

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Herausgeber: Schweizerischer Forstverein
Band: 163 (2012)
Heft: 12

Artikel: Wald und Klimawandel in der inneralpinen Trockenregion Visp
Autor: Rigling, Andreas / Elkin, Ché / Dobbertin, Matthias
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097693>

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: 08.04.2026

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

Wald und Klimawandel in der inneralpinen Trockenregion Visp

Andreas Rigling	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)*
Ché Elkin	Waldökologie, Departement Umweltsystemwissenschaften, ETH Zürich (CH)
Matthias Dobbertin	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)†
Britta Eilmann	Universität und Forschungszentrum Wageningen (NL)
Arnaud Giuggiola	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)
Thomas Wohlgemuth	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)
Harald Bugmann	Waldökologie, Departement Umweltsystemwissenschaften, ETH Zürich (CH)

Forest and climate change in the inner-Alpine dry region of Visp

Over the past decades, observed increases in temperature have been particularly pronounced in mountain regions. If this trend should continue in the 21st Century, frequency and intensity of droughts will increase, and will pose major challenges for forest management. Under current conditions drought-related tree mortality is already an important factor of forest ecosystems in dry inner-Alpine valleys. Here we assess the sensitivity of forest ecosystems to climate change and evaluate alternative forest management strategies in the Visp region. We integrate data from forest monitoring plots, field experiments and dynamic forests models to evaluate how the forest ecosystem services timber production, protection against natural hazards, carbon storage and biodiversity will be impacted. Our results suggest that at dry low elevation sites the drought tolerance of native tree species will be exceeded so that in the longer term a transition to more drought-adapted species should be considered. At medium elevations, drought and insect disturbances as by bark beetles are projected to be important for forest development, while at high elevations forests are projected to expand and grow better. All of the ecosystem services that we considered are projected to be impacted by changing forest conditions, with the specific impacts often being elevation-dependent. In the medium term, forest management that aims to increase the resilience of forests to drought can help maintain forest ecosystem services temporarily. However, our results suggest that relatively rigid management interventions are required to achieve significant effects. By using a combination of environmental monitoring, field experiments and modeling, we are able to gain insight into how forest ecosystem, and the services they provide, will respond to future changes.

Keywords: climate change, forest management, ecosystem services, experiments, landscape model, water availability

doi: 10.3188/szf.2012.0481

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail andreas.rigling@wsl.ch

Der Temperaturanstieg im 20. und zu Beginn des 21. Jahrhunderts war in der Schweiz und anderen Gebirgsregionen besonders ausgeprägt – die gemessene Erwärmung war rund doppelt so hoch wie im globalen Durchschnitt (Begert et al 2005). Laut den Klimamodellen dürfte sich dieser Trend fortsetzen (Stott et al 2006, Parry et al 2007, CH2011). Gekoppelt an die Erwärmung dürften sich auch die Häufigkeit und die Intensität von Niederschlägen und Trockenperioden verändern (Frei 2004, Schär et al 2004, CH2011).

Klimaveränderungen haben direkte Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit, die Produktivität, die biogeochemischen Kreisläufe und eine Vielzahl weiterer Ökosystemprozesse (Peñuelas & Filella 2001). Auch indirekte Effekte wie zum Beispiel grö-

seres Waldbrandrisiko oder erhöhte Entwicklungsraten von Schadinsekten bei höheren Temperaturen (Bale et al 2002) dürften die Wald- und Landwirtschaft vor grosse Herausforderungen stellen.

Die grössten Veränderungen werden für Standorte erwartet, die durch Temperatur, Wasser oder die Vegetationsdauer limitiert sind, beispielsweise also alpine und subalpine Ökosysteme (Becker & Bugmann 2001), oder solche, die nahe der durch Trockenheit limitierten Verbreitungsgrenzen von Pflanzen liegen (Allen et al 2010), weil dort schon kleine klimatische Veränderungen grosse Auswirkungen auf das Überleben und somit die Verbreitung der Pflanzen haben können.

Trockenheit ist ein entscheidender Faktor für die Waldökosysteme der inneralpinen Täler, zum

Beispiel im Wallis. Auf den trockenen Standorten unterhalb 1200 m ü. M., wo die Waldföhre (*Pinus sylvestris*) teilweise dominant auftritt, werden seit mehreren Jahren verbreitet Absterbeprozesse beobachtet. Ähnliche Phänomene sind auch in anderen Trockentälern mit vergleichbaren klimatischen Bedingungen wie dem Churer Rheintal, dem Aostatal, dem Vinschgau und in der Region Innsbruck im Inntal festzustellen (Rigling et al 2006).

Wie überall in Mitteleuropa sind auch die Ökosysteme des Wallis stark durch die frühere Bewirtschaftung geprägt. Neben der Umwandlung von Wald- in Landwirtschafts- und Siedlungsflächen wurde auch der Wald selber seit Jahrhunderten durch den Menschen geprägt (Welten 1982). Über lange Zeit war die Entnahme von Brenn- und Bauholz gekoppelt mit einer intensiven Beweidung, in den tieferen Lagen vornehmlich durch Ziegen (Gimmi et al 2010). Dies führte zu offenen Wäldern und einer Verschiebung der Baumartenzusammensetzung hin zu schattenintoleranten, verbissresistenteren Arten wie der Waldföhre. Wir gehen davon aus, dass die nachlassende Nutzung während der vergangenen 50 Jahre zu dichteren Wäldern mit erhöhter Wasserverdunstung führte. Da die beobachtete Temperaturerhöhung ihrerseits zu höherer Verdunstung und Transpiration führt (Rebetez & Dobbertin 2004), ergibt sich während längerer Dürreperioden ein synergistischer Trockenheitseffekt. Ein episodisches trockenheitsbedingtes Absterben von Waldföhren ist im Wallis in den Lagen unterhalb 1200 m ü. M. für das 20. Jahrhundert nachgewiesen worden (z.B. Dobbertin et al 2007); das seit 1998 vermehrt beobachtete und teilweise massive Absterben von Waldföhren wurde wiederholt als Indiz des Klimawandels diskutiert (Bigler et al 2006).

In Anbetracht der veränderten Landnutzung und des wärmeren Klimas stellt sich die Frage, ob die einheimischen Baumarten auf trockeneren Standorten an ihre Grenzen stossen. Nicht nur die Waldföhre, sondern auch die sich ausbreitende Flaumeiche (*Quercus pubescens*) scheint in extremen Trockenjahren ums Überleben zu kämpfen – im Sommer 2003 zeigte sie massive Wachstumseinbrüche (Eilmann et al 2009) sowie Kronensterben und Blattabwurf bereits im Juli (Zweifel et al 2006). Wie gross darf die Klimaveränderung also sein, bevor sowohl Waldföhre als auch Flaumeiche ihre physiologischen Grenzen erreichen? Können wir mit einer angepassten Waldbehandlung die Trockenheitseffekte abmildern, und gibt es andere, nicht einheimische Baumarten, die in einem trockeneren und wärmeren Klima die im Wallis erwünschten Waldleistungen übernehmen könnten? Unser Blick in diesem Artikel richtet sich aber nicht nur auf diese trockensten Lagen des Wallis, sondern auf die gesamte Landschaft und somit auch auf die höheren Lagen.

Neben der ursprünglichen Ressourcenfunktion des Waldes (Brennholz, Bauholz, Streunutzung, Waldweide etc.) gewinnen heute weitere Leistungen zunehmend an Bedeutung, so in erster Linie der Schutz der Infrastruktur vor Naturgefahren, aber auch die Speicherung von Kohlenstoff oder die Landschaftsästhetik in einer zunehmend von Tourismus und Zersiedlung geprägten Region. Betrachtungen zu den Auswirkungen des Klimawandels sollten deshalb ein breites Portfolio von sogenannten Ökosystemleistungen (Millennium Ecosystem Assessment 2005) berücksichtigen und dürfen sich nicht auf einzelne Leistungen beschränken.

Im vorliegenden Beitrag, der ein Teil des Forschungsprojektes «Mountland» ist (Huber et al 2012, dieses Heft), geben wir einen Überblick über zentrale Ergebnisse aus jenen Teilprojekten, welche in der Region Visp (Abbildung 1) anhand von retrospektiven Beobachtungsdaten, Feldexperimenten und dynamischer Modellierung gewonnen wurden und als gemeinsames Oberziel hatten, die Sensitivität der verschiedenen Waldökosysteme gegenüber Klimawandel und alternativen, teilweise ungewöhnlichen und extremen Bewirtschaftungsmassnahmen zu testen. Dabei werden verschiedene Ökosystemleistungen berücksichtigt, so die Holzproduktion, der Schutz vor Naturgefahren, die Kohlenstoffspeicherung und Aspekte der Biodiversität.

Die konkreten Forschungsfragen des Projekts, auf die wir hier eingehen, sind:

- Wie gross ist die Trockenheitstoleranz einheimischer und möglicher Alternativbaumarten?
- Welche Waldentwicklung ist von der Talsohle bis zur oberen Waldgrenze zu erwarten, wenn sich das Klima gemäss bekannten Szenarien verändert?
- Welche Empfehlungen für die Baumartenwahl lassen sich daraus ableiten?

