

Simulation de la structure optimale des hêtraies de protection contre les chutes de pierres

Françoise Vienne
Harald Bugmann
Andreas Zingg
Monika Frehner

Les Paccots (CH)*
Chaire d'écologie forestière, Institut des écosystèmes terrestres, EPF Zurich (CH)
Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (CH)
Sargans (CH)

Simulation of the optimal structure of beech forests protecting against rockfall

Adequate management practices to attain the profiles specified in the Swiss guidelines for the management of mountain protection forests are not always unequivocally clear. This applies among others for beech forests that have a protective function against rockfall. We defined two management scenarios, one of which aims at harvesting trees starting with a minimum diameter at breast height of 40 cm, whereas the other one is focused on the creation of small gaps (area of 500 m²) over a maximum of 10% of the total stand area. These scenarios along with a control scenario characterized by no management were studied using the forest growth model BWINPro. In the control scenario, number of trees, basal area and standing volume were highest. The developments simulated under the two management scenarios were similar, when in scenario *thinning* harvesting levels corresponded to the growth over a 10-year period. In the other cases, number of trees, basal area and standing volume are lower under scenario *gap* because harvesting interventions occur more regularly. If the rocks have a volume exceeding 0.2 m³, the requirements of the profiles are attained more quickly under scenario *gap*, because in scenario *thinning* the larger trees are preferentially harvested. Because tree regeneration was not simulated, it is difficult to realistically predict the development of the number of trees. However, management interventions are needed in such forests, particularly if the profile for rocks with a volume below 0.2 m³ is to be attained and maintained.

Keywords: protection forest, beech, rockfall, simulation model, mountain sylviculture
doi: 10.3188/szf.2008.0396

*Route des Dailles 126, CH-1619 Les Paccots, courriel viennef@gmail.com

En milieu de montagne, les biens et activités humaines sont souvent menacés par les chutes de pierres. De nombreuses études ont mis en évidence le rôle protecteur de la forêt contre ces dangers (par exemple Cattiau et al 1995, Dorren et al 2004, 2005a, 2005b, Dorren & Berger 2005, Gsteiger 1993). Les arbres forment en effet un obstacle favorisant la déperdition d'énergie, ce qui a pour effet de stopper ou de freiner les matériaux en mouvement (Rey et al 2003).

En Suisse, la législation accorde une place importante aux forêts de protection en obligeant les cantons à garantir dans ces forêts des «soins minimaux» (Frehner et al 2005). Pour faciliter la mise en œuvre de ces soins minimaux, l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage a édité en 1996 les «Soins minimaux pour les forêts à fonction protectrice», dont une version entièrement remaniée et complétée est parue en 2005 sous le titre «Gestion durable des forêts de protection» (Frehner et al 2005). Les auteurs de ce guide ont cherché à quantifier les exigences pour les forêts à fonction de protection

contre les chutes de pierres. Des profils d'exigences, minimaux et idéaux, ont été définis, en admettant que plus la forêt est proche de l'état naturel, plus le coût des soins diminue. La dynamique naturelle des forêts et la marge de manœuvre du sylviculteur dans le cadre de cette dynamique sont toutefois en partie inconnues (Frehner et al 2005). La question qui se pose dès lors est de savoir comment atteindre ou maintenir les profils d'exigences, exprimés en nombre de tiges à l'hectare avec un certain diamètre à hauteur de poitrine (DHP), tout en gardant à l'esprit que la forêt évolue et que seuls certains stades de son développement naturel peuvent remplir la fonction que l'on attend d'elle (Berger et al 2003).

Dans le cadre de son travail de diplôme, Vienne (2006) a examiné cette question dans le cas de hêtraies dont l'effet protecteur contre les chutes de pierres était considéré comme «grand». Elle a défini deux scénarios d'interventions et les a appliqués à ces peuplements. Elle a ensuite comparé les résultats des simulations aux exigences contenues dans la «Gestion durable des forêts de protection» (Frehner

et al 2005) pour vérifier si celles-ci étaient respectées et si la surface terrière ainsi obtenue permettait au rajeunissement de s'installer et de croître. Le présent article résume les résultats obtenus dans le cadre de ce travail de diplôme.

Matériel et méthode

Les sites d'études et les peuplements

Pour les simulations d'interventions, quatre peuplements de hêtres ont été choisis parmi les placettes d'essai de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). Les critères de sélection étaient d'une part leur pente, qui devait être égale ou supérieure à 60%, et d'autre part la disponibilité des données. Les caractéristiques de ces quatre peuplements sont décrites dans le tableau 1.

Chaque inventaire a été considéré comme un peuplement de base pour la suite des travaux de simulation. Le nombre total de ces peuplements de base est donc de 23. Chaque peuplement de base est codé de la manière suivante: numéro de placette_année de relevé.

Le modèle de croissance forestière BWINPro 7.0

Les simulations ont été effectuées avec le simulateur de croissance forestière BWINPro version 7.0 Beta 0.10. Ce programme a été développé à l'Institut de recherches forestières de Basse-Saxe par le Prof. Dr J. Nagel comme instrument d'aide à la décision pour l'exploitation de peuplements purs ou mélangés. Il est composé d'un modèle de croissance forestière individuel et indépendant de la distance entre les arbres. Les conditions stationnelles sont re-

Placette		Schulthess-Südhang 090	Herrenrüti 133	Krähegg, exposé au nord 159	Krähegg, exposé au sud 160
Commune		Gränichen (AG)	Engelberg (OW)	Langenbruck (BL)	Langenbruck (BL)
Surface	ha	0.2	0.1997	0.25	0.1998
Altitude	m	480	1240	810	820
Pente	%	60	80	60	70
Exposition		Sud	Sud-ouest	Nord	Sud
Précipitations	mm/a	1059	1512	978	978
Température annuelle moyenne	°C	8.8	5.6	8.2	8.2
Communauté végétale		N° 7, <i>Galio odorati-Fagetum typicum</i> ¹	N° 18, <i>Abieti-Fagetum typicum</i> ^{1,3}	N° 12a, <i>Cardamino-Fagetum typicum</i> ²	N° 12*, <i>Cardamino-Fagetum caricetosum albae</i> ²
Essences		90% hêtres, 10% chênes	100% hêtres	100% hêtres	90% hêtres, 10% épicéas, sapins, pins sylvestres
Dates des inventaires	A	1891, 1898, 1909, 1916, 1925, 1931	1894, 1903, 1918	1901, 1912, 1918, 1924, 1929, 1933, 1940	1901, 1912, 1918, 1924, 1929, 1933, 1940
Seuil d'inventaire	cm	0 (h = 1.3 m)	8 cm	8 cm	8 cm
Premier inventaire					
Age	a	20	129	75	66
N/hectare		7260	1017	1192	1206
d _{dom}	cm	7.5	31	25.8	22.6
d _g	cm	4.2	22	17.2	15.7
G	m ² /ha	9.87	38.64	27.73	23.45
V ₇	m ³ /ha	2	410	283	174
Dernier inventaire					
Age	a	60	153	114	105
N/hectare		1715	661	296	370
d _{dom}	cm	25.1	35.4	34.7	34.5
d _g	cm	14.5	26.5	30.2	27.6
G	m ² /ha	28.18	36.4	21.26	22.23
V ₇	m ³ /ha	265	422	289	230
Nombre d'inventaires	n	6	3	7	7
Production totale t1–tn	m ³ /ha	425	566	623	412

