

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 171 (2020)

Heft: 2

Artikel: Wald, Steinschlagschutznetz oder beides? : Ein risikobasierter Vergleich unter Einbezug von Störungen

Autor: Moos, Christine / Thomas, Mélanie / Pauli, Bernhard

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097280>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 02.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Wald, Steinschlagschutznetz oder beides? Ein risikobasierter Vergleich unter Einbezug von Störungen

Christine Moos

Centre interdisciplinaire de recherche sur la montagne, Université de Lausanne (CH)*

Mélanie Thomas

Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, HAFL (CH)

Bernhard Pauli

Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, HAFL (CH)

Luuk Dorren

Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, HAFL (CH)

Wald, Steinschlagschutznetz oder beides? Ein risikobasierter Vergleich unter Einbezug von Störungen

Dank Schutzwäldern können in der Schweiz an vielen Orten die Kosten für technische Schutzmassnahmen reduziert oder vermieden werden. Um finanzielle Mittel im Schutzwald- und Naturgefahrenmanagement möglichst effizient einsetzen zu können, ist eine realistische Quantifizierung der langfristigen Schutzwirkung wichtig. Das Ziel dieser Studie ist es, den Kapitalwert eines Steinschlagschutzwaldes in Mendrisio (TI) zu ermitteln und mit dem Kapitalwert von Steinschlagschutznetzen sowie einer Kombination der beiden Massnahmen zu vergleichen. Dabei soll die zeitliche Variabilität in der Schutzwirkung des Waldes aufgrund von Störungen mitbezogen werden. Die in der Analyse berücksichtigten Kosten sind Holzerntekosten sowie Investitions- und Unterhaltskosten für die Steinschlagschutznetze. Der angenommene Nutzen setzt sich aus der monetarisierten Risikoreduktion einer Schutzmassnahme sowie aus den generierten Holzerlösen zusammen. Unsicherheiten im Hinblick auf die dauerhafte Gewährleistung der Schutzwirkung – beispielsweise einer Abnahme aufgrund von möglichen Waldbränden – werden mittels eines probabilistischen Ansatzes über einen Zeitraum von 100 Jahren simuliert. Sowohl der Schutzwald als auch die Netze reduzieren das Steinschlagrisiko um etwa 75% für das betrachtete Untersuchungsgebiet. Der Kapitalwert der Schutzwaldbewirtschaftung ist positiv, wohingegen die permanenten Schutznetze einen deutlich negativen Kapitalwert haben. Dies impliziert, dass die zusätzliche Schutzwirkung der Netze zum Schutzwald die sehr hohen Investitionskosten nicht kompensieren kann. Die Variation im Kapitalwert aufgrund möglicher Waldbrände ist gering. Temporäre Netze können die vorübergehende Reduktion der Schutzwirkung nach einem grösseren Waldbrand kompensieren. Ihr Kapitalwert ist jedoch wiederum niedriger verglichen mit der Situation ohne Netz. Die in der vorliegenden Studie präsentierte Methode erlaubt eine realistische Bewertung der Schutzwaldwirkung und hilft, optimale Kombinationen von Schutzmassnahmen zu finden.

Keywords: protection forest, natural hazard, rockfall net, wildfire disturbance, risk analysis, net present value
doi: 10.3188/szf.2020.0060

* Case postale 4176, CH-1950 Sion 4, E-Mail christine.moos@unil.ch

Rund die Hälfte des Schweizer Waldes schützt vor Naturgefahren wie Lawinen, Steinschlag oder Hochwasser (Losey & Wehrli 2013). Dank diesen Wäldern können an vielen Orten die Kosten für technische Schutzmassnahmen reduziert oder sogar vermieden werden. Daneben erbringen Schutzwälder auch eine Reihe weiterer Ökosystemdienstleistungen: Sie liefern den nachwachsenden Rohstoff Holz, speichern Kohlenstoff und wirken sich positiv auf den Wasserkreislauf aus (Miura et al 2015). Obwohl der Nutzen von Schutzwäldern unumstritten ist, bleibt es eine Herausforderung, diesen realistisch und umfassend zu quantifizieren und vor allem zu monetarisieren (Moos et al 2018a). Die Monetarisierung ist jedoch von grossem Interesse, um finanzielle Mittel im Schutzwald- und Naturge-

fahrenmanagement möglichst effizient einsetzen zu können.

Eine realistische Beurteilung der Schutzwirkung von Wäldern erfordert, die positiven und negativen Wirkungen über einen längerfristigen Zeitraum zu quantifizieren. Dafür müssen die zukünftig erwarteten Kosten und Nutzen monetär bewertet und auf einen bestimmten Zeitpunkt hin vergleichbar gemacht werden. Eine Methode, die dies erlaubt, ist die Kapitalwertmethode («Net Present Value»; Spangenberg & Settele 2010). So können beispielsweise temporäre Änderungen in der Schutzwirkung des Waldes berücksichtigt werden. Letztere ist nämlich selten konstant, sondern variiert aufgrund von Störungsereignissen oder Eingriffen (Vacchiano et al 2016). Ob und wie stark Störungen die Schutz-

wirkung eines Waldes beeinträchtigen, hängt von ihrer Häufigkeit, Intensität und Ausdehnung sowie von der Regenerationsfähigkeit des Waldes ab (Cordonnier et al 2008). Wird die Schutzwirkung des Waldes kurzfristig reduziert, stellt sich unmittelbar die Frage, ob technische Massnahmen nötig sind, um das temporäre Schutzdefizit zu kompensieren. Eine objektive Grundlage zur Beantwortung dieser Frage fehlt jedoch meistens.

Die Schutzleistung von Wäldern wird in vielen Studien basierend auf den Kosten, die beim Ersatz des bestehenden Waldes durch technische Schutzmassnahmen anfallen würden (z.B. Notaro & Paletto 2012), oder mithilfe der Befragung der Betroffenen (z.B. Olschewski 2013) geschätzt. Solche Ansätze quantifizieren jedoch die physikalische Wirkung des Waldes gegen Naturgefahrenprozesse nicht direkt. Ein risikobasierter Ansatz hingegen erlaubt es, die Wirkung des Waldes mit der Reduktion der erwarteten Schäden zu quantifizieren (Bebi et al 2004, Moos et al 2018b). Ziel dieser Studie ist es, den Kapitalwert eines Steinschlagschutzwaldes basierend auf seiner Risikoreduktion zu ermitteln und mit dem Kapitalwert von Steinschlagschutznetzen sowie ei-

ner Kombination der beiden Massnahmen (Wald und Netze) zu vergleichen. Dabei soll die zeitliche Variabilität in der Schutzwirkung des Waldes aufgrund von Störungen und Pflegeeingriffen miteinbezogen und quantifiziert werden. Die Methodik wurde basierend auf einer Fallstudie entwickelt (Moos et al 2019).

Material und Methoden

Betrachteter Schutzwaldkomplex

Der Schutzwaldkomplex befindet sich in der Gemeinde Mendrisio (TI). Er hat eine Fläche von 11 ha und eine durchschnittliche Hangneigung von 35°. Das Ablösegebiet ist aus Kalkstein (Calcare di Moltrasio) und hat eine durchschnittliche Höhe von 60 m. Der Wald bedeckt den gesamten Hang und besteht hauptsächlich aus Hopfenbuche, Winterlinde und Hagebuche. Basierend auf zehn repräsentativen Plots à 20 × 20 m wurden die Baumartenverteilung, die Stammzahl pro Baumart und die Durchmesserverteilung für einzelne Bestände bestimmt.