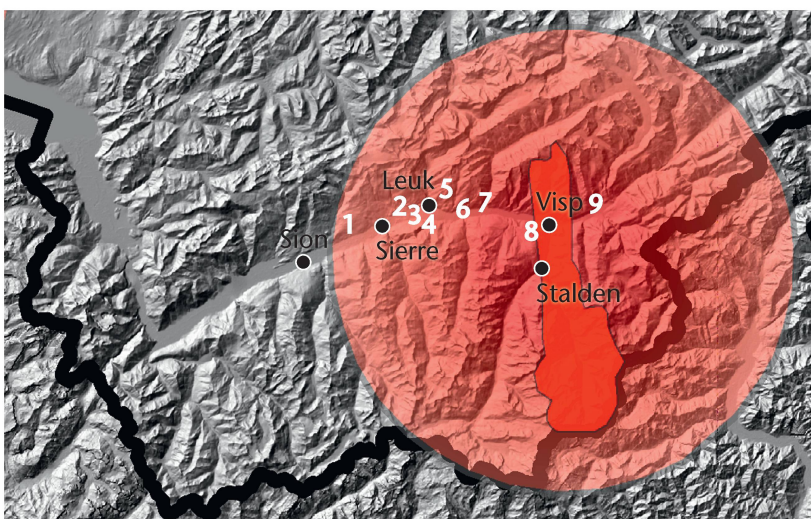


Abb 1 Das Untersuchungsgebiet und die Standorte der verschiedenen Feldexperimente und Monitoringflächen: Kerngebiet (dunkelrote Fläche), erweitertes Untersuchungsgebiet (schwächer rot gefärbte Fläche), langfristige Untersuchungsflächen Lens (1) und Visp (8), extreme Niederdurchforstung Salgesch (2), Bewässerungsexperiment Pfynwald (3), Durchforstungsexperiment Pfynwald (4), Waldbrandfläche Leuk (5), Regendachexperiment Susten (6), 40-jährige Aufforstung Gampel (7), Aufforstungsexperiment Lötschberg-Südrampe (9).

- Mit welchen waldbaulichen Eingriffen können der Wasserverbrauch in Waldbeständen reduziert und dadurch die Stabilitätsträger in den kritischen Beständen gestärkt werden?
- Welche Konsequenzen haben Klimawandel und unterschiedliche waldbauliche Eingriffe für die Eigenschaften der Wälder und die betrachteten Ökosystemleistungen Holzproduktion, Schutz vor Naturgefahren, Kohlenstoffspeicherung und Biodiversität?

Die Fallbeispielregion Visp

Das Untersuchungsgebiet ist die Region Visp im zentralen Wallis, wo mächtige Gebirgsketten die Niederschläge abschirmen und die ausgeprägteste Trockenheit in der Schweiz bewirken (Visp: Jahresniederschlag 599 mm, Jahresdurchschnittstemperatur 8.6 °C [Meteo Schweiz, Normperiode 1961 bis 1990]). Das Gebiet Sierre–Leuk, in welchem einige unserer Feldexperimente durchgeführt werden, liegt nahe Visp und zeigt eine ähnliche Trockenheitssituation. Das Kerngebiet, in welchem die räumlich expliziten Modellrechnungen durchgeführt werden, erstreckt sich vom Baltschiedertal im Norden über das Haupttal bei Visp nach Süden über Stalden bis nach Saas-Fee (Abbildung 1).

Limitierungen in der Waldentwicklung – Resultate aus Umweltmonitoring und Feldexperimenten

Aufgrund der zu beobachtenden, teils grossflächigen Veränderungen verschiedener walddynamischer Prozesse in den Walliser Wäldern wurden in den vergangenen zehn Jahren die Forschungsaktivitäten forciert. Das bestehende Umweltmonitoring

wurde ergänzt und intensiviert, Felduntersuchungen wurden durchgeführt und aufwendige Feldexperimente gestartet. Aufgrund dieser vielfältigen Untersuchungen können wir heute folgendes Bild der Waldentwicklung skizzieren:

Ansamungs- und Aufwuchsphase

Obwohl an einzelnen Standorten, zum Beispiel in der Region Salgesch, die Waldföhrenverjüngung gut gedeiht, zeigen Verjüngungserhebungen auf insgesamt 201 Standorten zwischen dem Talboden und 1600 m ü. M., dass die Waldföhre auf den Trockenstandorten mit erheblichen Verjüngungsschwierigkeiten zu kämpfen hat (Rigling et al 2006, 2012). Dies wurde durch die Untersuchungen auf der Waldbrandfläche Leuk bestätigt, wo acht Jahre nach dem Waldbrand von 2003 die Waldföhrenverjüngung auf den trockenen, tiefer gelegenen Standorten weitgehend fehlt, während Pioniere, insbesondere Pappeln, Weiden, Birken in grosser Menge anwachsen. Dabei ist festzuhalten, dass die Jahre 2004, 2005 und 2006 überdurchschnittlich trocken und heiss waren. In höheren und weniger trockenen Lagen ist die Baumverjüngung bezüglich Vielfalt und Menge deutlich erfolgreicher (Moser et al 2010, Wohlgenuth et al 2010). Auch die ersten Resultate aus dem Regendachexperiment bei Leuk zeigen, dass warm-trockene Bedingungen in der Keimungsphase den Anwuchserfolg erheblich reduzieren (Richter et al 2012). Dass Trockenjahre einen regelrechten Flaschenhals für die Baumverjüngung darstellen können, hat das extrem trockene Frühjahr 2011 deutlich vor Augen geführt: So hat dieses in einem Aufforstungsexperiment mit acht verschiedenen Baumarten an der Lötschberg-Südrampe für massive Ausfälle gesorgt, auch bei gut an die Trockenheit angepassten Baumarten. Der Anwuchserfolg betrug auf diesem Trockenstandort im Durchschnitt nur 20%, und sogar bei bewässerten Pflanzen betrug die Mortalität je nach Baumart noch bis zu 50% (Abbildung 2).

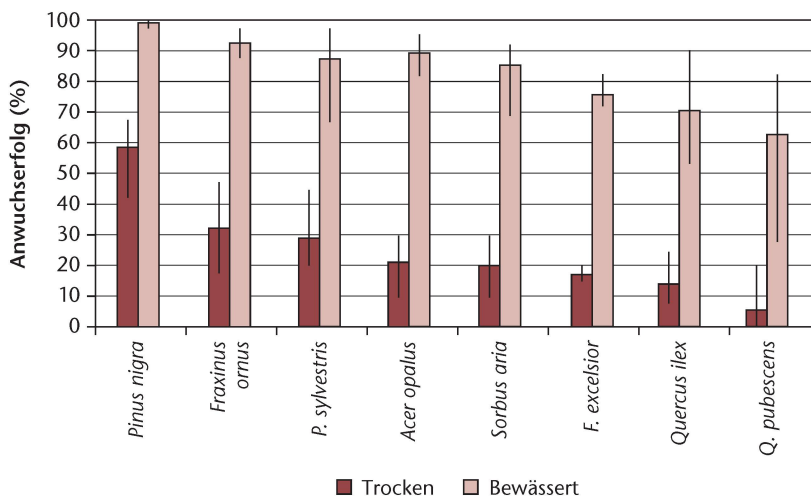


Abb 2 Mittlerer Anwuchserfolg von acht Baumarten in einer Pflanzung auf drei Trockenstandorten an der Lötschberg-Südrampe im Frühjahr 2011, mit und ohne Bewässerung. Die vertikalen Linien geben die Minimal- und Maximalwerte an.

Wachstumsphase

Jahrringanalysen bei vier verschiedenen Baumarten von 53 Standorten entlang des vollen Höhengradienten zeigten eine negative Beeinflussung des Jahrringwachstums durch die Trockenheit vom Talboden bis auf eine Höhe von 1450 m ü.M. Darüber und bis zur Waldgrenze scheinen nicht mehr die Niederschläge, sondern die Sommertemperaturen limitierend zu sein (Affolter et al 2010). Auch paarweise Vergleiche von Hoch- und Tieflagenstandorten (Fournier et al 2006), von Standorten mit mittlerer und schlechter Wasserversorgung (Rigling et al 2003, Weber et al 2007) oder von bewässerten und natürlichen Standorten (Rigling et al 2002, Eilmann et al 2009) belegen den limitierenden Einfluss der Trockenheit auf das Baumwachstum im Untersu-