Tab. 1 Caractéristiques des peuplements.

Sources: sauf indications contraires, les informations générales sur chaque peuplement proviennent des archives du groupe «Croissance et Production» du WSL et celles concernant le climat du rapport annuel 2005 de Météo Suisse (Météo Suisse 2005),

¹ Ellenberg & Klötzli 1972, ² Burnand et al (1990), ³ Kantonales Oberforstamt Obwalden (1981).

Placette d'essai	Indice de fertilité	Source ¹ (table de production du hêtre suisse ou allemande)	Volume maximal d'exploitation en dix ans (m ³ /ha) ²
090	28.6	Allemande: II. EK (Schober 1987)	112
133	18.2	Allemande: IV. LS3 (Schober 1972)	65
159	27.2	Suisse: 18 (Badoux 1983)	87
160	24.1	Suisse: 16 (Badoux 1983)	63

Tab. 2 Valeurs de l'indice de fertilité et volume maximal d'exploitation.

¹ Table de production allemande: EK = «Ertragsklasse», LS3 = «Leistungsstufe»; Table de production suisse: indice de fertilité (hauteur dominante = hauteur moyenne des 100 plus gros arbres par hectare à l'âge 50 ans).

² Correspond à la production moyenne réelle en 10 ans (m³/ha).

flétées par un indice de fertilité, qui correspond à la hauteur moyenne en mètres des 100 plus gros arbres à l'âge de 100 ans. Pour chaque placette, un indice a été tiré des tables de production suisse ou allemande du hêtre se rapprochant le plus de chaque station (tableau 2).

Le paramétrage de ce modèle avait pour base des placettes d'essai du nord-ouest de l'Allemagne. Vienne (2006) a montré qu'il pouvait être utilisé pour la Suisse. BWINPro modélise également le recrutement, mais cette fonction n'a pas été utilisée car il n'était pas possible de valider cette partie du modèle pour la Suisse.

Pour plus de détails, on se référera au manuel d'utilisation du logiciel et au document fourni avec le logiciel¹, ainsi qu'aux articles traitant de ce sujet (Nagel 1999, 2005, Nagel et al 2002).

Préparation des données d'inventaires pour les travaux de simulation

La première étape a consisté à préparer et compléter les 23 fichiers fournis par le WSL. Comme les hauteurs des hêtres n'ont été que partiellement mesurées, les valeurs manquantes ont été estimées à partir de la fonction de Michailoff (1943) selon la procédure habituelle du groupe «Croissance et Production» du WSL.

Les autres données manquantes, notamment les coordonnées de l'emplacement des arbres, ont

été complétées automatiquement lors de l'importation des fichiers par des fonctions de BWINPro comportant une composante aléatoire. Les 23 peuplements ainsi obtenus ont servi de peuplement de base dans les simulations. Grâce à cette procédure, les peuplements étaient identiques au départ des simulations des trois scénarios.

Scénarios d'interventions

Outre le scénario de contrôle, pour lequel aucune intervention n'est prévue, les deux scénarios d'interventions définis partaient de l'idée d'exploiter les plus gros arbres afin de faire de la place au recrutement (tableau 3). Le premier scénario (*éclaircie*) est centré sur l'exploitation des plus gros arbres uniquement. Le deuxième scénario (*trouée*) a plutôt pour but d'assurer suffisamment de lumière pour le rajeunissement en formant des trouées d'une certaine dimension, comme cela se produit dans les forêts jardinées de hêtres.

L'exploitation se fait régulièrement, avec une courte périodicité, pour empêcher que la canopée ne se ferme à nouveau et que le rajeunissement ne soit perdu. Le hêtre a en effet une forte capacité de réaction aux interventions, même à un âge avancé et à des altitudes élevées (Bouchon et al 1989, Chollet & Demarcq 1998).

Par analogie avec les profils d'exigences, les scénarios ne tiennent pas compte de la longueur de l'effet de la forêt entre la source des chutes de pierres et les enjeux, bien que l'effet protecteur de la forêt soit influencé par cette longueur.

¹ Waldwachstumssimulator BWINPro 7.0

Scénarios d'interventions	
Scénario contrôle	Aucune intervention. Seule l'évolution du nombre de tiges par hectare est étudiée. Il est admis implicitement ici que les peuplements tendent vers l'équilibre d'une forêt vierge de hêtres.
Scénario éclaircie	Diamètre d'exploitation: 40 cm. L'exploitation a lieu tous les dix ans, si la surface terrière est supérieure à 30 m ² /ha. Le volume maximal d'exploitation correspond à la production moyenne en dix ans. Les arbres à enlever sont sélectionnés automatiquement par le logiciel.
Scénario trouée	On régénère 10% de la surface terrière tous les dix ans par trouées de 5 ares maximum (20 m × 25 m). Chaque trouée se compose d'un gros arbre et de son voisinage direct. Les arbres à enlever sont sélectionnés par l'opérateur.

Tab. 3 Les scénarios d'interventions.