Aufgrund des warmen Klimas in der Region ist mit Waldbränden zu rechnen (Pezzatti et al 2016), die hier als einzige Störung betrachtet werden. Es wurde davon ausgegangen, dass die momentane Schutzwirkung des Waldes mittels regelmässiger Eingriffe konstant gehalten werden kann und sich die jetzige Waldstruktur lediglich bei periodischen Eingriffen sowie allfälligen Waldbrandereignissen ändert. Die Zunahme des Vorrats zwischen zwei Eingriffen wurde mittels eines empirischen Ansatzes geschätzt. Der aktuelle Vorrat basierend auf dem mittleren Durchmesser und der mittleren Baumhöhe beträgt 305 m³/ha (Formel für Hartlaubholz nach Franz et al 1973). Der Nettozuwachs (Zuwachs inklusive Einwuchs abzüglich Mortalität) wurde anhand der aktuellsten Daten des Schweizerischen Landesforstinventars (LFI4b; Abegg et al 2014) bestimmt und beträgt 3.8 m³/(ha×Jahr). Mehrere Steinschlagschutznetze am Hangfuss mit einer Länge von rund 1.2 km bieten dem Dorf zusätzlichen Schutz vor Steinschlag.

Vier Szenarien für den Steinschlagschutz

Es wurden vier verschiedene Szenarien von Steinschlagschutzmassnahmen über einen Zeitraum von 100 Jahren verglichen (Abbildung 2): 1) Wald, 2) Wald und permanente Netze, 3) Wald und temporäre Netze und 4) permanente Netze. Im Szenario 1) wird lediglich die Schutzwirkung des Waldes berücksichtigt. Das Szenario 2) entspricht der heutigen Situation, wobei von einer neuen Investition in die Steinschlagschutznetze zum Zeitpunkt 0 ausgegangen wird. Im Szenario 3) werden Netze nur im Falle grosser Waldbrände (>5 ha) errichtet. Nach Ablauf der Lebensdauer werden sie nicht ersetzt. Im

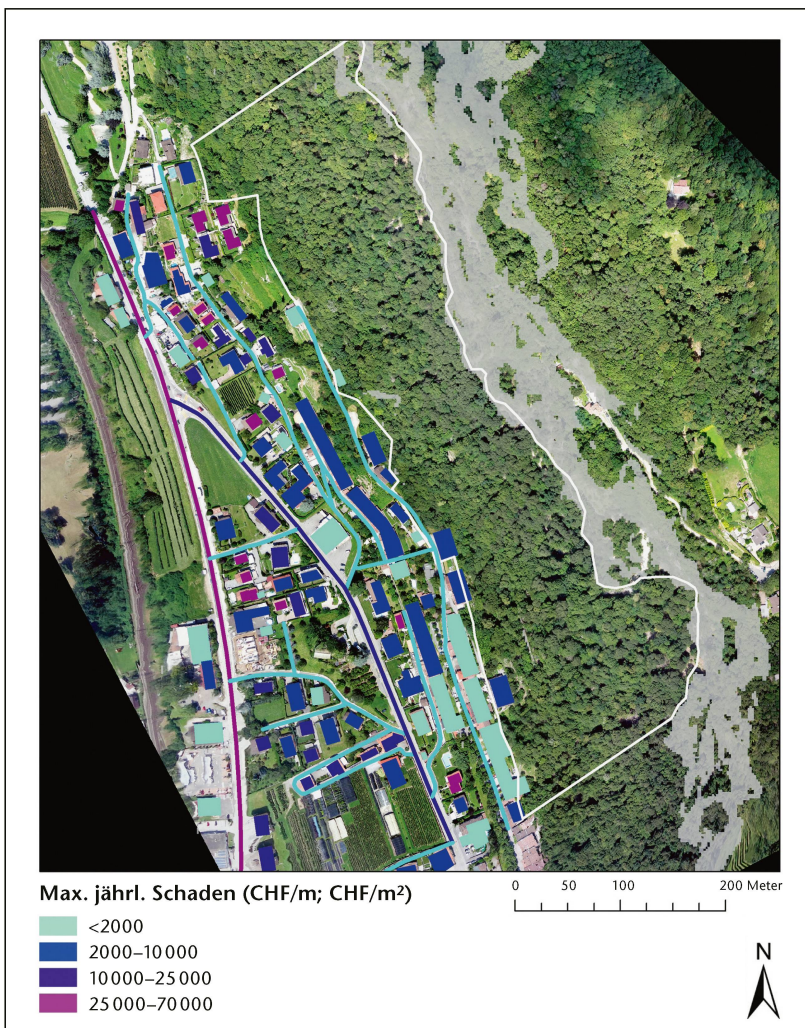


Abb 1 Betrachteter Schutzwaldkomplex mit dem Steinschlagablösegebiet (grau) sowie dem Schadenpotenzial (Summe der exponierten Werte pro m² [Gebäude] bzw. m [Strassen]).

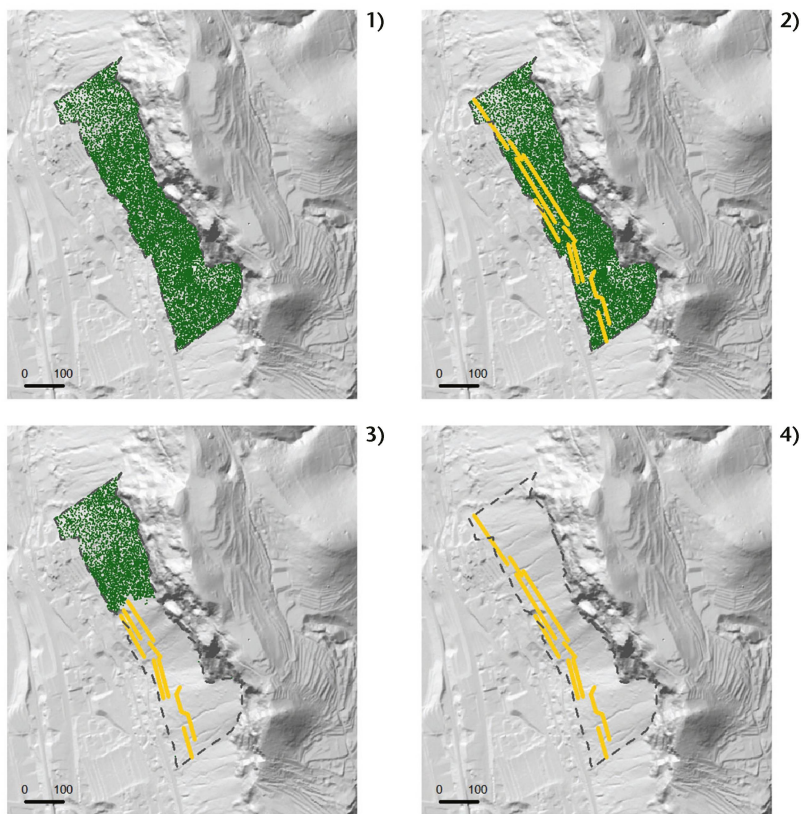


Abb 2 Die vier betrachteten Schutzmassnahmenszenarien: 1) Wald, 2) Wald und permanente Netze, 3) Wald und temporäre Netze (nur im Falle eines grossen Waldbrandes), 4) permanente Netze (ohne Wald).