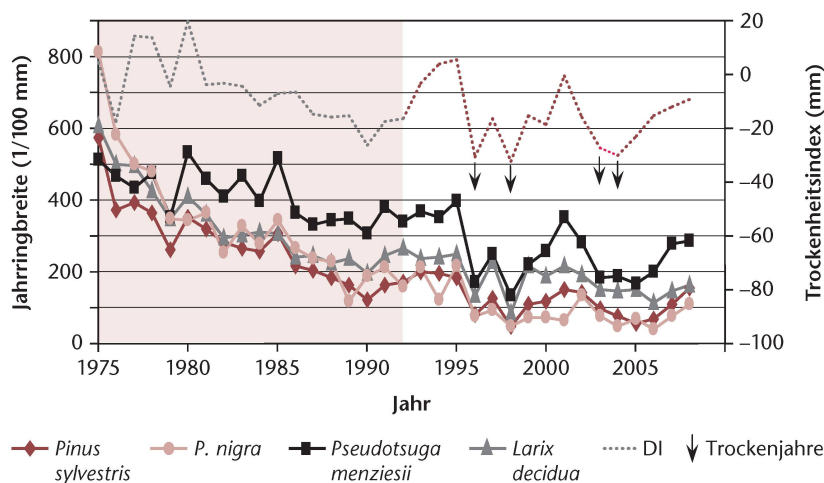


Abb 3 Zuwachsreaktion verschiedener Baumarten auf extreme Trockenjahre (Eilmann & Rigling 2012, abgeändert). Hervorgehobene Fläche: bewässerte Zeitperiode (bis 1992), DI: Trockenheitsindex.

chungsgebiet. In einer 40-jährigen Aufforstungsfläche in Gampel, welche bis 1992 bewässert worden war, untersuchten Eilmann & Rigling (2012) den Einfluss extremer Trockenjahre auf den Zuwachs von vier Baumarten (Abbildung 3). Aufgrund von Wachstumseinbrüchen in Trockenjahren, der Erholung danach und des Kronenzustandes der Bäume konnten Rückschlüsse auf die Trockenresistenz der vier Baumarten gewonnen werden. Dabei erwiesen sich die Schwarzföhre (*Pinus nigra*) und die Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) als deutlich robuster gegenüber Trockenheit als die Waldföhre. Am schlechtesten schnitt die Lärche ab. Folgen mehrere Trockenjahre aufeinander, verstärkt sich der negative Effekt auf den Zuwachs, und das Absterberisiko steigt an (Bigler et al 2006).

Absterbephase

Auf den langfristigen Waldökosystemforschungsfächen in Lens und Visp zeigt sich klar, dass die teilweise ausgedehnten Absterbeprozesse von extremen Trockenjahren wie 1996, 1998, 2003 und 2004 ausgelöst wurden (Dobbertin et al 2005). Bei Reduktion des Trockenstresses durch Bewässerung steigerten schütterere, geschwächte Bäume ihr Wachstum am deutlichsten, und sie erholten sich nach sechs feuchten Jahren fast vollständig. Entsprechend reduzierten sich auch die Absterberaten im Bestand signifikant (Dobbertin et al 2010). Aufgrund anderer Untersuchungen konnten Rigling et al (2006) zudem zeigen, dass auf Trockenstandorten mit hoher Bestandeskonkurrenz zwischen 1983 und 2003 am meisten Föhren abgestorben sind.

Möglichkeiten der Steuerung des Wasserverbrauchs durch die Waldbewirtschaftung

Ausgehend von Untersuchungen des Baumwachstums entlang von Bissen und eines Bewässerungsexperimentes stellte sich die Frage nach al-

ternativen Bewirtschaftungsmassnahmen, um die Mortalität zu reduzieren und die Widerstandskraft gegenüber Trockenheit zu erhöhen. Während schwache (-14% der Grundfläche) und mittlere Eingriffe (-40%) in einem Durchforstungsexperiment im Pfywald¹ nur geringe Effekte hatten, führten die starken Eingriffe (-68%) zu einer deutlichen Zunahme des Baumwachstums, zu einer Erhöhung des Bodenwassergehaltes in niederschlagsfreien Perioden um bis zu 8% und zu einer Abnahme der Baumsterblichkeit um mehr als 70% (Giuggiola et al, submitted).² Als weitere Massnahme zur Reduktion des Wasserverbrauchs wurde in Salgesch im Bereich von stark geschwächten dominanten Waldföhren eine sehr starke Niederdurchforstung durchgeführt, indem die unterdrückten Bäume der Oberschicht und zusätzlich die gesamte Strauchschicht (inkl. Zwergsträucher) entfernt wurden. Diese massiven Eingriffe führten wie erwartet zu einer Austrocknung der Bodenoberfläche, hingegen erhöhte sich schon ab einer Bodentiefe von 30 cm die Bodenfeuchtigkeit deutlich. Die Föhren reagierten sofort mit höherem Stammwachstum und besserer Wasserversorgung (Giuggiola et al, in preparation).³

Diese Resultate, welche die ökologischen Limitierungen in der Verjüngungs-, Wachstums- und Absterbephase aufzeigen, wurden zur Überprüfung und teilweisen Anpassung der Parametrisierung des Modells «LandClim» verwendet. Insbesondere wurde im Modell die Berechnung des Trockenstresses auf die gewählte Bewirtschaftungsvariante abgestimmt.

Das Landschaftsentwicklungsmodell «LandClim»

Funktionsweise

«LandClim» ist ein Landschaftsentwicklungsmodell, das spezifisch für Gebirgsräume entwickelt wurde, in denen Wald eine bedeutende Rolle spielt (Schumacher & Bugmann 2006). Die Verjüngung, das Wachstum, die Konkurrenz und die Mortalität werden in Zellen von 25 m × 25 m Grösse mit einer vereinfachten Version des Sukzessionsmodells «ForClim» modelliert (Bugmann 1996, Rasche et al 2011,

1 Dieses Experiment wurde im Jahr 1965 von Prof. H. Leibundgut (ETH Zürich) angelegt mit dem Ziel, das Wachstum der schlechtwüchsigen Waldföhrenbestände zu steigern. Im Jahr 2010 wurde das Experiment mit den ursprünglichen Vorgaben bezüglich Durchforstungsstärke wiederholt, wobei neu nicht die Förderung der Wuchsleistung, sondern die Untersuchung der Wasserverfügbarkeit und der Widerstandskraft der verbleibenden Bäume im Zuge der Stammzahlreduktion im Fokus standen.

2 GIUGGIOLA A, BUGMANN H, RIGLING A, ZINGG A, DOBBERTIN A (SUBMITTED) Reduction of stand density increases drought resistance in xeric Scots pine forests. For Ecol Manage.

3 GIUGGIOLA ET AL (IN PREPARATION) Effects of understory removal on overstory Scots pine trees at a xeric site.

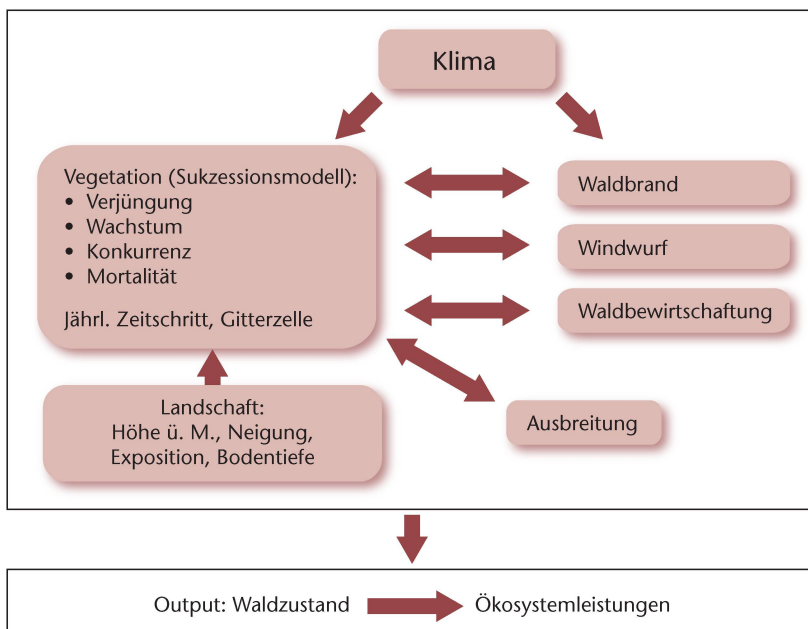


Abb 4 Übersicht über das Landschafts- und Waldentwicklungsmodell «LandClim».

2012). Dabei bestimmen die klimatischen Verhältnisse, die Bodeneigenschaften und das Terrain die Walddynamik auf der Ebene der einzelnen Zellen (Abbildung 4, links). Auf der Landschaftsebene (Abbildung 4, rechts) werden Waldbrände, Windwürfe, Bewirtschaftungseingriffe sowie die Ausbreitung von Samen modelliert, hingegen sind Schädlinge und Krankheiten nur indirekt, über das generelle Absterberisiko, abgebildet. Die klimatischen Verhältnisse wirken sich auch auf diese Prozesse aus. Schliesslich wird die kleinräumige Entwicklungsdynamik von den Landschaftsprozessen beeinflusst, und umgekehrt hängt das Störungsregime von den Eigenschaften des Waldes auf der Ebene der einzelnen Gitterzellen ab. Letztlich stellt «LandClim» das gekoppelte System Klima-Vegetation-Störungsregime dar. Für jede Gitterzelle wird der Waldzustand errechnet (Durchmesserverteilung, Artzusammensetzung etc.), und daraus werden mit sogenannten «Linker-Funktionen» die Ökosystemleistungen quantifiziert (Temperli et al 2012).