Lieu	Taille des pierres	Profil minimal	Profil idéal
Zone de transit	Pierres $\leq 0.05 \text{ m}^3$ (diamètre environ 40 cm)	Au moins 400 tiges/ha avec un DHP $\geq 12 \text{ cm}$	Au moins 600 tiges/ha avec un DHP $\geq 12 \text{ cm}$
	Pierres $0.05 \text{ à } 0.20 \text{ m}^3$ (diamètre environ 40 à 60 cm)	Au moins 300 tiges/ha avec un DHP $\geq 24 \text{ cm}$	Au moins 400 tiges/ha avec un DHP $\geq 24 \text{ cm}$
	Pierres $0.20 \text{ à } 5.00 \text{ m}^3$ (diamètre environ 60 à 180 cm)	Au moins 150 tiges/ha avec un DHP $\geq 36 \text{ cm}$	Au moins 200 tiges/ha avec un DHP $\geq 36 \text{ cm}$
Zone d'arrêt et de dépôt		Au moins 400 tiges/ha avec un DHP $\geq 12 \text{ cm}$	Au moins 600 tiges/ha avec un DHP $\geq 12 \text{ cm}$

Tab. 4 Profils d'exigences pour les forêts à grand potentiel de protection contre les chutes de pierres.

Remarques: le DHP efficace de l'arbre dépend de la taille et de la vitesse de la pierre (énergie); en cas de trouée, la distance entre les troncs, dans la ligne de plus grande pente, devrait être inférieure à 20 m, quels que soient le profil et la taille de la pierre. Source: Frehner et al 2005, modifié.

A partir des 23 peuplements enregistrés, les trois scénarios ont été simulés sur une période de trente ans. Pour simplifier, nous avons admis qu'une éclaircie avait été effectuée l'année du relevé. Par conséquent, les premières éclaircies prévues dans les scénarios d'interventions ont été simulées au bout de dix ans. Lorsque des interventions ont eu lieu, la surface des trouées créées a été mesurée.

Dans le cadre du scénario *éclaircie*, pour éviter les coupes rases si le peuplement n'était composé que de gros arbres, un volume maximal d'exploitation a été fixé (tableau 2). Il est égal à la production moyenne en dix ans.

Finalement, les résultats obtenus ont été comparés aux profils d'exigences contenus dans la «Gestion durable des forêts de protection» (Frehner et al 2005; tableau 4).

Résultats

Résultat des interventions

Le scénario *contrôle* n'a conduit à aucune intervention. Les interventions simulées dans le cadre du scénario *trouée* sont plus nombreuses que pour le scénario *éclaircie*, car elles ont eu lieu tous les dix ans indépendamment du matériel sur pied présent (tableau 5). Le nombre de tiges, la surface terrière et le volume prélevés à l'hectare sont également plus élevés pour le scénario *trouée*, car le facteur déterminant est la surface régénérée par intervention. Néanmoins, la différence est moins marquée pour la surface terrière et le volume, du fait que des tiges de tous diamètres ont été coupées, alors que dans le scénario *éclaircie* les coupes étaient limitées aux tiges de fort DHP. La surface des trouées qui résultent des simulations d'interventions varie entre 1 et 5 ares.

Evolution générale des peuplements

L'évolution des peuplements est illustrée par deux exemples dans la figure 1. Le peuplement 090_1916 est un peuplement jeune, dont aucun ar-

bre n'a atteint un DHP de 40 cm, ce qui implique l'absence de traitement dans le cadre du scénario *éclaircie*. Dans le peuplement 159_1933, au contraire, le volume maximal qui peut être enlevé dans le cadre du scénario *éclaircie* a été atteint.

Dans l'ensemble, le nombre total de tiges par hectare reste plus élevé lorsqu'aucun traitement n'est effectué, que ce soit dans le cas du scénario *contrôle* ou dans celui du scénario *éclaircie* quand aucun arbre n'atteint un diamètre de 40 cm (figure 1).

Si l'on compare les scénarios *éclaircie* (en cas de traitements) et *trouée*, la baisse du nombre de tiges semble plus rapide et plus régulière dans le cas du scénario *trouée*. Néanmoins, quand le volume enlevé dans le cadre du scénario *éclaircie* est proche du maximum fixé dans BWINPro, le nombre de tiges enlevées est plus élevé que pour le scénario *trouée*. Ce phénomène se remarque dans la figure 1 pour le peuplement 159_1933. Pour ce peuplement, le volume maximal qui peut être enlevé est de $87 \text{ m}^3/\text{ha}$. Dans le cadre de la première intervention du scénario *éclaircie*, le matériel sur pied enlevé a atteint $53 \text{ m}^3/\text{ha}$. Comme on peut le voir sur le graphique, la baisse du nombre de tiges a été moins forte pour le scénario *éclaircie* que pour le scénario *trouée*. Par la suite, lors des deux interventions suivantes, l'inverse s'est produit, lorsque les volumes enlevés se sont approchés de la limite fixée de $87 \text{ m}^3/\text{ha}$.

La surface terrière évolue de la même manière que le nombre total de tiges à l'hectare. En l'absence d'intervention, c'est-à-dire dans le cas du scénario *contrôle* et du scénario *éclaircie* tant qu'aucun arbre n'atteint un diamètre de 40 cm, la surface terrière augmente plus régulièrement. A la fin des simulations, elle est plus élevée que dans le cas où des interventions sont effectuées. En présence d'interventions, la surface terrière varie autour d'un certain niveau, avec de légères tendances à l'augmentation ou à la diminution suivant l'âge du peuplement et le scénario. Si le volume enlevé dans le cadre du scénario *éclaircie* est proche du maximum préalablement fixé, la surface terrière diminue plus que dans

Scénarios	contrôle	éclaircie	trouée
Nombre d'interventions	0	44	69
Nombre moyen d'arbres exploités par hectare	0	19	87
– Ecart type	–	12.2	102.7
– Min./max.	–	4/44	28/710
Surface terrière moyenne exploitée par hectare (m ² /ha)	0	2.7	3.3
– Ecart type	–	1.8	0.5
– Min./max.	–	0.5/5.9	1.9/3.8
Volume sur pied moyen exploité par hectare (m ³ /ha)	0	38.9	39.1
– Ecart type	–	28.9	11.7
– Min./max.	–	7.0/94.3	2.9/58.8
Nombre de trouées dont la distance entre les troncs dans la ligne de plus grande pente dépasse 20 m	0	6	49

Tab. 5 Matériel sur pied éclairci pour chaque scénario.

le cas du scénario *trouée*, pour lequel la surface terrière enlevée est de 10% de la surface terrière totale à chaque intervention.

Finalement, comme on peut s'y attendre, le volume sur pied suit la même évolution que la surface terrière. Néanmoins, la tendance à l'augmentation y est plus marquée, car le volume sur pied dépend non seulement du diamètre mais aussi de la hauteur de l'arbre, cette dernière augmentant avec le temps.

