre nettement inférieures pour les surfaces Vivian, d'altitude plus élevée, avec 2572 tiges par ha dans les surfaces laissées en l'état et 4600 tiges par ha dans les surfaces nettoyées. La proportion de régénération des peuplements démarrée avant la tempête s'élève sur les surfaces Lothar à un tiers de la régénération totale, et sur les surfaces Vivian à un dixième. Les dix arbres les plus grands sur chaque surface de chablis atteignent des tailles similaires après Lothar et Vivian, avec des hauteurs de 6.3 m, resp. 6.5 m. Les essences d'arbres les plus fréquentes après Lothar sont les hêtres (*Fagus sylvatica*), les érables sycomores (*Acer pseudoplatanus*), les frênes (*Fraxinus excelsior*) et les épicéas (*Picea abies*), et après Vivian les épicéas, les sycomores et les sorbiers des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*). Sur les surfaces touchées par la tempête, la densité de régénération augmente avec le pH du sol. Par contre, elle diminue avec l'altitude et la proportion de mégaphorbiaies, de framboisiers et de ronces. Le volume de bois mort s'élève sur les surfaces laissées telles quelles en moyenne à 266 (Lothar) et 285 m³ par ha (Vivian). Sur les surfaces nettoyées, on observe de manière étonnante beaucoup de bois mort, avec des valeurs atteignant 74, resp. 76 m³ par ha. Le bois mort a joué un rôle de substrat pour le rajeunissement surtout dans les forêts d'altitude, et particulièrement pour les épicéas. La régénération naturel s'effectue tôt ou tard dans toutes les zones étudiées, mais pour atteindre des objectifs forestiers spécifiques, il faut limiter tout particulièrement la végétation d'accompagnement inhibitrice. Nos résultats représentent une référence pertinente en Europe centrale pour classifier les situations de régénération dans les surfaces de chablis.

Forest regeneration and deadwood in windthrow gaps 10 years after Lothar and 20 years after Vivian

Tree regeneration in Swiss forests after winter storms Lothar (1999) and Vivian (1990) was analysed based on a sample of 90 totally wind damaged forest gaps of at least 3 ha size, located in the Jura Mountains, the Central plateau, the Pre-alps and parts of the Alps. In the less elevated Lothar gaps (\varnothing 860 m a.s.l.) mean stem densities in no intervention gaps (NI) were 7,644 and in salvage logged gaps (SL) 10,786. Means in Vivian gaps (\varnothing 1428 m a.s.l.) were significantly smaller with 2,572 in NI and 4,600 in SL gaps. Pre-storm regeneration in Lothar gaps amounted to one third of the total stem density and in Vivian gaps to one tenth. The ten tallest trees in both Lothar and Vivian gaps were similar sized with 6.3 m and 6.5 m in average. Most abundant tree species were beech (*Fagus sylvatica*), sycamore (*Acer pseudoplatanus*), ash (*Fraxinus excelsior*) and Norway spruce (*Picea abies*) in Lothar gaps, and Norway spruce, sycamore and rowan (*Sorbus aucuparia*) in Vivian gaps. Stem density increased with soil pH and decreased with elevation and the portion of tall herbs, raspberry and blackberry. The deadwood volume amounted to average 266 and 285 m³ per ha in NI gaps of Lothar and Vivian, respectively. In the SL gaps, volumes averaged to 74 and 76 m³ per ha, respectively. Deadwood as regeneration substrate matters predominantly in forests at higher elevations and favouring Norway spruce in particular. Natural regeneration takes place in all studied forest gaps, sooner or later. To achieve specific forest aims, however, competing understory vegetation needs to be controlled. Our results serve as a reference for tree regeneration in wind damaged forests of Central Europe.