Verwendete Klimadaten und Bodeneigenschaften

Für die Anwendung von «LandClim» in der Region Visp unter heutigem Klima wurden die Klimadaten der Station Visp (640 m ü. M.) von Meteo Schweiz verwendet, und für die Simulation der Waldentwicklung unter einem zukünftigen Klima wurde das A1B-Szenario (Parry et al 2007) angenommen. Dieses bedeutet für das Saastal folgende mittlere Veränderungen im Sommer: Temperatur +5.3 °C, Niederschlag -41.2 mm; im Winter: Temperatur +4.8 °C, Niederschlag +105.8 mm. Aus dem Klimamodell «Echam5» standen monatliche Mittelwerte von

Temperatur und Niederschlagssummen zur Verfügung, welche mittels der Klimainterpolationssoftware «Daymet» (Thornton et al 1997) in Klimakarten mit Tageswerten und einer räumlichen Auflösung von 100 m umgerechnet wurden. Bezüglich der erwarteten Veränderung der Klimadaten zwischen den Jahren 2000 und 2100 wurde Linearität angenommen. Mithilfe des Geländemodells «SRTM-3» der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL (Auflösung 100 m) wurden die Klimadaten der Station Visp räumlich für das ganze Fallstudiengebiet extrapoliert.

Die Bodeneigenschaften wurden aufgrund einer leicht modifizierten empirischen Beziehung mit der Meereshöhe und der Hangneigung hergeleitet (Henne et al 2011): Unterhalb von 2000 m ü. M. nahmen wir eine Wasserverfügbarkeit (Differenz von Feldkapazität und permanentem Welkepunkt) von 15 cm in ebenem Gelände an, oberhalb dieser Meereshöhe liessen wir die Wasserverfügbarkeit um 1.8 cm pro 100 Höhenmeter absinken. Zusätzlich berücksichtigten wir die Tatsache, dass stark geneigte Hänge in aller Regel weniger gute Böden aufweisen, indem wir die Wasserverfügbarkeit bei Hangneigungen von mehr als 20° um 1 cm pro 10° Hangneigung reduzierten.

Implementierte Bewirtschaftungsvarianten

Die Waldbewirtschaftung wurde in «LandClim» mit verschiedenen Bewirtschaftungsvarianten modelliert. Diese Varianten haben wir unter Bezug von waldbaulichem Expertenwissen und aufgrund der Ergebnisse der Feldexperimente hinsichtlich Trockenstress hergeleitet. Sie sind nicht als bestmögliche Alternativen zur heutigen Bewirtschaftung zu verstehen, sondern wurden verwendet, um die Reaktionen der verschiedenen Waldökosysteme und den zur Verfügung stehenden Spielraum bei den Massnahmen bei rigoroser Anwendung zu testen.

Die Status-quo-Bewirtschaftung im Modell hat zum Ziel, die heutige Verteilung der Baumarten und die heutigen Bestandesstrukturen auf möglichst einfache Weise zu approximieren. Das Szenario fokussiert auf alle Gebirgswälder und basiert auf der Annahme, dass höchstens die Hälfte aller Bestände mit Oberhöhe von mehr als 10 m einmal pro Jahrzehnt bewirtschaftet wird. Die waldbaulichen Eingriffe entfernen 80% der Bäume, welche den Zieldurchmesser erreicht haben. Für Lärche (*Larix decidua*), Fichte (*Picea abies*), Waldföhre (*Pinus sylvestris*), Tanne (*Abies alba*) und Eiche (*Quercus* spp.) wurde ein relativ hoher Zieldurchmesser von 80 cm festgelegt, für die anderen Baumarten betrug er 60 cm.

Eine zweite Bewirtschaftungsvariante simuliert die ausschliessliche Anwendung von intensiven Stabilitätsdurchforstungen. Dabei wurde angenommen, dass jeder Bestand alle 25 Jahre bewirtschaftet wird, wobei pro Bestand 20% aller Rotten (Kohor-

ten in «LandClim») mit einem durchschnittlichen Brusthöhendurchmesser (BHD) zwischen 20 und 50 cm entfernt werden. Bestände mit einer Oberhöhe unter 5 m werden nicht bewirtschaftet.

Zur Erreichung einer grösseren Heterogenität der Waldtextur wurde eine dritte Bewirtschaftungsvariante simuliert: die alleinige Anwendung von Verjüngungsschlitten. Dabei wurde die Annahme getroffen, dass in jedem Bestand alle 50 Jahre Seilkranlinien angelegt und 10% des Volumens entfernt werden.

In einer vierten Bewirtschaftungsvariante wird ausnahmslos eine extreme Form der Niederdurchforstung angewendet. Damit wollten wir untersuchen, ob eine starke Reduktion der Bestandesdichte einen deutlich positiven Einfluss auf die Verdunstung und somit auf die Wasserverfügbarkeit und den Zuwachs der verbleibenden Bäume haben könnte. Dabei nahmen wir an, dass in 80% aller Bestände alle Bäume mit einem BHD <10 cm inklusive der Strauchschicht entfernt würden.

Jede dieser drei alternativen Bewirtschaftungsvarianten wurde nach Ablauf der Status-quo-Bewirtschaftung (3000 Jahre bis zum Start im 21. Jahrhundert; sog. «spin-up» des Modells), welche ein Gleichgewicht zwischen Klima, waldbaulichen Eingriffen und Waldeigenschaften herstellt, angewendet. Dabei wurde zuerst das alternative Szenario angewendet und dann geprüft, ob es noch Bestände gibt, die gemäss der Status-quo-Bewirtschaftung behandelt werden sollten.

Jede Bewirtschaftungsvariante wurde über die gesamte Landschaft angewendet, ohne den An-

spruch, dass dies realistisch wäre, sondern um evaluieren zu können, wie gross die Effekte und ihre Vorzeichen sind (d.h., wo wäre ein gegebenes Bewirtschaftungsregime besonders geeignet?).

Betrachtete Ökosystemleistungen

Die vier Ökosystemleistungen Holzproduktion, Schutz vor Steinschlag und Lawinen, C-Speicherung sowie Biodiversität wurden anhand von sogenannten Linker-Funktionen quantifiziert; detaillierte Beschreibungen sind in Temperli et al (2012) und Elkin et al (2012) zu finden:

- Die Holzproduktion wurde errechnet als das geerntete Derbholumen unter den verschiedenen Bewirtschaftungsvarianten.
- Die C-Speicherung wurde bestimmt aufgrund der oberirdischen, stehenden Baumbiomasse anhand von Expansions- und Konversionsfaktoren gemäss Penman et al (2003).
- Bezüglich der Schutzwirkung vor Lawinen und Steinschlag übernahmen wir die Anforderungsprofile des NaiS-Projektes (Frehner et al 2005), wobei der Steinschlagindex die Stammzahl, den BHD der Bäume und ihre Fähigkeit zur Energiedissipation (Bigot et al 2009, Perret et al 2004) bestandesweise berücksichtigt. Der Lawinenschutzindex basiert auf dem Blattflächenindex des Bestandes (wegen der Schneeeinterzeption) und der Stammzahl der stehenden toten und lebenden Bäume (Stabilisierung der Schneedecke).
- Aspekte der Biodiversität wurden bestandesweise erfasst mit einem Index, welcher die Baumartendiversität sowie die Verteilung der Baumhöhen und die Durchmesserstruktur berücksichtigt (Staudhammer & LeMay 2001), Letzteres als Mass für die vertikale Strukturierung der Bestände.

Ergebnisse des Modells «LandClim» und Diskussion

Veränderung der Baumbiomasse

Unter der heutigen Bewirtschaftung (Bewirtschaftungsvariante «Status quo») ergibt die Simulation für das Jahr 2000 eine Verteilung der oberirdischen Baumbiomasse, welche die vorherrschenden Umweltgradienten in der Region Visp gut wiedergibt (Abbildung 5): In der Talsohle des Rhonetals sowie im Vispertal um Stalden wachsen aufgrund der Trockenheit Wälder mit sehr geringer Biomasse; in den mittleren Lagen, und dort vor allem an den Nordhängen, erreicht die Biomasse Maximalwerte im Bereich von 320–380 t/ha, und gegen die obere Waldgrenze hin nimmt sie wiederum stark ab, diesmal bedingt durch die tiefen Temperaturen.