Evolution des caractéristiques des peuplements par profil d'exigences

Cas 1: Profil d'exigences pour des pierres plus petites ou égales à 0.05 m³

Le nombre de tiges par hectare ayant un DHP ≥ 12 cm est le plus élevé dans les peuplements non traités, sauf pour les deux plus jeunes peuplements. Les interventions du scénario *trouée* induisent une augmentation plus rapide de la croissance en diamètre, ce qui implique que les tiges atteignent plus rapidement le seuil de 12 cm. Ces deux peuplements sont aussi les seuls pour lesquels le nombre de tiges à l'hectare croît sur toute la période de la simulation. Dans tous les autres cas, le nombre de tiges diminue, soit sur toute la période, soit après avoir atteint un maximum.

Le nombre maximum de tiges ayant un DHP ≥ 12 cm se situe entre 1100 et 1200 tiges par hectare, ce qui correspond à une surface terrière d'au moins 25 m² ou à un volume sur pied d'au moins 220 m³/ha. Il est atteint dans des peuplements relativement homogènes où les plus gros arbres ont un DHP de 24 cm. Par la suite, dès que le nombre de tiges décroît, la densité la plus basse est atteinte dans le cadre du scénario *trouée*. Pourtant lorsque le volume prélevé dans le cadre du scénario *éclaircie* atteint le maximum fixé pour les simulations, le nombre de tiges coupées est plus élevé pour *éclaircie* que pour *trouée*.

Les peuplements respectent les profils minimaux et idéaux dans des fourchettes d'âges différentes suivant la situation de départ (âge, nombre de tiges par hectare), les interventions pratiquées et la station. Trois peuplements de base issus de la placette 090 atteignent le profil minimal à l'âge de 40 à 50 ans et le profil idéal dans les cinq années qui suivent. Dans les autres peuplements, le nombre de tiges d'un DHP ≥ 12 cm est supérieur aux profils d'exigences au départ des simulations. En l'absence d'une forte mortalité naturelle durant les cinq premières années, si la densité est proche de 1200 tiges/ha avec un DHP ≥ 12 cm, il faut environ 30 ans pour qu'elle s'abaisse jusqu'à un seuil inférieur au niveau idéal (N = 600 tiges/ha) et 15 à 25 ans de plus pour tomber en dessous des exigences du profil minimal (N = 400 tiges/ha). Ces chiffres ne concernent que le scénario *trouée*, pour lequel les exploitations ont lieu régulièrement. En l'absence d'interventions ou en cas d'exploitations moins importantes, la diminution du nombre de tiges est plus lente.

Cas 2: Profil d'exigences pour des pierres entre 0.05 m³ et 0.20 m³

Comme dans le cas précédent, c'est en l'absence de traitement que le nombre de tiges par hectare ayant un DHP ≥ 24 cm est le plus élevé. Le nombre total de tiges à l'hectare au terme des simulations est le plus bas pour le scénario *trouée*, sauf dans le cas où le volume prélevé dans le cadre du scénario *éclaircie* atteint le maximum autorisé.

Le nombre maximal de tiges par hectare ayant un DHP ≥ 24 cm se situe aux alentours de 470, ce qui correspond à une surface terrière de 43 m²/ha et à un volume de 685 m³/ha. Ce maximum est atteint en l'absence d'interventions. Si des coupes ont lieu, le maximum se situe à un niveau légèrement inférieur.

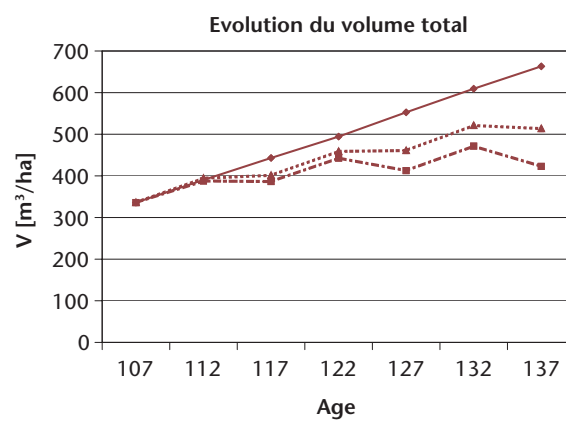
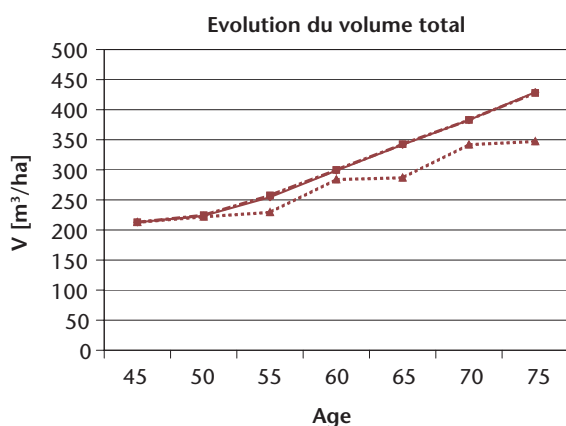
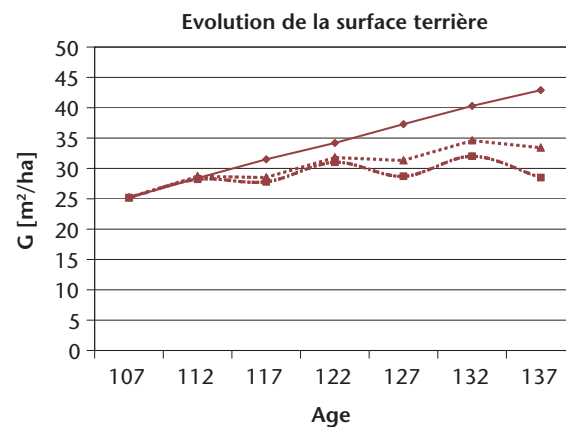
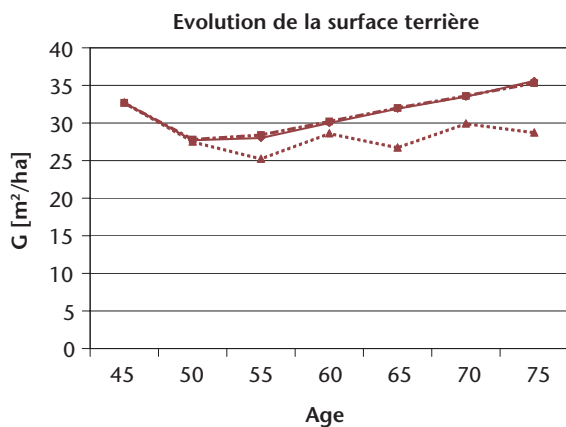
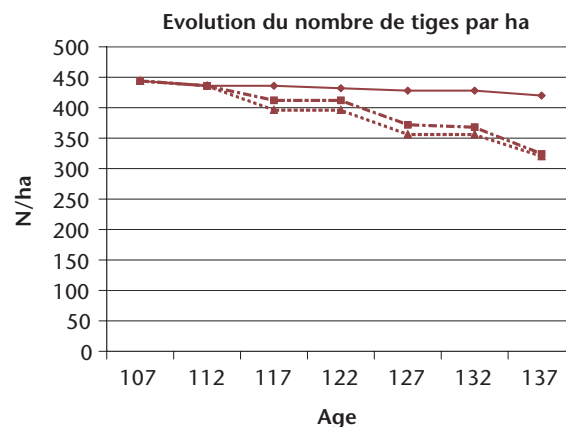
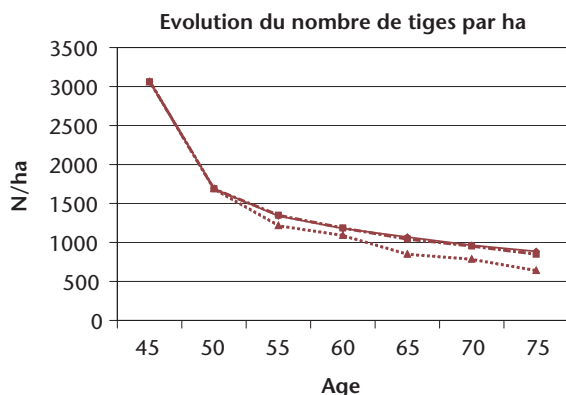
Les premiers arbres à atteindre un DHP de 24 cm ont environ 50 ans. Selon l'indice de fertilité, le profil d'exigences minimal est obtenu entre 75 et 95 ans. Plus cet indice est bon, plus le seuil de 24 cm est atteint rapidement. Quant au profil idéal, il est atteint au plus tôt 10 ans après le profil minimal en l'absence de coupes et sur les meilleures stations. Mais il arrive aussi que le nombre de tiges avec un DHP ≥ 24 cm ne dépasse pas les 400. Ce cas de figure est fréquent dans le cadre du scénario *trouée*.