Kosten	Nutzen	Zeitschritt	Unsicherheiten
Wald			
Holzernte	Holzverkauf	20 Jahre	Holzpreise
	Risikoreduktion	jährlich	Waldbrandereignisse
Wald + permanente Netze			
Holzernte	Holzverkauf	20 Jahre	Holzpreise
Bau Netze		50 Jahre	
Unterhalt Netze		jährlich	
	Risikoreduktion	jährlich	Waldbrandereignisse
Wald + temporäre Netze			
Holzernte	Holzverkauf	20 Jahre	Holzpreise
Bau Netze		Im Fall eines grossen Waldbrandes (>5 ha)	Waldbrandereignisse
Unterhalt Netze		Im Fall eines grossen Waldbrandes (>5 ha)	Waldbrandereignisse
	Risikoreduktion	jährlich	Waldbrandereignisse
Permanente Netze			
Bau Netze		50 Jahre	
Unterhalt Netze		jährlich	
	Risikoreduktion	jährlich	

Tab 1 Berücksichtigte Kosten und Nutzen im jeweiligen Zeitschritt für die vier Schutzmassnahmenszenarien sowie die in der Monte-Carlo-Simulation berücksichtigten Unsicherheiten.

Szenario 4) wird lediglich die Schutzwirkung der bestehenden permanenten Netze ohne Wald berücksichtigt. Letzteres ist ein hypothetisches Szenario, das unter extremen Bedingungen (z.B. grossflächige Störung) jedoch durchaus realistisch werden kann.

Der Nutzen einer Schutzmassnahme entspricht ihrer Risikoreduktion, sprich der Differenz zwischen dem jährlich erwarteten Schaden mit und ohne Massnahme (siehe nächstes Kapitel). Als Kosten werden der Bau und der Unterhalt der Netze sowie die Holzernte berücksichtigt. In Tabelle 1 sind alle Szenarien, ihre Kosten und Nutzen, die relevanten Zeitschritte und allfällige im Modell berücksichtigte Unsicherheiten aufgeführt.

Reduktion des Steinschlagrisikos

Das Steinschlagrisiko ist definiert als die erwarteten Konsequenzen aller möglichen Schadenereignisse und wurde als jährlicher Erwartungswert berechnet. Für ein Objekt oder eine Person i und für ein Blockvolumenszenario j wird es definiert als Produkt der Wahrscheinlichkeit, dass das Blockvolumenszenario j ausbricht (Ausbruchswahrscheinlichkeit $P_{aus,i}$), der Wahrscheinlichkeit, dass das Blockvolumenszenario j das Objekt i erreicht ($P_{err,i,j}$), dem Wert des Objektes W_i , seiner Präsenzwahrscheinlichkeit $P_{pr,i}$ und seiner Vulnerabilität $V(I)_{i,j}$ (Formel 1; Moos et al 2018b). Die Vulnerabilität $V(I)_{i,j}$ entspricht der Schadenempfindlichkeit des Objekts und hängt von der Intensität des Ereignisses ab. Das Risiko pro Objekt wird für Einzelblöcke berechnet und über alle möglichen Ereignisse $n_{i,j}$ eines Blockvolumenszenarios j gemittelt:

$$R_{i,j} = P_{Aus,j} \times P_{err,i,j} \times W_i \times P_{pr,i} \times \frac{1}{n_{i,j}} \sum_{n_{i,j}} V(I)_{i,j} \quad 1)$$

Das gesamte Risiko ist die Summe der Risiken aller Objekte und Personen o und für alle Blockvolumenszenarien v :

$$R = \sum_{i=1}^o \sum_{j=1}^v R_{i,j} \quad 2)$$

Der Wald und die Steinschlagschutznetze können einerseits die Erreichenswahrscheinlichkeit eines fallenden Blockes beeinflussen, indem sie ihn stoppen oder ablenken, und andererseits seine Energie und dadurch die Intensität verringern (Moos et al 2017). Diese Effekte wurden mittels Steinschlagsimulationen, die mit dem dreidimensionalen Modell RockyFor3D durchgeführt wurden, quantifiziert (Dorren 2015). Es wurden vier verschiedene Blockvolumenszenarien mit einer Wiederkehrperiode von 10, 30, 100 und 300 Jahren berücksichtigt. Die entsprechenden Blockgrössen wurden von einer Magnitude-Frequenz-Beziehung basierend auf Daten aus dem Ereigniskataster des Kantons Tessin (StorMe), Literaturwerten und Aufnahmen von Ablagerungen am Hang sowie Baumschäden abgeleitet. Die Erreichenswahrscheinlichkeit eines Blockvolumenszenarios $P_{err,i,j}$ ist definiert als Verhältnis zwischen der Anzahl simulierter Blöcke, die potenziell das Objekt i erreichen, und der gesamten Anzahl simulierter Blöcke. Für jedes Objekt wurden zudem die auf-

trehenden Energien extrahiert und gemäss Schweizer Risikokzept als geringe (0–30 kJ), mittlere (30–300 kJ) und hohe (>300 kJ) Intensität klassiert (Bründl 2009). Der Wert W_i eines Objektes bzw. einer Person i wurde als Summe aller Objektwerte und aller monetarisierten Personenwerte basierend auf Standardwerten für verschiedene Objektkategorien und Personen (5 Mio. CHF/Person; Bründl et al 2015) quantifiziert. Die Risikoreduktion (in CHF/Jahr) wird schliesslich als Differenz zwischen dem Risiko ohne und mit Schutzmassnahme berechnet.

Kapitalwertberechnung

Die Wirtschaftlichkeit verschiedener Schutzmassnahmen wurde aus ökonomischer Sicht mittels der Kapitalwertmethode bewertet. Der Kapitalwert K_0 ist definiert als (Walther 2005):

$$K_0 = \sum_{t=0}^T Z_t \times (1+r)^{-t} \quad 3)$$

Z_t entspricht dem Nettzahlungsstrom für den Zeitraum t , r der Diskontierungsrate und T dem gesamten betrachteten Zeitraum (hier 100 Jahre). Der Nettzahlungsstrom wird berechnet als Differenz des Nutzens (Risikoreduktion, Holzverkauf) und der Kosten (Holzerntekosten, Investitions- und Unterhaltskosten für Netze). Ebenfalls als Nutzen zu berücksichtigen sind staatliche Beiträge für die Schutzwaldpflege bzw. für den Bau von technischen Schutzmassnahmen. Im Kanton Tessin werden in der Regel 75% der Gesamtkosten der Schutzwaldbewirtschaftung den Waldeigentümern abgegolten. Die Beiträge an technische Massnahmen, beispielsweise Steinschlagschutznetze, liegen ebenfalls im Bereich von 70 bis 80% der totalen Investitionskosten (A. Pedrazzini, mündliche Mitteilung). In der Studie wurde der Kapitalwert mit und ohne staatliche Beiträge berechnet. Es wurden zwei verschiedene Diskontierungsraten verwendet (2 und 4%), die für Kapitalwertberechnungen im Waldbereich in Europa durchaus üblich sind (Möhring & Rüping 2008). Un-

sicherheiten aufgrund schwankender Holzpreise sowie einer möglichen Reduktion der Schutzwirkung des Waldes wegen Waldbrand wurden mittels eines Monte-Carlo-Ansatzes simuliert. Die Berechnung des Kapitalwerts wurde für jedes Schutzmassnahmenszenario 10000-mal wiederholt, wobei die Holzpreise sowie die Wahrscheinlichkeit eines Waldbrandes bei jedem Zeitschritt zufällig gezogen wurden. Durch Multiplikation des Kapitalwerts mit dem Annuitätsfaktor (Walther 2005) wurde zusätzlich für jedes Schutzmassnahmenszenario die Annuität (in CHF/Jahr), d.h. der regelmässig jährlich fliessende Zahlungsstrom, berechnet.