An diesem Muster ändert sich bis ins Jahr 2050 gemäss der Modellierung praktisch nichts, mit Ausnahme eines trockenheitsbedingten Rückgangs der

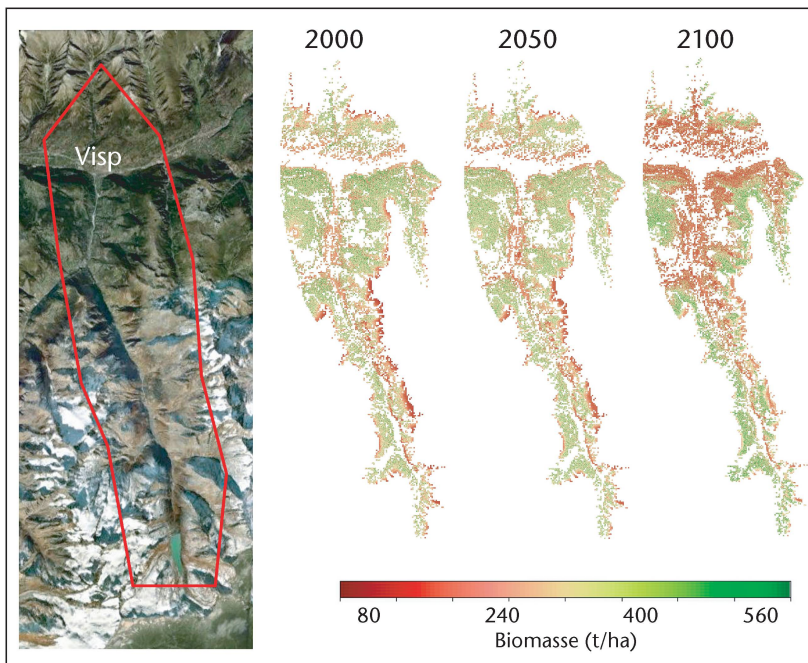


Abb 5 Das Untersuchungsgebiet (links) und die simulierten oberirdischen Baumbiomassen in den Jahren 2000, 2050 und 2100, unter Annahme einer Fortsetzung der heutigen Waldbewirtschaftung bei fortwährendem Klimawandel (rechts).

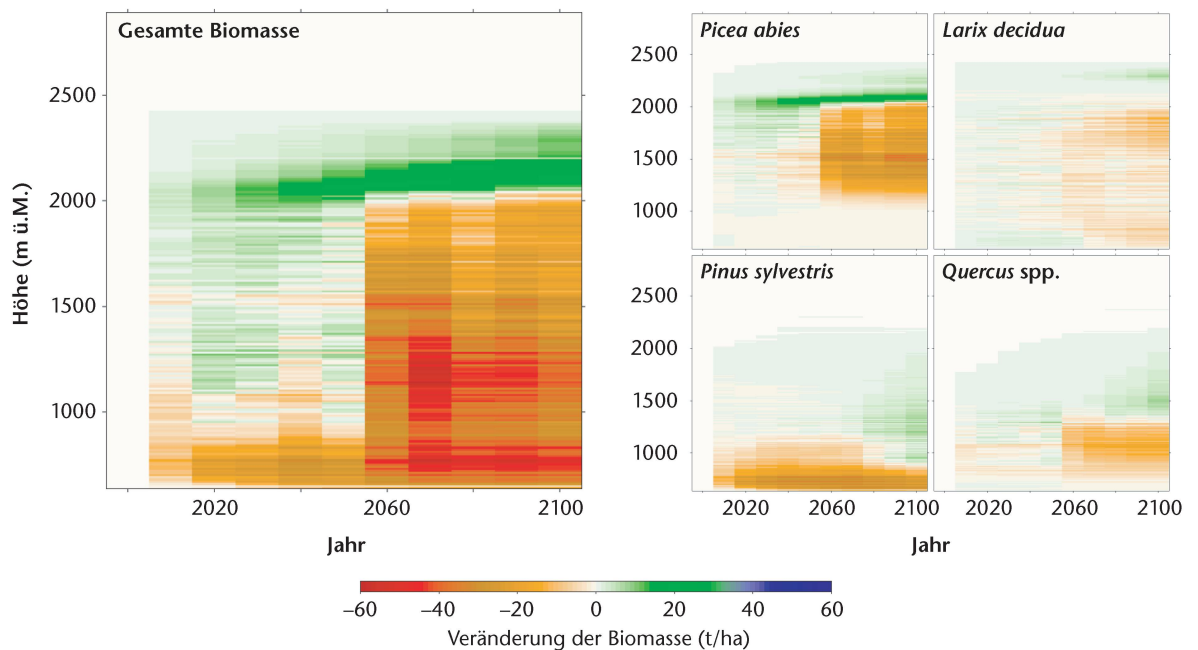


Abb 6 Simulierte Veränderung der oberirdischen Baumbiomasse (links) und der Biomasse pro Hauptbaumart (rechts) unter Annahme einer Fortsetzung der heutigen Waldbewirtschaftung bei fortwährendem Klimawandel. Abweichung in Tonnen pro ha vom Zustand 2000, gemittelt über das gesamte Untersuchungsgebiet in 50-m-Höhenbändern.

Biomasse in der Gegend von Stalden und einer leichten Zunahme derselben gegen die obere Waldgrenze hin aufgrund der wärmeren Wuchsbedingungen (Abbildung 5). Diese langsamen Veränderungen mögen erstaunen, sie sind aber plausibel, bedingt einerseits durch die Plastizität und Resistenz der Baumarten und andererseits durch die Tatsache, dass die Klimaveränderung bis zum Jahr 2050 im hier verwendeten Klimaszenario noch keine dramatischen Ausmasse erreicht hat.

Grössere, teils drastische Änderungen zeichnen sich hingegen bis ins Jahr 2100 ab, indem die Baumbiomasse von der Talsohle bis auf circa 2000 m ü. M. stark abnimmt, dafür in den höchsten Lagen merklich ansteigt (Abbildung 5). Diese Muster sind besser sichtbar, wenn man die Biomassenveränderung pro Höhenlage betrachtet (Abbildung 6). Aus dieser Abbildung wird auch ersichtlich, dass der leicht positive Biomassentrend der Jahre 2000 bis 2050 in den Höhenlagen von 1000 bis 2000 m ü. M. gebrochen beziehungsweise gar umgekehrt wird. Dieser Effekt resultiert aus der Simulation einer Häufung von extremen Trockenjahren nach dem Jahr 2050. Dabei ist es wichtig, sich immer zu vergegenwärtigen, dass Simulationsresultate keine Prognosen darstellen können: So beruhen in unserer Anwendung die Inputdaten des Modells auf einer zufälligen Selektion von Klimaereignissen, die ab 2050 eintreten könnten, wobei die Klimamodelle selbst keinerlei Anhaltspunkte für einen ausgerechnet in den 2050er-Jahren stattfindenden, abrupten Wechsel geben. Die simulierte Dynamik zeigt aber eindrücklich auf, dass während langer Zeit «nichts» zu passieren scheint,

bis aufgrund von Extremereignissen eine markante Dynamik in eine neue Richtung eingeleitet wird. Dies stimmt mit empirischen Befunden zum Beispiel von Bigler et al (2006), Bolli et al (2007) und Tinner & Lotter (2001) überein.

Abbildung 6 zeigt auch, wie sich gemäss «LandClim» die vier Hauptbaumarten im Klimawandel verhalten dürften: Der heute bereits zu beobachtende Rückgang der Waldhöhe in den tiefsten Lagen verstärkt sich laufend, wovon die Eichen vorerst noch leicht profitieren. Diese erreichen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts dann aber ebenfalls ihre Grenze und erleiden danach Biomasseeinbussen. Die Fichte hält sich bis 2050 und profitiert oberhalb von 2000 m ü. M. sogar, erleidet aber nach 2050 vor allem in den mittleren Lagen trockenheitsbedingt einen starken Rückgang, wogegen sie in den höchsten Lagen einen erheblichen Biomasseanstieg verzeichnet. Die Lärche schliesslich kann sich in ihrem heutigen Verbreitungsgebiet halten.

Veränderung von Waldleistungen

Bei der Bewirtschaftungsvariante «Status quo» beläuft sich das durchschnittliche Erntepotenzial im Untersuchungsgebiet heute auf ca. $2 \text{ m}^3/(\text{ha} \times \text{J})$ (Abbildung 7a), wobei vor allem Fichten-, Lärchen- und Föhrenholz geerntet werden könnte. Aufgrund der Temperaturerhöhung steigt die Erntemenge auf gut $2.5 \text{ m}^3/(\text{ha} \times \text{J})$ an, getrieben durch den verbesserten Zuwachs der Fichten. Danach nimmt der Biomassezuwachs der Fichte aber aufgrund der zunehmenden Trockenheit ab, weshalb das Erntepotenzial auf knapp $2 \text{ m}^3/(\text{ha} \times \text{J})$ im Jahr 2100 absinkt.

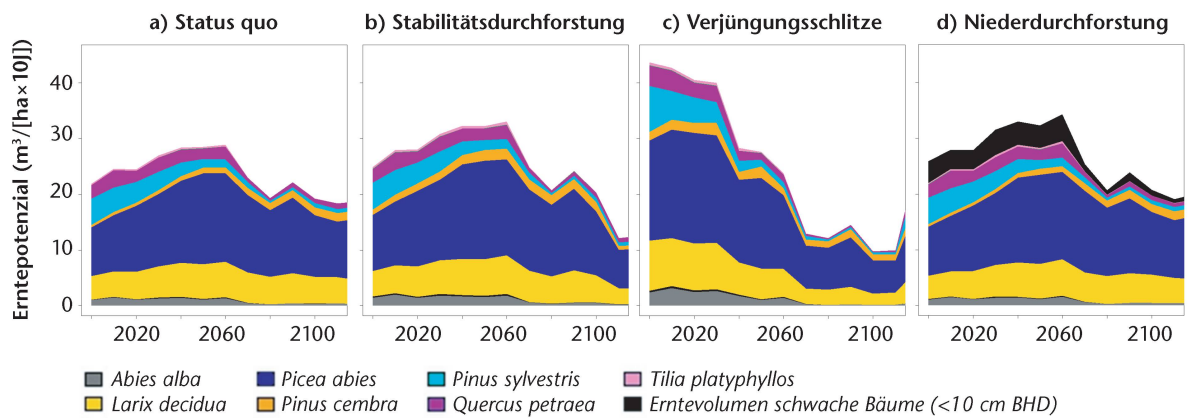


Abb 7 Erntepotenzial als Derbholzvolumen unter den vier Bewirtschaftungsvarianten und fortschreitendem Klimawandel. Derbholzvolumen in m^3/ha pro Jahrzehnt, gemittelt über das Waldareal des gesamten Fallstudiengebiets.