Cas 3: Profil d'exigences pour des pierres entre 0.20 m³ et 5.00 m³

Pour les tiges d'un DHP ≥ 36 cm, l'évolution de la densité est similaire aux deux cas précédents. La densité la plus élevée est atteinte en l'absence d'interventions, le maximum étant de 228 tiges sur le peuplement 159_1940. En revanche, en présence d'interventions, la densité la plus faible est obtenue avec le scénario *éclaircie* et non plus avec le scénario *trouée* comme auparavant.

Fig. 1 Evolution du nombre de tiges, de la surface et du volume à l'hectare: exemples des peuplements 090_1916 et 159_1933.

—●— contrôle
 -■- éclaircie
 -▲- trouée



Les premiers arbres à réaliser un DHP de 36 cm sont âgés de 75 ans environ. Quant aux profils d'exigences, ils n'ont été atteints que sur les peuplements 159 et 160: le profil minimal a été atteint aux alentours de 120 ans au plus tôt en l'absence d'interventions et le profil idéal au mieux entre cinq et dix ans après. Les peuplements 090 sont encore trop jeunes (on atteint au mieux 90 ans en partant de la dernière date de relevé). Quant aux peuplements 133, leur indice de fertilité – le plus faible de l'échantillon – explique qu'on y trouve un nombre insuffisant de hêtres avec le diamètre souhaité.

Sur toutes les simulations avec interventions, une seule a atteint le profil idéal. Il s'agit du peuplement 159_1940 à l'âge de 139 ans. Par la suite, le nombre de tiges par hectare a de nouveau diminué.

Discussion

Pertinence des interventions

Comme le rajeunissement n'est pas modélisé, aucune nouvelle tige ne vient remplacer celles qui ont été coupées. Pour cette raison, le nombre de tiges par hectare est toujours plus élevé si le peuplement ne subit aucune intervention.

Sur le terrain, la réalité est autre. Le hêtre étant une essence sciaphile, les graines germent même avec peu de lumière et le jeune plant peut végéter plusieurs années dans le sous-étage (figure 2). Par la suite, l'apport de lumière dû à la disparition d'un ou de plusieurs arbres favorise la croissance du rajeunissement installé. On peut donc compter sur l'apparition de nouvelles tiges dans les trouées. Ce phénomène s'observe dans les forêts vierges, où le rajeunissement s'installe à l'ombre des grands hêtres

Fig. 2 Rajeunissement du hêtre dans le sous-étage.



vieillissants et ne se développe qu'à leur mort (Korpel 1995). Toutefois, ces trouées naturelles atteignent des dimensions incompatibles avec la «Gestion durable des forêts de protection». Il serait en effet surprenant que ces surfaces de 0.2 à 0.5 hectare (Korpel 1995) forment des trouées dont la distance dans la ligne de plus grande pente ne dépasse pas 20 m d'un tronc à l'autre.

Par ailleurs, le nombre de tiges par hectare dans les forêts vierges de hêtres est bas. Il atteint au mieux 350 arbres, tous diamètres confondus (Korpel 1995). Il ne peut donc que très rarement respecter les profils d'exigences et en aucun cas les profils d'exigences pour les pierres de petit diamètre (profil minimal (idéal): 400 (600) tiges/ha avec un DHP ≥ 12 cm). Ainsi, des interventions semblent nécessaires, et ce surtout pour atteindre la densité de tiges exigée par les plus petits diamètres de pierres.

Le but des interventions définies dans ce travail était d'imiter dans une certaine mesure le cycle des forêts vierges de hêtres en raison de leur stabilité. Cette stabilité, qui assure un effet de protection à long terme, peut être également atteinte par une forêt de type jardinée (Schütz 2002). Néanmoins, comme pour les forêts vierges de hêtres, le nombre de tiges à l'hectare dans une forêt jardinée ne respecte pas non plus les profils d'exigences. Des relevés effectués dans une hêtraie jardinée de Langula (nord-est de l'Allemagne) montrent que la densité des tiges calculée pour cette forêt n'atteint à aucun moment les profils minimaux requis et cela, quelle que soit la taille de la pierre (Vienne 2006). Les meilleurs résultats obtenus ont été: 300 tiges/ha avec un DHP ≥ 12 cm, 150 tiges/ha avec un DHP ≥ 24 cm et à peine 100 tiges/ha avec un DHP ≥ 36 cm.