Störung durch Waldbrand

Neben dem Vergleich mit technischen Schutzmassnahmen ist ein weiteres Ziel dieser Studie, den Einfluss von Störungen durch Waldbrände auf den Kapitalwert, sprich die langfristige Effizienz des Schutzwaldes, zu ermitteln. Die Häufigkeit und die Grösse der Waldbrände wurden basierend auf Daten der schweizerischen Waldbranddatenbank Swissfire (Pezzatti et al 2010) für die Region Sottoceneri (860 km² Fläche, davon 260 km² Wald), die bis ins Jahr 1990 zurückreichen, geschätzt. Es wurden lediglich Brandflächen ≥ 0.04 ha berücksichtigt, da eine signifikante Abnahme in der Schutzwirkung erst bei Lücken >20 m erwartet wird (Frehner et al 2005). Die Häufigkeit von Waldbränden beträgt ungefähr 5.4 Brände pro 100 km² bewaldete Fläche und Jahr für das Sottoceneri (die mittlere Häufigkeit im ganzen Kanton Tessin beträgt 3.2 Brände pro 100 km² bewaldete Fläche gemäss Zumbrunnen et al 2011). Das entspricht einer Waldbrandfrequenz von 0.006 Bränden/Jahr für unser Untersuchungsgebiet. Die Häufigkeitsverteilung der Grösse der Waldbrände wurde mittels eines Potenzgesetzes («power law») angenähert (Abbildung 3). Basierend auf der angepassten Verteilung wurden drei Grössenklassen von Waldbränden und die entsprechenden bedingten Wahrscheinlichkeiten bestimmt (Abbildung 3). Da aufgrund des Klimawandels mit einem Anstieg der Waldbrandhäufigkeit zu rechnen ist (Pezzatti et al 2016), wurde zusätzlich ein Extrem-szenario, in dem Waldbrände doppelt so häufig vorkommen (0.012/Jahr), angenommen.

Es wurden nur mittlere und hohe Brandintensitäten angenommen, die zu einem unmittelbaren Absterben der Bäume und damit zu einer direkten Abnahme der Schutzwirkung führen. Es wurde zudem unterstellt, dass die Schutzwirkung des Waldes während 20 Jahren auf einem tieferen Niveau bleibt und anschliessend wieder linear ansteigt. Dies ist eine Vereinfachung der realen Entwicklung der Schutzkapazität, da anzunehmen ist, dass abgebrannte Bäume in den ersten Jahren immer noch eine gewisse Schutzfunktion übernehmen (Maringer et al 2016).

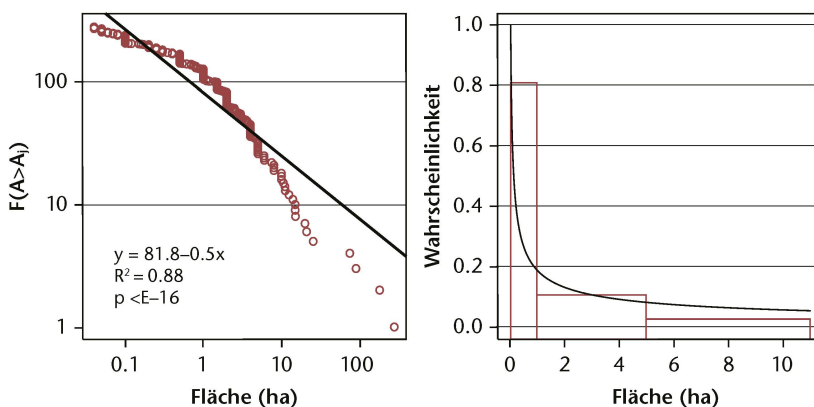


Abb 3 Überschreitenswahrscheinlichkeit $F(A \geq A_j)$ von Waldbränden mit einer Fläche ≥ 0.04 ha im Sottoceneri ($n=280$) sowie angepasste Häufigkeitsverteilung («power law»; links) und abgeleitete Wahrscheinlichkeiten für drei verschiedene Grössenklassen (rechts).

Die Risikoreduktion nach Waldbrand wurde für jede Grössenklasse mit zufällig verteilten Lücken von zufälliger Grösse berechnet (1000 Wiederholungen). Daraus resultierte eine Verteilung der Risikoreduktion pro Grössenklasse, die mit einer parametrischen Wahrscheinlichkeitsverteilung angenähert wurde.

Schutzwaldpflege

Um langfristig die Schutzwirkung möglichst konstant zu halten, wurden regelmässige Pflegeeingriffe modelliert, wobei über den gesamten Betrachtungszeitraum nur so viel Holz genutzt wird, wie nachwächst. Es wird angenommen, dass die Stärkeklassen innerhalb der Bestände gleichmässig verteilt sind und der Zuwachs über alle Stärkeklassen konstant bleibt. Ein Holzschlag findet statt, wenn der kumulierte Vorratszuwachs 25% des momentanen Vorrats beträgt. Dies entspricht den Empfehlungen in der Wegleitung «Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald» (NaiS; Frehner et al 2005). Daraus ergibt sich eine Wiederkehrperiode von 20 Jahren mit einem Holzanfall von 69 m³/ha (unter der Annahme von 10% Ernteverlusten). Es wird einzelbaumweise eingegriffen und mit dem Helikopter gerückt, da boden- oder seilgestützte Verfahren aufgrund der schlechten Erschliessung der Fläche nicht möglich sind. Zwischen den Eingriffen wurde eine lineare Zunahme des Vorrats wie auch der Schutzwirkung angenommen, da für die Grössenordnung der Grundfläche des Waldes der Zusammenhang zwischen der Schutzwirkung und der Grundfläche linear angenähert werden kann (Moos et al 2017).

Es wurde angenommen, dass das geschlagene Holz aus dem Wald abgeführt wird, da liegengelassene Bäume die Wahrscheinlichkeit von Waldbränden und Rutschungen erhöhen. Aufgrund der Baumartenzusammensetzung ist davon auszugehen, dass nicht genügend Stammholz ausgehalten werden

kann, um eine ausreichende Absatzmenge zu erhalten, weshalb die gesamte Holzmenge pro Hieb als Energieholz genutzt wird. Die Erntekosten wurden mit dem Produktivitätsmodell HeProMo (Erni & Frutig 2004) berechnet und als konstant betrachtet. Für das verwendete Holzernteverfahren und die berechnete Distanz zwischen Wald und Ablageplatz betragen die Erntekosten 116 CHF/Fm. Der aktuelle mittlere Holzpreis wurde basierend auf vergleichbaren Daten aus der Region (Starke et al 2017) auf 31.20 CHF/Fm geschätzt. Die jährlichen Preisschwankungen werden mithilfe des Schweizer Preisindex für Holzschnitzel zwischen 2007 und 2017 (Holzenergie Schweiz 2018) abgebildet. Künftige Holzpreise wurden in drei Szenarien (konstanter, sinkender und steigender Preis) nach Pauli et al (2016) modelliert.