Mit der Variante «Stabilitätsdurchforstung» (Abbildung 7b) sind die möglichen Erntemengen ab Beginn der Simulation grösser und erreichen ein Maximum von beinahe $3 m^3/(ha \times J)$ im Jahr 2060, danach fallen die Mengen aber unter jene der Variante «Status quo» und erreichen lediglich rund $1 m^3/(ha \times J)$ im Jahr 2100.

Die ausschliessliche Anlage von Verjüngungsschlitzen (Abbildung 7c) führt zu einer wesentlich stärkeren Holznutzung bis ins Jahr 2040, danach gehen die Erntemengen deutlich zurück und erreichen bis zum Jahr 2100 ein ähnlich tiefes Niveau wie bei der Stabilitätsdurchforstung.

Die Variante «Niederdurchforstung» schliesslich bringt eine leichte Erhöhung der möglichen Erntemengen bis 2060 gegenüber der Status-quo-Variante (Abbildung 7d), wobei sich das zusätzlich anfallende Holz nur als Energieholz eignet.

Die vier Bewirtschaftungsvarianten führen zu ähnlichen, im Detail aber doch unterschiedlichen Veränderungen in den anderen betrachteten Ökosystemleistungen (Abbildung 8). Bezüglich der C-Speicherung führen alle drei alternativen Bewirtschaftungsvarianten zu einer Abnahme, was nicht verwundert, da hier davon ausgegangen wird, dass die Bewirtschaftungsintensität steigt, was zu einer Vorratsreduktion führen muss. Diese fällt bei der Variante «Niederdurchforstung» aufgrund der Eingriffe in den untersten BHD-Klassen am schwächsten aus.

Bezüglich des Steinschlagschutzes führen vor allem die Stabilitätsdurchforstungen und in geringerem Ausmass die Niederdurchforstungen unterhalb von 1500 m ü. M. zu einer Abnahme der Wirksamkeit, wogegen die Verjüngungsschlitze zu keiner Veränderung oder sogar zu einer leichten Verbesserung des Steinschlagschutzes in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts führen würden (Abbildung 8). In den Lagen oberhalb von 2000 m ü. M. verbessert sich die Steinschlagschutzwirkung des Waldes stetig, basierend auf dem zunehmenden Zuwachs und der Etablierung neuer Bäume in diesen derzeit meist sehr offenen Wäldern (Bebi et al 2012, dieses Heft).

Da in Zukunft die Winterniederschläge in tieferen Lagen vermehrt als Regen und weniger als Schnee fallen dürften, wird die Bedeutung des Lawinenschutzes unterhalb von 1500 m ü. M. eher abnehmen. Oberhalb dieser Höhenlage verschlechtert sich der Lawinenschutz in allen Varianten spätestens in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts (Abbildung 8), wobei in den höchsten Lagen – analog zur Zunahme der Schutzwirkung vor Steinschlag – eine Verbesserung zu erwarten ist.

Schliesslich ist bezüglich der Strukturdiversität festzustellen, dass unterhalb von ca. 1200 m ü. M. generell Verarmungen zu erwarten sind, wogegen in den höheren Lagen ein Anstieg eintreten dürfte (Abbildung 8). Dabei ist bemerkenswert, dass die stärkeren Eingriffe bei den Varianten «Stabilitätsdurchforstungen» und «Verjüngungsschlitze» zu einer deutlichen Erhöhung der Strukturdiversität führen, die je nach Szenario etwas früher oder später eintritt.

Die in Abbildung 8 dargestellten Veränderungen mögen teilweise überraschen, so zum Beispiel dass gerade die Bewirtschaftungsvariante «Verjüngungsschlitze» bezüglich Lawinenschutz am besten abschneidet. Der Grund liegt in der gewählten Definition der Indizes, mit welchen die Ökosystemleistungen charakterisiert werden, und im Umstand, dass jeder Index die Komplexität eines Bestandes in einer «LandClim»-Gitterzelle auf eine einzige Zahl reduziert. Zwar haben wir uns bemüht, den aktuellen Forschungsstand bezüglich der Ökosystemleistungen bestmöglich zu integrieren, aber wie zum Beispiel die verschiedenen Aspekte des Lawinenschutzes aus den Anforderungsprofilen des Projekts «Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald» (NaiS; Frehner et al 2005) gewichtet werden, unterliegt letztlich der Subjektivität. An der Darstellung der Ökosystemleistungen anhand von einfachen Kennzahlen führt bei der Modellierung kein Weg vorbei, aber die Ergebnisse sind mit Vorsicht zu interpretieren.

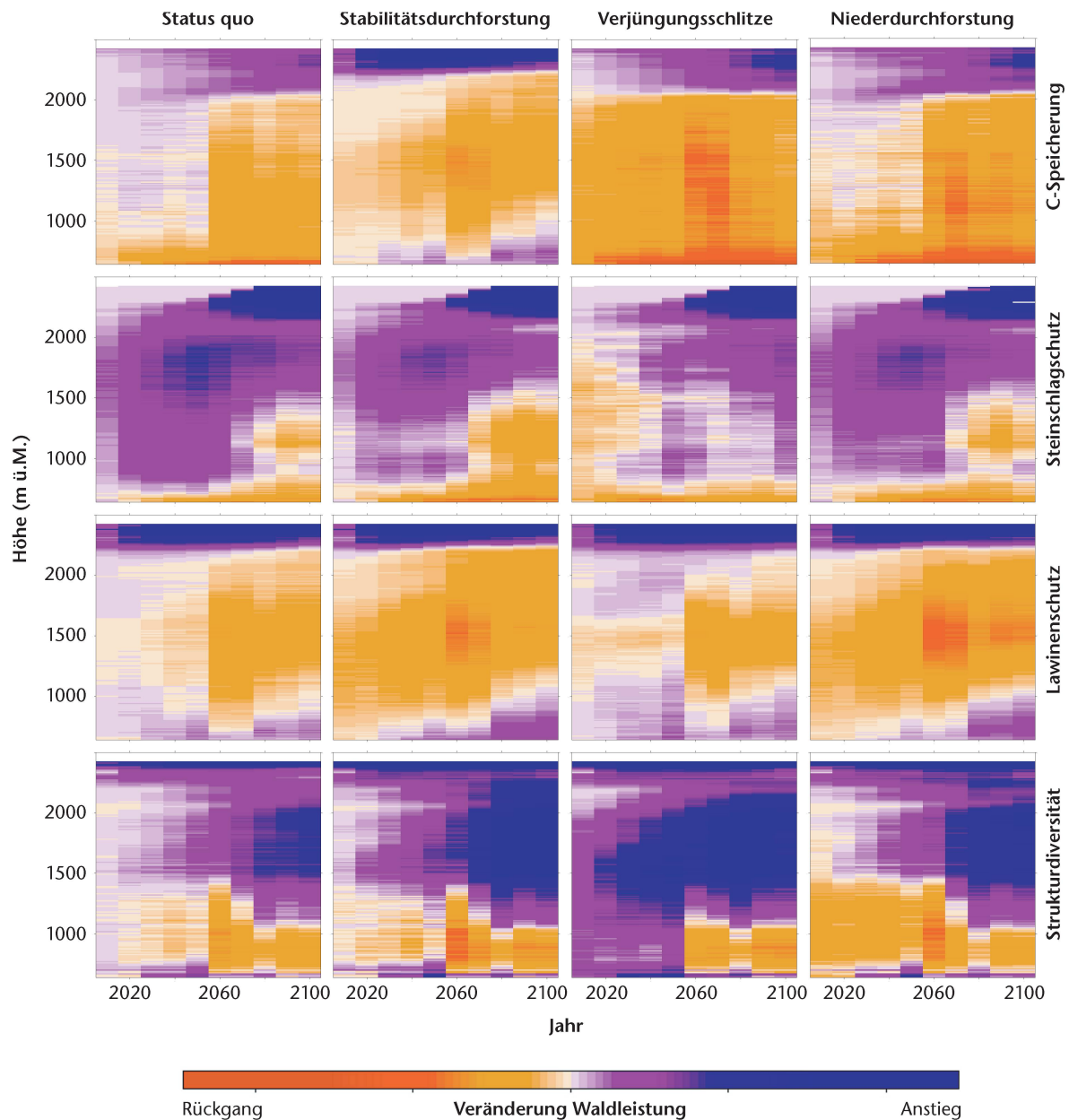


Abb 8 Effekte der vier Bewirtschaftungsvarianten auf die Veränderung der Waldleistungen C-Speicherung (t/ha), Steinschlag- und Lawinenschutz (einheitslose Indizes, skaliert von 0 bis 100) sowie Strukturdiversität als ein Aspekt von Biodiversität (einheitsloser Index, skaliert von 0 bis 20).