Dans les forêts vierges ou jardinées, le DHP des tiges atteint des dimensions considérables, bien au-delà de 36 cm. Cette constatation nous a permis, pour la détermination des interventions, de partir de l'hypothèse que le nombre de tiges à l'hectare augmenterait si les plus gros arbres étaient prélevés (Vienne 2006). En l'absence de rajeunissement, cette hypothèse n'a pas pu être vérifiée. L'observation du nombre maximal de tiges avec un DHP ≥ 12 cm permet pourtant de penser que le choix d'intervenir est le bon. En outre, le cas du peuplement 090_1891 est à mentionner. En effet, le nombre de tiges atteignant le seuil des 12 cm augmente plus rapidement lorsque des interventions ont lieu, en raison de l'effet positif qu'ont celles-ci sur l'accroissement en diamètre des arbres dégagés.

Par ailleurs, la qualité et la capacité de croissance du rajeunissement peuvent être en partie déduites de l'observation du matériel sur pied présent sur la station. Schütz (1997) estime que le volume ne devrait pas dépasser 300 m³/ha afin de permettre au recrutement de se développer convenablement et d'atteindre les étages supérieurs. Ce volume correspond à une surface terrière de 27 m²/ha. Cela représente également la limite au-delà de laquelle l'accroissement en diamètre des tiges du recrutement, à savoir les perches de la plus petite catégorie de diamètre inventoriée (8–12 cm), tend vers zéro (Schütz 1997). Comme les résultats le montrent, le volume sur pied dépasse finalement ces limites dans tous les cas, bien que l'évolution soit plus lente lorsque des exploitations sont effectuées. De même, le volume sur pied reste moins élevé en présence d'interventions que sans interventions. Par contre, avec les mêmes paramètres, la surface terrière évolue de manière

plus stable. Les interventions permettent de la stabiliser au niveau souhaité, que ce soit dans le cas du scénario *éclaircie*, au maximum d'exploitation, ou dans le cas du scénario *trouée*. Il est ainsi possible d'en déduire que les jeunes hêtres seront capables de croître en cas d'interventions.

Comparaison des scénarios

Le scénario *éclaircie* ciblait les gros arbres. Son effet ne peut pas être évalué dans le cas de grosses pierres. En effet, les profils requis n'ont été atteints que dans très peu de cas. Il aurait fallu disposer d'un peuplement déjà structuré, ou fixer le diamètre cible à 45 ou 50 cm, voire plus haut, pour atteindre les profils requis. L'augmentation du diamètre cible aurait impliqué un volume sur pied du peuplement encore supérieur, avec les risques que cela comporte sur le rajeunissement. Cependant, les trouées réalisées dans le cadre de ce scénario respectent bien les exigences de la «Gestion durable des forêts de protection», exception faite de très rares cas.

Le scénario *trouée* avait pour objectif d'assurer suffisamment de lumière pour le rajeunissement, en créant des trouées d'une certaine dimension à la manière des traitements des forêts jardinées. Lors des simulations, l'attention a été portée sur la dimension des trouées plutôt que sur la pente de la station et l'impact de cette pente sur la forme des trouées. Celles-ci ont donc été plus ou moins ellipsoïdales sur la pente, et dans bien des cas avec une distance supérieure à 20 m dans la ligne de plus grande pente, bien que les 5 ares ne fussent pas encore atteints. Sur le terrain, ce biais peut être corrigé en veillant à ce que la longueur de la trouée dans la ligne de plus grande pente ne dépasse pas 20 m.

La comparaison des deux scénarios permet les constatations suivantes: le nombre total de tiges à l'hectare, ainsi que le nombre de tiges avec un DHP

≥ 12 cm ou 24 cm, sont plus bas dans le cadre du scénario *trouée*, exception faite des cas où le matériel enlevé dans le cadre du scénario *éclaircie* est proche du maximum qui peut être exploité. Pour ce qui est des grandes pierres, les profils minimaux (pour un nombre de tiges ayant un DHP ≥ 36 cm) semblent plus vite atteints dans le cadre du scénario *trouée*, puisque la coupe n'est pas limitée aux plus gros arbres.

Une autre différence concerne la taille des trouées. Celle-ci influence la vitesse des projectiles ainsi que la qualité du bois de tige. Un arbre se développant dans une trouée trop petite, c'est-à-dire sur une surface égale à celle d'un ou deux vieux arbres, aura tendance à être rabougri et déformé (Schütz 2002). Ceci peut être préoccupant si la fonction première de la forêt est la production de bois de qualité. Néanmoins, la qualité du hêtre passe au second plan dans une forêt de protection puisque la capacité d'un arbre à retenir des pierres en mouvement ne dépend pas de la forme de sa tige. En règle générale, en raison des blessures que les pierres peuvent causer aux billes de pied, on s'assurera que la longueur de la trouée dans la ligne de plus grande pente ne dépasse pas 20 m et on renoncera à produire du bois de qualité dans les forêts de protection contre les chutes de pierres. Tout au plus, le bois exploité servira comme bois d'industrie ou de feu, ou sera simplement couché en travers de la pente pour freiner ou stopper les pierres en mouvement. Par ailleurs, en l'absence de modélisation du passage à la futaie, il est difficile de déterminer lequel des deux scénarios a un meilleur effet sur le rajeunissement. Il est fort probable que les trouées générées par les interventions suffisent au développement du recrutement et que le passage à la futaie ainsi généré compense la perte des tiges due à l'exploitation. Sur les meilleures stations de Suisse, stations ayant un indice de fertilité supérieur à 16, trente ans suffisent aux arbres qui croissent le plus rapidement pour atteindre un DHP de 12 cm. Sur les stations ayant un indice de fertilité de 24 et 26, certaines tiges atteignent même 24 cm de DHP à 30 ans (Badoux 1983). Pour le scénario *trouée* et sur les meilleures stations, ce fait pourrait prolonger le respect des profils d'exigences pour les pierres de petit diamètre.