Steinschlagschutznetze

Die Anzahl, die Position und die Höhe der Steinschlagschutznetze wurden basierend auf den gegenwärtig vorhandenen Netzen in Mendrisio bestimmt. Die Netze verfügen über eine Energieaufnahmekapazität von ungefähr 500 kJ. Die Installationskosten betragen 1200 CHF pro Laufmeter Netz gemäss Angaben des Kantons Tessin (A. Pedrazzini, persönliche Mitteilung), was einer Gesamtinvestition von 1.46 Mio. CHF zum Zeitpunkt 0 sowie nach einer Lebensdauer von 50 Jahren entspricht (Szenarien «Wald und permanente Netze» und «permanente Netze»). Es ist zudem mit jährlichen Unterhaltskosten von 2% der Installationskosten zu rechnen (BAFU 2015). Im Szenario 3), Wald und temporäre Netze, werden Steinschlagschutznetze nur installiert, sofern ein grosser Waldbrand (Fläche = 5.1–11.0 ha) eintritt, um die Reduktion der Schutzwirkung des Waldes temporär zu kompensieren. Die Netze werden nur im vom Feuer betroffenen Hangbereich installiert und nach der Lebensdauer nicht ersetzt.

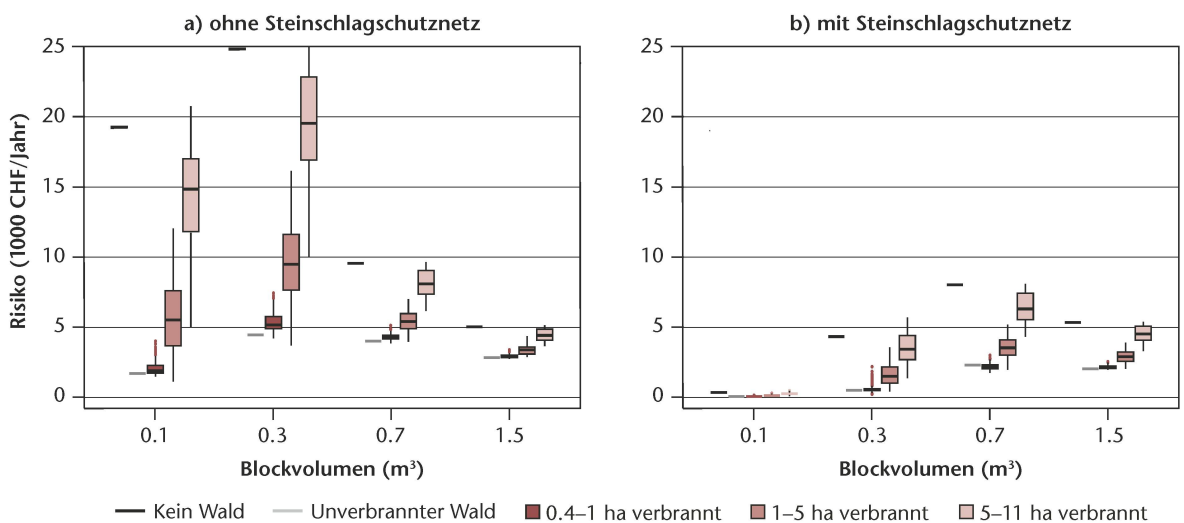


Abb 4 Steinschlagrisiko pro Blockvolumen für die Szenarien ohne (a) und mit Steinschlagschutznetzen (b) sowie für den Zustand ohne Wald und mit Wald (unverbrannter Wald und drei Grössenkatogrien von Waldbränden).

Schutzmassnahmenszenario	Median Kapitalwert (1000 CHF)				Median Annuität (1000 CHF/[ha×Jahr])			
	Ohne Beiträge		Mit Beiträgen		Ohne Beiträge		Mit Beiträgen	
	WBS heute	WBS extrem	WBS heute	WBS extrem	WBS heute	WBS extrem	WBS heute	WBS extrem
Wald	1787	1778	1960	1951	41	41	45	45
Wald + permanente Netze	-1070	-1071	1568	1567	-25	-25	36	36
Wald + temporäre Netze	1786	1778	1960	1951	-25	-25	45	45
Permanente Netze	-1365	-1365	1100	1100	-32	-32	26	26

Tab 2 Median der Kapitalwerte und der Annuitäten ohne und mit staatlichen Beiträgen für die vier Schutzmassnahmenszenarien und die zwei Waldbrand-szenarien (WBS heute/extrem). Diskontierungsrate: 2%.

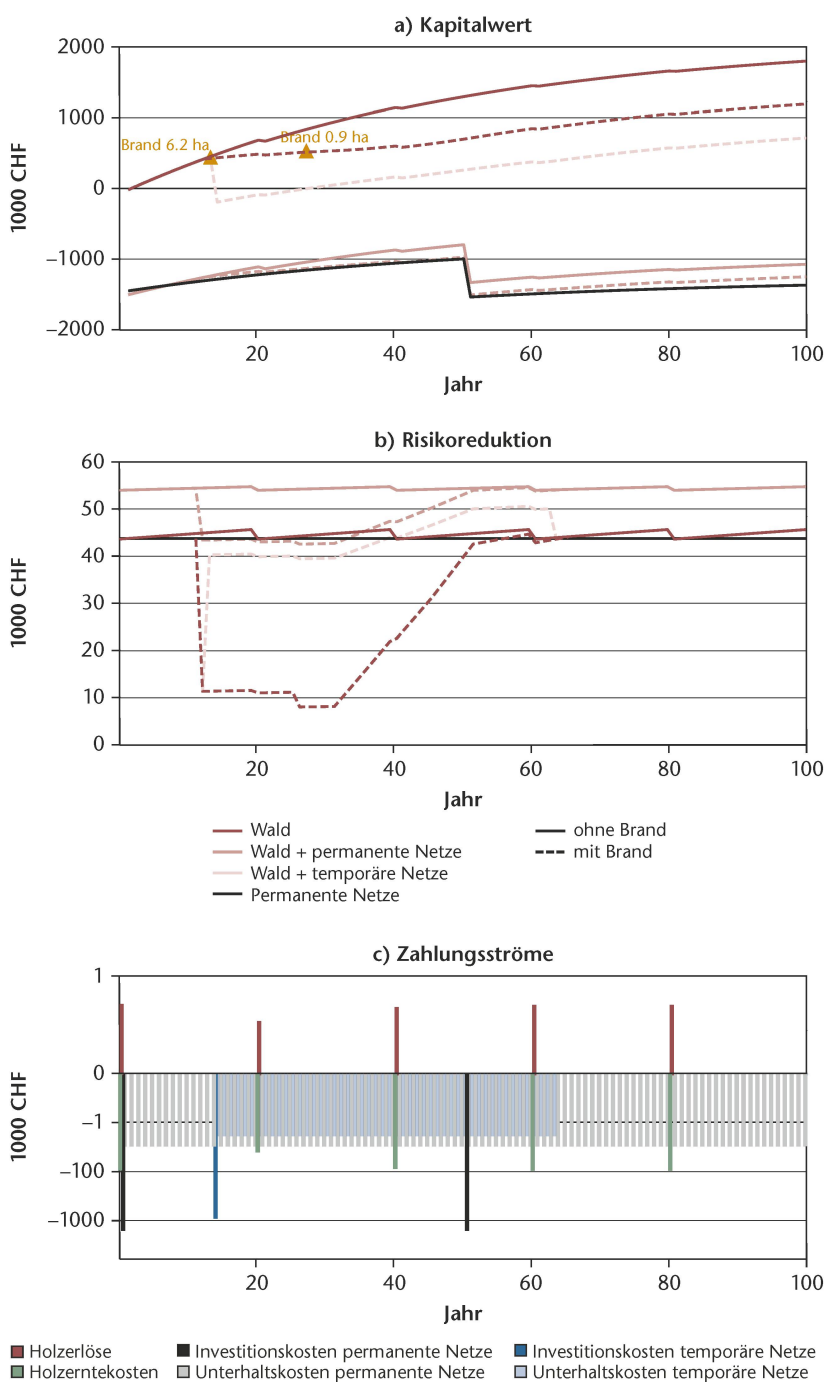


Abb 5 Entwicklung des Kapitalwerts (a) und der Risikoreduktion (b) für die vier Schutzmassnahmenszenarien für einen Simulationsdurchgang ohne Waldbrand (durchgezogene Linien) und einen Simulationsdurchgang mit einem Waldbrand von 6.2 ha nach 13 Jahren und einem Waldbrand von 0.9 ha nach 27 Jahren (gestrichelte Linien). c) zeigt die weiteren Zahlungsströme (nebst der Risikoreduktion) über die Zeit (logarithmische Skala). Nicht dargestellt sind die staatlichen Beiträge.