Fazit

Selbstredend hängt die zukünftige Waldentwicklung stark von der tatsächlichen Klimaentwicklung ab. Das von uns gewählte Szenario A1B ist als relativ extrem einzuschätzen, und dabei spielen für ein Trockengebiet wie das Wallis die Niederschlagsmengen, welche im Gegensatz zur Temperatur mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind, eine Schlüsselrolle. Wenn die Niederschläge im Frühjahr abnehmen und trockene Sommer häufiger auftreten, wie wir das für die Modellierung mit «LandClim» angenommen haben, dürften sich die Wälder in den tieferen Lagen der Region Visp auflichten, und die einheimischen Baumarten dürften an ihre

physiologischen Grenzen stossen. Unter diesen Umständen ist zu prüfen, ob Baumarten beispielsweise aus dem Mittelmeerraum eine Alternative darstellen und wichtige Waldleistungen übernehmen könnten – ihre Frosttoleranz und ihre Anfälligkeit gegenüber Schädlingen und Krankheiten dürften dabei entscheidend sein. Auch in den mittleren Lagen dürften sowohl die Trockenheit als auch die Schadinsekten, allen voran die Borkenkäfer, vermehrt eine Schlüsselrolle spielen (Rigling et al 2008). In den Hochlagen hingegen dürften die Wälder sich ausdehnen und besser wachsen als heute.

Die dargestellten Modellierungen mit «LandClim» weisen darauf hin, dass alle untersuchten Ökosystemleistungen von klimabedingten Verände-

rungen betroffen sein werden. Diese werden mindestens in Teilen des Untersuchungsgebiets so stark sein, dass die schon heute schwierige Abwägung zwischen den verschiedenen, sich zum Teil konkurrierenden Waldleistungen in Zukunft noch schwieriger werden dürfte. Dies könnte dazu führen, dass eine multifunktionale Bewirtschaftung nicht mehr überall möglich ist.

Die für die Modellierung verwendeten Bewirtschaftungsvarianten basieren auf vereinfachten Annahmen. Es ist uns aber wichtig, festzuhalten, dass der Wasserhaushalt der Bestände, hauptsächlich in den tieferen Lagen unterhalb 1200 m ü. M., durch Bewirtschaftungsmassnahmen beeinflusst werden kann und dass dadurch die Widerstandskraft der Bäume gegenüber Trockenperioden mindestens vorübergehend erhöht werden kann. Aufgrund der experimentellen und modellbasierten Resultate müssen wir aber davon ausgehen, dass nur verhältnismässig starke Eingriffe wesentliche Effekte erzielen können. Neben den hier diskutierten Massnahmen zur Reduktion des Wasserverbrauches (Reduktion von Stammzahl, Strauch- und Krautschicht) sind die geeignete Baumartenwahl und -mischung sowie die Länge der Umtriebszeit nach wie vor die zentralen Steuerungsinstrumente. Auch wegen des erwarteten zunehmenden Absterberisikos der Bäume als Folge von Insektenbefall und Pflanzenkrankheiten, welche im verwendeten Modell nur indirekt berücksichtigt werden, muss auf den Trockenstandorten längerfristig über alternative Baumarten nachgedacht werden. Schutzbauten als mögliche Alternative zu Wald sind aus unserer Sicht meist als nachteilig zu bewerten.

Die Verknüpfung von Umweltmonitoring, Feldexperimenten und Modellierung unter Mitbezug von Ökosystemleistungen ist vielversprechend, da sie eine differenzierte Abschätzung des zukünftigen Landschaftswandels und seiner Effekte auf die Waldleistungen ermöglicht. Selbstverständlich ist uns bewusst, dass es einfach ist, alternative Bewirtschaftungsvarianten zu testen, wenn man keine Rechenschaft über ihre ökonomische Machbarkeit abzulegen braucht. Tatsächlich basieren alle hier besprochenen experimentellen und modellgestützten Ansätze auf der Annahme, dass machbar ist, was ökologisch respektive aufgrund der gestellten Ansprüche an den Wald sinnvoll erscheint. Wenn wir davon ausgehen dürfen, dass die gemeinwirtschaftlichen Komponenten der Gebirgsforstwirtschaft auch in Zukunft weitaus bedeutender sein werden als die Einnahmen aus dem Holzverkauf und dementsprechend von der Gesellschaft als sinnvoll und notwendig anerkannte Bewirtschaftungsmassnahmen auch in Zukunft durch entsprechende Subventionen unterstützt werden, ist diese Annahme weniger naiv, als sie auf den ersten Blick vielleicht erscheinen mag.

Der Forschungsansatz von «Mountland» ist eine Verknüpfung von Umweltmonitoring, Feldexperimenten und Modellierung – eine Synthese also, die bis heute kaum gewagt wurde, da sie eine umfassende Datengrundlage voraussetzt, die nur in wenigen Regionen weltweit zur Verfügung steht, und weil sie aufgrund der vielen Schnittstellen methodisch anspruchsvoll ist. Wir sind überzeugt, dass dieser Ansatz, obwohl aufwendig, stimulierend ist für die Klimafolgenforschung; wir zeigen mit diesem Bericht die Bedeutung einer modellbasierten Abschätzung der zukünftigen Waldentwicklung, welche auf einem modernen Umweltmonitoring basiert, das wiederum nicht möglich wäre ohne die grossen Anstrengungen seitens des Bundes, der Kantone und der Forschungsinstitutionen. ■

Eingereicht: 2. Mai 2012, akzeptiert (mit Review): 1. November 2012

Dank

Die aufwendigen Feldexperimente wurden unterstützt durch den Schweizerischen Nationalfonds, das Bundesamt für Umwelt, die Velux-Stiftung, Interreg IIIA, die BLS AG und die Hydro-Exploitation SA. Die langjährige Forschungszusammenarbeit basiert auf der tatkräftigen Unterstützung durch die Dienststelle für Wald und Landschaft des Kantons Wallis, die lokalen Forstdienste und die involvierten Gemeinden. Die Klimadaten wurden durch Dirk Schmatz (WSL) aufbereitet. Die Synthese der Forschungsarbeiten wurde im Rahmen des Forschungsprojektes «Mountland» im Kompetenzzentrum Umwelt und Nachhaltigkeit (CCES) des ETH-Bereiches durchgeführt.

Literatur

- AFFOLTER P ET AL (2010) Inner Alpine conifer response to 20th century drought swings. *Eur J For Res* 129: 289–298.
- ALLEN CD ET AL (2010) Drought-induced forest mortality: A global overview reveals emerging climate change risks. *For Ecol Manage* 259: 660–684.
- BALE JS ET AL (2002) Herbivory in a global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Glob Chang Biol* 88: 1–16.
- BEBI P ET AL (2012) Veränderung von Wald und Waldleistungen in der Landschaft Davos im Zuge des Klimawandels. *Schweiz Z Forstwes* 163: 493–501. doi: 10.3188/szf.2012.0493
- BECKER A, BUGMANN H (2001) Global change and mountain regions: The Mountain Research Initiative. Stockholm: IGBP Secretariat, Report 49. 86 p.
- BEGERT M, SCHLEGEL T, KIRCHHOFER W (2005) Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. *Int J Climatol* 25: 65–80.
- BIGLER C, BRÄKER OU, BUGMANN H, DOBBERTIN M, RIGLING A (2006) Drought as inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland. *Ecosystems* 9: 330–343.