Comparaison avec d'autres scénarios

Bien qu'il existe de nombreuses publications sur la relation entre les dangers naturels et le rôle protecteur de la forêt (par exemple Frehner et al 2005, Stoffel et al 2005, Gauquelin & Courbaud 2006, Wehrli et al 2007; figure 3), il n'a pas été possible de comparer les scénarios de notre travail avec des propositions d'autres auteurs. D'une part, peu d'études quantitatives ont été réalisées sur la fonction protectrice des forêts de hêtres (par exemple Walker 2002). D'autre part, la plupart des articles se référant à la fonction de protection de la forêt contre

Fig. 3 Hêtraie de protection contre les chutes de pierres.



les chutes de pierres (par exemple Dorren et al 2005b) soulignent l'efficacité de la forêt sans préciser comment l'atteindre ou l'améliorer. Outre Frehner et al (2005), Cattiau et al (1995) ont cherché à quantifier l'état idéal d'une forêt à fonction de protection contre les chutes de pierres. Les objectifs étaient exprimés en termes de nombre de tiges par hectare, de surface terrière et de stade de développement, sans proposition de mesures sylvicoles pour les atteindre. Finalement, les articles qui examinent des scénarios de gestion traitent uniquement de forêts de résineux (par exemple Stoffel et al 2005, Wehrli et al 2007).

Conclusion et perspectives

Ce travail avait pour objectifs de comparer dans des hêtraies l'évolution du nombre de tiges par hectare d'un certain DHP selon différents scénarios d'interventions et de s'assurer que les exigences contenues dans la «Gestion durable des forêts de protection» étaient toujours respectées. Deux points ont pu être relevés. Le premier est que le nombre de tiges à l'hectare baisse plus vite en cas d'interventions. Le second point est que le respect des exigences et la durée de ce respect dépendent de la situation de départ, si le passage à la futaie n'est pas simulé.

En l'absence de modélisation du passage à la futaie, il est difficile de juger la qualité des interventions proposées. On peut cependant affirmer que dans le cas de pierres de petit diamètre, les interventions sont nécessaires et vraisemblablement efficaces pour obtenir de façon durable le nombre de tiges par hectare prévu par les profils d'exigences. Dans ce cas, le scénario *trouée* serait même préférable. Pour les autres dimensions de pierres, la qualité de la station joue un rôle plus déterminant. Par exemple, sur la station «hêtraie à sapin» (placette d'essai 133, étage montagnard supérieur), il n'est pratiquement pas possible d'atteindre le profil d'exigences de 150 tiges/ha pour les grosses pierres avec un peuplement pur de hêtres, parce que la croissance de cette espèce est trop modérée sur cette station. Il se pourrait néanmoins que le profil soit atteint avec un mélange de sapins et d'épicéas, comme ces essences jouissent d'une meilleure croissance que le hêtre sur cette station. On s'assurera donc que le hêtre soit accompagné d'un nombre suffisant de résineux dans les hêtraies à sapin de l'étage montagnard supérieur.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail sont le fruit du modèle BWINPro, qui simule la croissance de la forêt pour des conditions idéales sans tenir compte des événements dommageables tels que les chutes de pierres. Pour répondre au mieux à la question initiale, l'idéal serait d'appliquer un simulateur qui prenne en compte, d'une part, la crois-

sance forestière, y compris l'apparition du recrutement, et d'autre part, le mécanisme de chutes de pierres et ses conséquences sur la croissance des arbres. Deux modèles répondent à ces exigences et pourraient être évalués pour les hêtraies: SAMSARA (Courbaud et al 2003) et PICUS (Woltjer et al 2008). Des essais grandeur nature sont cependant conseillés pour valider les résultats modélisés.

Pour conclure, il est important que les futurs travaux scientifiques tiennent compte des mesures sylvicoles nécessaires pour tendre vers des peuplements optimaux. A cet égard, notre travail constitue un premier pas vers ce but. ■

Soumis: 12 juin 2007, accepté (avec comité de lecture): 12 juillet 2008

Références

- BADOUX E (1983) Ertragstafeln Buche. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anst Wald Schnee Landsch, 3 ed.
- BERGER F, REY F, LIEVOIS J (2003) Le zonage: un outil pour la gestion des forêts de montagne à fonction de protection contre les risques naturels. Ingénieries EAT 36: 53–63.
- BOUCHON J, DHOTE JF, LANIER L (1989) Note sur la réaction individuelle du hêtre à différentes intensités d'éclaircie et à différents âges. Rev For Fr 41: 39–50.
- BURNAND J, HASSPACHER B, STOCKER R (1990) Waldgesellschaften und Waldstandorte im Kanton Basel-Landschaft. Kommentar zur vegetationskundlichen Standortskartierung der Wälder. Liestal: Kanton Basel-Landschaft. 237 p.
- CATTIAU V, MARI E, RENAUD JP (1995) Forêt et protection contre les chutes de rochers. Ingénieries EAT 3: 45–54.
- CHOLLET F, DEMARCQ P (1998) Réaction des hêtraies de montagne aux éclaircies tardives. Rev For Fr 50: 349–356.
- COURBAUD B, DE COLIGNY F, CORDONNIER T (2003) Simulating radiation distribution in a heterogeneous Norway spruce forest on a slope. Agric For Meteorol 116: 1–18.
- DORREN LKA, BERGER F (2005) Stem breakage of trees and energy dissipation during rockfall impacts. Tree Physiol 26: 63–71.
- DORREN LKA, BERGER F, LE HIR C, MERMIN E, TARDIF P (2005A) Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. For Ecol Manage 215: 183–195.
- DORREN LKA, BERGER F, MAIER B (2005B) Der Schutzwald als Steinschlagnetz. Freising: Bayer Landesanst Wald Forstwirtschaft, Aktuell 50: 25–27.
- DORREN LKA, MAIER B, PUTTERS US, SEIJMONSBERGEN AC (2004) Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps. Geomorphology 57: 151–167.
- ELLENBERG H, KLÖTZLI F (1972) Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. Mitt Eidgenöss. Forsch.anst Wald Schnee Landsch 48: 589–930.
- FREHNER M, WASSER B, SCHWITTER R (2005) Gestion durable des forêts de protection. Soins sylvicoles et contrôle des résultats: instructions pratiques. Berne: Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, 564 p.
- GAUQUELIN X ET AL (2006) Guide des sylvicultures de montagne. Grenoble: Cemagref. 289 p.
- GSTEIGER P (1993) Steinschlagschutzwald – Ein Beitrag zur Abgrenzung, Beurteilung und Bewirtschaftung. Schweiz Z Forstwes 144: 115–132.