Resultate

Ohne Schutzmassnahme (d.h. kein Wald, keine Netze) beträgt das Steinschlagrisiko für das betrachtete Schadenpotenzial 58 500 CHF/Jahr (Abbildung 4a, aufgeschlüsselt nach Blockvolumen). Sowohl der Wald als auch die Steinschlagschutznetze reduzieren das Risiko um etwa 75%. Im Schutzmassnahmenszenario «Wald» beträgt das Risiko noch 13 000 CHF/Jahr (Abbildung 4a), im Szenario «permanente Netze» 15 000 CHF/Jahr (Abbildung 4b). Bei kleinen Bränden steigt das Risiko im Szenario «Wald» nur marginal an (Median 14 240 CHF/Jahr), bei mittleren und grossen hingegen deutlich (Median 23 650 und 46 750 CHF/Jahr; Abbildung 4a).

Der Kapitalwert des Szenarios Wald beträgt für das heutige Brandregime, das heutige Holzpreisszenario und eine Diskontierungsrate von 2% 1787 000 CHF. Dies entspricht einer Annuität von 4100 CHF/(ha×Jahr) (Tabelle 2). Falls zusätzlich zum Wald permanente Netze gebaut werden, wird der Kapitalwert negativ (-1 070 000 CHF oder -2270 CHF/[ha×Jahr]). Falls Netze nur im Falle eines Brandereignisses gebaut werden, verändert sich der Kapitalwert aufgrund der relativ geringen Waldbrandwahrscheinlichkeit nicht signifikant verglichen zur bewaldeten Situation ohne Netz. Den geringsten Kapitalwert erreicht das Schutzmassnahmenszenario «permanente Netze» mit -1 365 000 CHF (entspricht -26 CHF/Jahr pro Laufmeter Netz). Wenn Beiträge berücksichtigt werden, haben alle Szenarien einen positiven Kapitalwert. Der Kapitalwert des Szenarios Wald bleibt aber am höchsten (Tabelle 2).

Die Kapitalwerte aller Szenarien sinken signifikant mit steigender Diskontierungsrate, wobei die relativen Änderungen verhältnismässig klein sind (nicht dargestellt). Das Gleiche gilt für die verschiedenen Holzpreisszenarien mit einem leicht ansteigenden Kapitalwert bei ansteigenden Holzpreisen. Auch die Variabilität aufgrund möglicher Waldbrände ist klein, steigt jedoch bei einer doppelt so grossen Waldbrandwahrscheinlichkeit signifikant an.

Über die Zeit betrachtet, steigt der Kapitalwert für das Szenario Wald kontinuierlich, wobei eine Abflachung im Falle eines Waldbrandes zu beobachten ist (Abbildung 5a). Die Abnahme der Schutzwir-

kung aufgrund der waldbaulichen Eingriffe ist im Vergleich zum Effekt eines Waldbrandes marginal (Abbildung 5a). Falls temporäre Netze nach einem Waldbrand gebaut werden, kann die Reduktion der Schutzwirkung kompensiert werden (Abbildung 5b), der Kapitalwert bleibt jedoch geringer verglichen mit der Situation ohne Netze (Abbildung 5a).

Diskussion

Sowohl der Wald als auch Steinschlagschutznetze reduzieren das Risiko für das betrachtete Gebiet sehr effektiv. Jedoch ist nur der Kapitalwert des Schutzwaldes über den betrachteten Zeitraum von 100 Jahren positiv, während jener der permanenten Netze negativ bleibt. Aus volkswirtschaftlicher Sicht bedeutet dies, dass die Risikoreduktion die hohen Investitions- und Unterhaltskosten der Netze im Untersuchungsgebiet nicht zu kompensieren vermag. Entsprechend ist eine Investition in permanente Netze zur Erhöhung des Schutzes gegen Steinschlag für den betrachteten Hang ökonomisch nicht effizient – auch unter Mitberücksichtigung eines potenziellen Verlusts der Schutzwirkung des Waldes aufgrund von Waldbrandereignissen. Ein mittlerer oder grosser Waldbrand reduziert die Schutzwirkung des Waldes zwar für mehrere Jahre beträchtlich. Über längere Sicht betrachtet, ist der Einfluss von Waldbränden auf die Effizienz des Schutzwaldes jedoch marginal, da Waldbrände im Vergleich zu Steinschlägen viel seltener auftreten. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Brand mit einer Fläche von mehr als 5 ha mindestens einmal in 100 Jahren eintritt, beträgt lediglich 4.6%. Im Zuge des Klimawandels ist aber mit einer Zunahme der Waldbrandhäufigkeit zu rechnen (Pezzatti et al 2016). Der Einfluss von Waldbränden auf die Effizienz von Schutzwäldern wird entsprechend zunehmen. Bei einer doppelt so hohen Waldbrandhäufigkeit («Extremszenario») nimmt der Kapitalwert des Schutzwaldes trotzdem nur leicht ab. Lediglich eine Wiederkehrdauer des Feuers von 10 bis 20 Jahren würde zu einem beinahe permanenten Verlust der Schutzwirkung führen. Dabei ist der Einfluss von Waldbränden auf das Steinschlagrisiko sehr stark von der Hanglänge und der Blockgrösse abhängig. Bei grossen Blöcken sind die Konsequenzen einer grossflächigen Zerstörung des Waldes deutlich grösser.

Unter Berücksichtigung der Beiträge werden alle Kapitalwerte positiv, da im Kanton Tessin sowohl die Schutzwaldbewirtschaftung als auch die technischen Massnahmen zu 70 bis 80% abgegolten werden. Das bedeutet, dass aus Sicht des Nutzniessers der Schutzleistung (hier die Gemeinde Mendrisio), das Szenario «Wald und permanente Netze», das der teuersten Investition, aber der grössten Risikoreduktion entspricht, eine gerechtfertigte Option darstellt.

Der in dieser Studie entwickelte Ansatz stellt die Wirtschaftlichkeit der Alternativen aus volkswirtschaftlicher Sicht sowie aus Sicht des Nutzniessers transparent dar. Lokale Bedingungen können berücksichtigt werden, die zu einer variierenden ökonomischen Effizienz des Schutzwaldes bzw. der Steinschlagschutznetze führen können. Der Ansatz liefert eine wichtige Grundlage für die politische Entscheidungsfindung.

Wie sich die Schutzwirkung nach einem Waldbrand entwickeln wird, ist sehr unsicher. In dieser Studie wurde von einer unmittelbaren Abnahme der Schutzwirkung nach einem Feuer ausgegangen. Dies ist sicherlich eine stark vereinfachende und konservative Annahme, zumal stehendes und liegendes Totholz noch einige Jahre nach dem Brand fallende Blöcke stoppen kann (Maringer et al 2016). Um die genaue Entwicklung der Schutzwirkung nach Störungsereignissen quantifizieren zu können, ist weitere Forschung nötig. Temporäre Schutzbauten können den Verlust der Schutzwirkung nach einem Waldbrand kompensieren. Unsere Studie hat gezeigt, dass der Kapitalwert im Mittel positiv ist, wenn Netze nur temporär und nur für die vom Feuer zerstörte Fläche errichtet werden. Dies ist jedoch hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass die Waldbrandhäufigkeit sehr gering ist und dementsprechend die hohen Investitionskosten nur sehr selten anfallen. Stellt sich im konkreten Fall die Frage, ob temporäre Netze nach einem Waldbrand nötig sind, sollten auch kostengünstigere Alternativen, zum Beispiel liegende Stämme, in Betracht gezogen werden.

Die Installations- und Unterhaltskosten der Steinschlagschutznetze sind mit grosser Unsicherheit behaftet und hängen stark von den lokalen Bedingungen ab. Das Gleiche gilt für die Lebensdauer der Netze, die hier als fix angenommen wurde, jedoch stark schwanken kann. Auch wurden die Netze lediglich gemäss aktueller Konstruktion am Hang betrachtet. Ihre Effektivität hängt jedoch von ihrem Design und ihrer Position ab.

Offene Fragen bleiben auch bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Waldes sowie dem Einfluss von waldbaulichen Eingriffen auf seine Schutzwirkung. Im untersuchten Schutzwaldkomplex wurden in den vergangenen Jahren kaum Eingriffe durchgeführt. Längerfristig kann dies zu einer sehr einheitlichen Bestandesstruktur führen, was das Risiko eines flächigen Zusammenbruchs erhöht (Motta & Haudemand 2000). Gleichzeitig sorgen jedoch kleinflächige Störungen, zum Beispiel Steinschlagereignisse, für natürliche Öffnungen, und es ist durchaus denkbar, dass sich so das System sehr gut selbst reguliert, ohne dass Eingriffe für eine kontinuierliche Verjüngung tatsächlich nötig sind (Dorren & Berger 2006). Hinzu kommen Unsicherheiten in Bezug auf die Auswirkungen des Klimawandels auf die Schutzwirkung des Waldes. Diese könnte ei-

nerseits durch eine Veränderung der Resistenz- und Stabilitätseigenschaften der Einzelbäume, aber auch der Baumartenzusammensetzung und der Waldstruktur beeinflusst werden und somit den Kapitalwert des Waldes beeinflussen.

Weitere Unsicherheiten, die die Resultate dieser Studie beeinflussen können, bestehen in Bezug auf die Eingangsgrößen der Risikoanalyse, sprich der Steinschlagfrequenz und dem Schadenpotenzial. So wurde beispielsweise von einem gleichbleibenden Wert der Risikoobjekte ausgegangen, obwohl es sehr wahrscheinlich ist, dass sich dieser in Zukunft ändert (Fuchs et al 2013). Da der Fokus jedoch hauptsächlich auf den Vergleich verschiedener Schutzmassnahmenszenarien gelegt wurde und die Unsicherheiten betreffend Risikoanalyse alle Szenarien gleichermaßen betreffen, können die Resultate dieses Vergleichs trotzdem als plausibel betrachtet werden.

Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Studie wurde ein methodischer Ansatz zur Quantifizierung der Schutzwirkung von Wald gegen Steinschlag über die Zeit entwickelt. Dabei werden auch Unsicherheiten in Bezug auf die langfristige Schutzwirkung miteinbezogen, was einen objektiven Vergleich mit technischen Schutzmassnahmen ermöglicht. Die Methode wurde basierend auf einer Fallstudie im Kanton Tessin entwickelt, kann aber als Grundlage für andere Untersuchungsgebiete, andere Naturgefahrenprozesse und andere Störungen dienen. Die Integration eines risikobasierten Ansatzes in die ökonomische Analyse erlaubt es, den physikalischen Effekt der Bäume gegen Steinschlag in einen monetären Wert zu übersetzen und somit die Schutzfunktion des Waldes besser auszuweisen. Der Kapitalwert kann helfen, um optimale Kombinationen von Investitionen in Schutzmassnahmen zu finden und somit den politischen Entscheidungsprozess unterstützen. ■

Eingereicht: 31. Oktober 2019, akzeptiert (mit Review): 28. Januar 2020

Dank

Wir danken Marco Conedera von der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL für die Daten zur Waldbrandhäufigkeit im Kanton Tessin sowie Mattia Soldati von der Sezione forestale des Kantons Tessin für Informationen zum untersuchten Hang. Ebenfalls bedanken möchten wir uns bei den Studierenden der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (Omar Guerra, Thibaud Lugon), die bei den Feldarbeiten behilflich waren.

Literatur

- BAFU (2015)** EconoMe 4.0: Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren. Handbuch/ Dokumentation. Bern: Bundesamt Umwelt. 33 p.
- BEBI P, GRÉT-REGAMEY A, RHYNER J, AMMANN WJ (2004)** Risiko-basierte Schutzwaldstrategie. In: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL, editor. Schutzwald und Naturgefahren (Forum für Wissen 2004). Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL. pp. 79–86.
- BRÜNDL M, EDITOR (2009)** Risikokonzepkt für Naturgefahren – Leitfaden. Bern: Nationale Plattform Naturgefahren. 420 p.
- BRÜNDL M, ETTLIN B, BURKARD A, OGGIER N, DOLF F ET AL (2015)** EconoMe – Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren. Formelsammlung. Bern: Bundesamt Umwelt. 56 p.
- CORDONNIER T, COURBAUD B, BERGER F, FRANC A (2008)** Permanence of resilience and protection efficiency in mountain Norway spruce forest stands: A simulation study. *For Ecol Manage* 256: 347–354.
- DORREN L (2015)** Rockyfor3D (v5.2) revealed – transparent description of the complete 3D rockfall model. Geneva: International ecorisQ Association, ecorisQ paper 32. 37 p.
- DORREN L, BERGER F (2006)** Panarchy and sustainable risk prevention by managing protection forests in mountain areas. In: Ammann W, Dannenmann S, Vulliet L, editors. Risk21: Coping with risks due to natural hazards in the 21st century. London: Taylor and Francis. pp. 203–213.
- ERNI V, FRUTIG F (2004)** HeProMo – für die einfache Vorkalkulation von Holzerntearbeiten. *Wald Holz* 85 (5): 46–47.
- FRANZ F, BACHLER J, DECKELMANN B, KENNEL E, KENNEL R ET AL (1973)** Bayerische Waldinventur 1970/71, Inventurabschnitt I: Grossrauminventur Aufnahme- und Auswertungsverfahren. Freising: Zentrum Wald-Forst-Holz Weihenstephan, Forstliche Forschungsberichte München 11. 143 p.
- FREHNER M, WASSER B, SCHWITTER R (2005)** Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Vollzug Umwelt. 564 p.
- FUCHS S, KEILER M, SOKRATOV S, SHNYPARKOV A (2013)** Spatiotemporal dynamics: the need for an innovative approach in mountain hazard risk management. *Nat Hazards* 68: 1217–1241.
- HOLZENERGIE SCHWEIZ (2018)** Energieholz Richtpreise: Preisindex Schnitzel. Zürich: Holzenergie Schweiz. 2 p.
- LOSEY S, WEHRLI A (2013)** Schutzwald in der Schweiz. Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald. Bern: Bundesamt Umwelt. 247 p.
- MARINGER J, ASCOLI D, DORREN L, BEBI P, CONEDERA M (2016)** Temporal trends in the protective capacity of burnt beech forests (*Fagus sylvatica* L.) against rockfall. *Eur J For Res* 135: 657–673.
- MÖHRING B, RÜPING U (2008)** A concept for the calculation of financial losses when changing the forest management strategy. *For Pol Econ* 10: 98–107.
- MOOS C, DORREN L, STOFFEL M (2017)** Quantifying the effect of forests on frequency and intensity of rockfalls. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 17: 291–304.
- MOOS C, BEBI P, SCHWARZ M, STOFFEL M, SUDMEIER-RIEUX K ET AL (2018A)** Ecosystem-based disaster risk reduction in mountains. *Earth-Sci Rev* 177: 497–513.
- MOOS C, FEHLMANN M, TRAPPMANN D, STOFFEL M, DORREN L (2018B)** Integrating the mitigating effect of forests into quantitative rockfall risk analysis – two case studies in Switzerland. *Int J Disaster Risk Red* 32: 55–74.
- MOOS C, THOMAS M, PAULI B, BERGKAMP G, STOFFEL M, DORREN L (2019)** Economic valuation of ecosystem-based rockfall risk reduction considering disturbances and comparison to structural measures. *Sci Tot Environ* 697: 134077.
- MOTTA, R, HAUDEMAMAND JC (2000)** Protective forests and silvicultural stability. *Mt Res Dev* 20: 180–187.