- KANTONALES OBERFORSTAMT OBWALDEN (1981) Die Pflanzenwelt in Obwalden. Sarnen: Kant Oberforstamt, 3 vol.
- KORPEL S (1995) Die Urwälder der Westkarpaten. Stuttgart: Gustav Fischer. 310 p.
- METEO SUISSE (2005) Bulletins météorologiques 2005. Zurich: Météo Suisse. 7 p.
- MICHAILOFF I (1943) Zahlenmässiges Verfahren für die Ausföhrung der Bestandeshöhenkurven. Fw Cbl U Thar Forstl Jahrb 6: 273–279.
- NAGEL J (1999) Konzeptionelle Überlegungen zum schrittweisen Aufbau eines waldwachstumskundlichen Simulationssystems für Nordwestdeutschland. Frankfurt a M: Sauerländer. 122 p.
- NAGEL J (2005) TreeGrOSS – eine Java basierte Softwarekomponente zur Waldwachstumsmodellierung für Forschung, Lehre und Praxis. Freiburg: Deutscher Verband Forstl Forsch.anst, Sektion Forstl Biometrie Informatik, 15. Tagung vom 9–10 Okt 2003. pp. 33–37.
- NAGEL J, ALBERT M, SCHMIDT M (2002) Das waldbauliche Prognose- und Entscheidungsmodell BWINPro 6.1. Forst Holz 57: 486–493.
- PRETZSCH H (2002) Grundlagen der Waldwachstumsforschung. Berlin: Parey. 414 p.
- REY F, BERGER F, QUETEL C, LE HIR C (2003) Le rôle de protection passive de la végétation forestière vis-à-vis de l'érosion et des chutes de pierres. Ingénieries EAT (numéro spécial): 165–178.
- SCHOBER R (1972) Die Rotbuche 1971. Frankfurt a M: Sauerländer. 333 p.
- SCHOBER R (1987) Ertragstafeln wichtiger Baumarten. Frankfurt a M: Sauerländer, 3 ed. 166 p.
- SCHÜTZ JP (1997) Sylviculture 2. La gestion des forêts irrégulières et mélangées. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes. 178 p.
- SCHÜTZ JP (2002) Die Plenterung und ihre unterschiedlichen Formen. Zürich: Eidg Techn Hochschule, Waldbau, Skripten. 127 p.
- STOFFEL M ET AL (2005) Assessing the protective effect of mountain forests against rockfall using a 3D simulation model. For Ecol Manage 225: 113–122.
- VIENNE F (2006) Etudes sur l'optimisation du diamètre final visé dans une hêtraie à fonction de protection contre les chutes de pierres. Zurich: Eidg Techn Hochschule, Waldökologie, Diplomarbeiten. 130 p.
- WALKER D (2002) Untersuchungen zur Bestandesdynamik in Buchenwäldern des Juras im Hinblick auf vorgegebene Kriterien zur Schutzwirkung gegen Steinschlag. Zürich: Eidg Techn Hochschule, Gebirgswaldökologie, Diplomarbeiten. 81 p.
- WEHRLI A, WEISBERG PJ, SCHÖNENBERGER W, BRANG P, BUGMANN H (2007) Improving the establishment submodel of a forest patch model to assess the long-term protective effect of mountain forests. Eur J For Res 126: 131–145.
- WOLTJER J ET AL (2008) Coupling a 3D patch model and a rockfall module to assess rockfall protection in mountain forests. J Environ Manage 87: 373–388.

Simulation de la structure optimale des hêtraies de protection contre les chutes de pierres

En vue d'atteindre ou de maintenir les profils d'exigences définis dans la «Gestion durable des forêts de protection» pour les forêts de protection contre les chutes de pierres, deux scénarios d'interventions ont été définis pour des hêtraies. L'un préconise l'exploitation des arbres à partir d'un DHP de 40 cm. L'autre propose d'effectuer des trouées de 5 ares maximum en enlevant 10% de la surface terrière. Parallèlement à un scénario de contrôle ne prévoyant aucune intervention, ces scénarios ont été simulés en utilisant le modèle BWINPro.

Le nombre de tiges par hectare, la surface terrière et le volume sont toujours plus élevés si aucune intervention n'a lieu. L'évolution des deux scénarios est similaire lorsque le matériel sur pied enlevé dans le cas du scénario *éclaircie* correspond à l'accroissement en dix ans. Dans les autres cas, le nombre de tiges, la surface terrière et le volume sur pied à l'hectare sont toujours plus bas dans le scénario *trouée* car les exploitations sont plus régulières. Le profil d'exigences pour les pierres d'un volume supérieur à 0.20 m³ est atteint le moins rapidement dans le cadre du scénario *éclaircie*, celui-ci visant avant tout l'exploitation des plus gros diamètres.

En conclusion, en l'absence de modélisation du rajeunissement, le développement réel du nombre de tiges est difficilement prévisible. Néanmoins, il ressort de ce travail que des interventions sont nécessaires, en particulier dans le but d'atteindre et de maintenir les profils d'exigences pour les pierres d'un volume inférieur à 0.20 m³.

Simulation der optimalen Struktur von Buchen-Steinschlagschutzwäldern

Mit dem Ziel, die Anforderungsprofile, welche in der Wegleitung «Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald» definiert wurden, in Steinschlagschutzwäldern zu erreichen resp. aufrechtzuerhalten, wurden zwei Eingriffsszenarien für Buchenwälder definiert. Eines sieht die Nutzung der Bäume ab einem BHD von 40 cm vor. Im anderen werden kleine Öffnungen von fünf Aren Grösse auf max. 10% der Fläche ausgeführt. Diese Szenarien sowie ein Kontrollscenario ohne Eingriffe wurden mit dem Modell BWINPro simuliert.

Beim Szenario ohne Eingriffe sind Stammzahl pro Hektare, Grundfläche und Volumen am höchsten. Bei den zwei Szenarien mit Eingriffen sind die Entwicklungen ähnlich, falls die Nutzung beim Szenario *Durchforstung* dem Zuwachs innert zehn Jahren entspricht. In allen anderen Fällen sind die Stammzahl, die Grundfläche und der Vorrat beim Szenario *Lochhieb* tiefer, da die Nutzungen regelmässiger sind. Bei Steinen von mehr als 0.20 m³ wird das Anforderungsprofil mit dem Szenario *Lochhieb* schneller erreicht als mit dem Szenario *Durchforstung*, in welchem vor allem die grossen Durchmesser geerntet werden.

Da die Verjüngung nicht simuliert wurde, ist die tatsächliche Entwicklung der Stammzahl schwierig vorherzusagen. Gemäss den Resultaten dieser Arbeit sind Eingriffe notwendig, vor allem um die Anforderungsprofile für Steine mit einem Volumen von weniger als 0.20 m³ zu erreichen resp. aufrechtzuerhalten.