- MIURA S, AMACHER M, HOFER T, SAN-MIGUEL-AYANZ J, ERNA-WATI THACKWAY R (2015) Protective functions and ecosystem services of global forests in the past quarter-century. *For Ecol Manage* 352: 35–46.
- NOTARO S, PALETTO A (2012) The economic valuation of natural hazards in mountain forests: An approach based on the replacement cost method. *J For Econ* 18: 318–328.
- OLSCHEWSKI R (2013) How to value protection from natural hazards – a step-by-step discrete choice approach. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 13: 913–922.
- PAULI B, STÖCKLI B, ROSSET C (2016) Wirtschaftliche Konsequenzen waldbaulicher Strategien zur Bewältigung des Klimawandels. *Schweiz Z Forstwes* 167: 39–48. doi: 10.3188/szf.2016.0039
- PEZZATTI GB, REINHARD M, CONEDERA M (2010) Swissfire: Die neue schweizerische Waldbranddatenbank *Schweiz Z Forstwes* 161: 465–469. doi: 10.3188/szf.2010.0465
- PEZZATTI GB, DE ANGELIS A, CONEDERA M (2016) Potenzielle Entwicklung der Waldbrandgefahr im Klimawandel. In: Pluess A, Augustin S, Brang P, editors. *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien*. Bern: Haupt. pp. 223–245.
- SPANGENBERG JH, SETTELE J (2010) Precisely incorrect? Monetising the value of ecosystem services. *Ecol Complexity* 7: 327–337.
- STARKE M, MENK J, THOMAS M, KEEL A, ZIESAK M (2017) Abschlussbericht Mobilisierung von Holz mit geringem Deckungsbeitragspotenzial. Zollikofen: Hochschule Agrar-Forst-Lebensmittelwissenschaften.
- VACCHIANO G, BERRETTI R, MONDINO EB, MELONI F, MOTTA R (2016) Assessing the effect of disturbances on the functionality of direct protection forests. *Mt Res Dev* 36: 41–55.
- WALTHER A (2005) *Investitionsrechnung: mit Übungsaufgaben und Lösungen*. Köln: WRW-Verlag. 68 p.
- ZUMBRUNNEN T, PEZZATTI GB, MENÉNDEZ P, BUGMANN H, BÜRGI M ET AL (2011) Weather and human impacts on forest fires: 100 years of fire history in two climatic regions of Switzerland. *For Ecol Manage* 261: 2188–2199.

Quellen

- ABEGG M, BRÄNDLI UB, CIOLDI F, FISCHER C, HEROLD-BONARDI A ET AL (2014) Viertes Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnistabellen und Karten im Internet zum LFI 2009–2013 (LFI4b). Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. doi: 10.21258/1000001

Forêt, filet pare-pierres ou les deux? Une comparaison basée sur les risques et considérant les perturbations

Grâce aux forêts protectrices, les coûts des mesures techniques de protection peuvent être réduits ou évités à de nombreux endroits en Suisse. Une quantification réaliste de l'effet protecteur à long terme est importante si l'on veut que les ressources financières soient utilisées aussi efficacement que possible dans la gestion des forêts de protection et des risques naturels. L'objectif de cette étude est de déterminer la valeur actuelle nette d'une forêt de protection contre les chutes de pierres à Mendrisio (TI) et de la comparer avec la valeur actuelle nette des filets de protection ainsi qu'une combinaison de ces mesures de protection. Pour cela, la variabilité temporelle de l'effet protecteur de la forêt due aux perturbations doit être considérée. Les coûts pris en compte dans l'analyse sont les coûts de l'exploitation forestière ainsi que les coûts d'investissement et d'entretien des filets de protection contre les chutes de pierres. L'avantage présumé consiste en la réduction du risque par une mesure de protection ainsi que les revenus générés par la vente de bois. Les incertitudes relatives à la garantie permanente de l'effet protecteur – par exemple une diminution due à d'éventuels incendies de forêt – sont simulées sur une période de 100 ans selon une approche probabiliste. La forêt de protection tout comme les filets réduisent efficacement le risque de chute de pierres dans la zone étudiée. La valeur actuelle nette de la gestion des forêts de protection est positive, alors que les filets ont une valeur actuelle nette clairement négative. Cela implique que l'effet protecteur supplémentaire des filets par rapport à la forêt ne peut pas compenser les coûts d'investissement très élevés. La variation de la valeur actuelle nette due à d'éventuels incendies de forêt est faible. La pose de filets temporaires peut compenser la réduction temporaire de l'effet protecteur après un incendie de forêt majeur. Toutefois, leur valeur actuelle nette est à nouveau inférieure à celle de la situation sans filet. La méthode présentée dans cette étude permet une évaluation réaliste de l'effet protecteur de la forêt et aide à trouver les combinaisons optimales de mesures de protection.

Forest, rockfall protection nets or both? A risk-based comparison taking disturbances into account

Thanks to protection forests, costs for technical protection measures against natural hazards can be reduced or even avoided at many places in Switzerland. An efficient use of financial resources in the protection forest and natural hazard management requires a realistic quantification of the protective effect of forests in the long term. The objective of this study is to assess the Net Present Value (NPV) of a rockfall protection forest in Mendrisio (TI) and to compare it to rockfall nets as well as combined measures. We thereby integrate the temporal variability of the protective effect of the forest due to disturbances. The costs to be included in the NPV calculation are forest management interventions, net construction and maintenance. Benefits are the risk reduction of a protection measure as well as wood sales. Uncertainties regarding the long-term provision of the protective effect – for example a possible decrease due to forest fires – were simulated with a probabilistic approach for a time period of 100 years. Both, the protection forest and the rockfall nets, reduce the rockfall risk by about 75% for our case study site. The NPV of the protection forest management is positive, while permanent rockfall nets have a significantly negative NPV, implying that the additional protective effect of the nets does not compensate for the high investment costs. The variation in the NPV due to possible forest fires is very low. Temporary nets can restore the protective effect after large forest fires. Their NPV, however, is smaller compared to the situation without net. The methodology presented in this study allows for a realistic valuation of the protective effect of forests and helps to find optimal combinations of protection measures.