- BIGOT C, DORREN L, BERGER F (2009)** Quantifying the protective function of a forest against rockfall for past, present and future scenarios using two modelling approaches. *Nat Hazards* 49: 99–111.
- BOLLI J, RIGLING A, BUGMANN H (2007)** Regeneration dynamics of Norway spruce (*Picea abies* L.) on a subalpine meadow near the treeline in Sedrun, Kt. Graubünden, Switzerland. *Silva Fenn* 41: 55–70.
- BUGMANN H (1996)** A simplified forest model to study species composition along climate gradients. *Ecology* 77: 2055–2074.
- CH2011 (2011)** Swiss climate change scenarios CH2011. Zürich: C2SM88 p.
- DOBBERTIN M ET AL (2005)** The decline of *Pinus sylvestris* L. forests in the Swiss Rhone Valley – a result of drought stress? *Phyton* 45: 153–156.
- DOBBERTIN M ET AL (2007)** Linking increasing drought stress to Scots pine mortality and bark beetle infestations. *Sci World J* 7 (S1): 231–239.
- DOBBERTIN M ET AL (2010)** Effect of irrigation on needle morphology, shoot and stem growth in a drought-exposed *Pinus sylvestris* forest. *Tree Physiol* 30: 346–360.
- EILMANN B, ZWEIFEL R, BUCHMANN N, FONTI P, RIGLING A (2009)** Drought-induced adaptation of the xylem in Scots pine and pubescent oak. *Tree Physiol* 29: 1011–1020.
- EILMANN B, RIGLING A (2012)** Using tree-growth analysis to estimate drought tolerance of different tree species. *Tree Physiol* 32: 178–187.
- ELKIN C, REINEKING B, BIGLER C, BUGMANN H (2012)** Do small-grain processes matter for landscape scale questions? Sensitivity of a forest landscape model to the formulation of tree growth rate. *Landsc Ecol* 27: 697–711.
- FOURNIER N, RIGLING A, DOBBERTIN M, GUGERLI F (2006)** Faible différenciation génétique, à partir d'amplification aléatoire d'ADN polymorphique (RAPD), entre les types de pin sylvestre d'altitude et de plaine (*Pinus sylvestris* L.) dans les Alpes à climat continental. *Ann Sci For* 63: 431–439.
- FREHNER M, WASSER B, SCHWITTER R (2005)** Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald Landschaft. 564 p.
- FREI C (2004)** Klimazukunft der Schweiz – eine probabilistische Projektion. Zürich: Meteo Schweiz. 8 p.
- GIMMI U, WOHLGEMUTH T, RIGLING A, HOFFMANN CW, BÜRGI M (2010)** Land-use and climate change effects in forest compositional trajectories in a dry Central-Alpine valley. *Ann For Sci* 67. doi: 10.1051/forest/2010026
- HENNE PD, ELKIN CM, REINEKING B, BUGMANN H, TINNER W (2011)** Did soil development limit spruce (*Picea abies*) expansion in the Central Alps during the Holocene? Testing a palaeobotanical hypothesis with a dynamic landscape model. *J Biogeogr* 38: 933–949.
- HUBER R, WALZA, RIGLING A (2012)** Nachhaltige Land- und Forstwirtschaft im Berggebiet: das Forschungsprojek «Mountland». *Schweiz Z Forstwes* 163: 464–468. doi: 10.3188.szf/2012.0464
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005)** Ecosystems and human well-being: Synthesis. Washington DC: Island Press. 155 p.
- MOSER B, TEMPERLI C, SCHNEITER G, WOHLGEMUTH T (2010)** Potential shift in species composition after fire in the central Alps. *Eur J For Res* 129: 625–633.
- PARRY M, CANTINA O, PALUTIKOF J, VAN DER LINDEN P, HANSON C, EDITORS (2007)** Climate change 2007 – Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge Univ Press. 976 p.
- PENMAN J ET AL (2003)** Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Hayama: Technical Support Unit, IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme. www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_contents.html (18.10.2012).
- PEÑUELAS J, FILELLA I (2001)** Phenology: responses to a warming world. *Science* 294: 793–795.
- PERRET S, DOLF F, KIENHOLZ H (2004)** Rockfalls into forests: Analysis and simulation of rockfall trajectories – considerations with respect to mountainous forests in Switzerland. *Landslides* 1: 123–130.
- RASCHE L, FAHSE L, ZINGG A, BUGMANN H (2011)** Getting a virtual forester fit for the challenge of climatic change. *J Appl Ecol* 48: 1174–1186.
- RASCHE L, FAHSE L, ZINGG A, BUGMANN H (2012)** Enhancing gap model accuracy by modeling dynamic height growth and dynamic maximum tree height. *Ecol Model* 232: 133–143.
- REBETEZ M, DOBBERTIN M (2004)** Climate change may already threaten Scots pine stands in the Swiss Alps. *Theor Appl Climatol* 79: 1–9.
- RICHTER S ET AL (2012)** Phenotypic plasticity facilitates resistance to climate change in a highly variable environment. *Oecologia* 169: 269–279.
- RIGLING A, BRÄKER OU, SCHNEITER G, SCHWEINGRUBER FH (2002)** Intra-annual tree-ring parameters indicating differences in drought stress of Scots pine forests within the Erico-Pinion in the Valais, Switzerland. *Plant Ecol* 163: 105–121.
- RIGLING A, BRÜHLHART H, BRÄKER OU, FORSTER T, SCHWEINGRUBER FH (2003)** Irrigation effect on tree growth and vertical resin duct production of *Pinus sylvestris* L. on dry sites in the Central Alps, Switzerland. *For Ecol Manage* 163: 105–121.
- RIGLING A ET AL (2006)** Baumartenwechsel in den Walliser Wald-föhrenwäldern. In: Wohlgemuth T, editor. *Wald und Klimawandel*. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL, Forum für Wissen. pp. 23–33.
- RIGLING A, FORSTER B, MEIER F, WERMELINGER B (2008)** Insekten – Schlüsselfaktoren der zukünftigen Waldentwicklung. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL, Inf.bl Wald 23: 1–3.
- RIGLING ET AL (2012)** Driving factors of a vegetation shift from Scots pine to pubescent oak in dry Alpine forests. *Glob Chang Biol*. doi: 10.1111/gcb.12038
- SCHÄR C ET AL (2004)** The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427: 332–336.
- SCHUMACHER S, BUGMANN H (2006)** The relative importance of climatic effects, wildfires and management for future forest landscape dynamics in the Swiss Alps. *Glob Chang Biol* 12: 1435–1450.
- STAUDHAMMER CL, LEMAY VM (2001)** Introduction and evaluation of possible indices of stand structural diversity. *Can J For Res* 31: 1105–1115.
- STOTT PA ET AL (2006)** Transient climate simulations with the HadGEM1 climate model: Causes of past warming and future climate change. *J Clim* 19: 2763–2782.
- TEMPERLI C, BUGMANN HKM, ELKIN C (2012)** Adaptive management for competing forest goods and services under climate change. *Ecol Appl*. doi: 10.1890/12-0210.1
- THORNTON PE, RUNNING SW, WHITE MA (1997)** Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *J Hydrol* 190: 214–251.
- TINNER W, LOTTER AF (2001)** Central European vegetation response to abrupt climate change at 8.2 ka. *Geology* 29: 551–554.
- WEBER P, BUGMANN H, RIGLING A (2007)** Growth responses to drought of *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pubescens* Willd. in an inner Alpine dry valley. *J Veg Sci* 18: 777–792.
- WELTEN M (1982)** Vegetationsgeschichtliche Untersuchungen in den westlichen Schweizer Alpen: Bern – Wallis. *Denkschr Schweiz nat.forsch Ges* 95: 1–104.

WOHLGEMUTH T, HESTER C, JOST AR, WASEM U, MOSER B (2010)
Dynamik der Wiederbewaldung im Waldbrandgebiet von Leuk
(VS). Schweiz Z Forstwes 161: 450–459. doi: 10.3188/
szf.2010.450

ZWEIFEL R, ZIMMERMANN L, ZEUGIN F, NEWBERY DM (2006)
Intra-annual radial growth and water relations of trees: impli-
cations towards a growth mechanism. J Exp Bot 57:
1445–1459.

Wald und Klimawandel in der inneralpinen Trockenregion Visp

Der Temperaturanstieg der vergangenen Jahrzehnte war in Gebirgsregionen besonders ausgeprägt. Sollte sich dieser Temperaturtrend im 21. Jahrhundert fortsetzen, dann dürften sich auch die Häufigkeit und Intensität von Niederschlägen und Trockenperioden verändern, was die Waldwirtschaft vor grosse Herausforderungen stellen wird. Trockenheit ist ein entscheidender Faktor für die Waldökosysteme der inneralpinen Täler, wo seit Jahren trockenheitsbedingtes Baumsterben festgestellt wird. Der vorliegende Beitrag hat zum Ziel, die Sensitivität der verschiedenen Waldökosysteme gegenüber Klimawandel und alternative, teilweise extreme Bewirtschaftungsvarianten in der Region Visp zu testen. Methodische Ansätze wie Monitoring, Feldexperimente und dynamische Modellierung wurden kombiniert, und es wurden verschiedene Ökosystemleistungen berücksichtigt, so Holzproduktion, Schutz vor Naturgefahren, Kohlenstoffspeicherung und Aspekte der Biodiversität. Die Resultate deuten darauf hin, dass auf den Trockenstandorten der Tieflagen die einheimischen Baumarten an ihre physiologischen Grenzen stossen und längerfristig über alternative Baumarten nachgedacht werden sollte. In den mittleren Lagen dürften Trockenheit und Schadinsekten wie die Borkenkäfer die zukünftige Waldentwicklung steuern. In den Hochlagen hingegen werden sich die Wälder ausdehnen und besser wachsen als heute. Alle untersuchten Ökosystemleistungen werden gebietsweise starken Veränderungen unterworfen sein. Die diskutierten Bewirtschaftungsvarianten scheinen dazu geeignet, die Wasserverfügbarkeit der Bestände, hauptsächlich in tieferen Lagen, zu erhöhen und dadurch die Widerstandskraft der Bäume gegenüber Trockenperioden vorübergehend zu stärken. Es ist aber davon ausgehen, dass nur verhältnismässig starke Eingriffe wesentliche Effekte erzielen können. Die Verknüpfung von Umweltmonitoring, Feldexperimenten und Modellierung unter Miteinbezug von Ökosystemleistungen ist vielversprechend, da sie eine differenzierte Abschätzung des zukünftigen Landschaftswandels und seiner Effekte auf die Waldleistungen ermöglicht.

Forêt et changement climatique dans la région sèche de Viège dans les Alpes centrales

L'augmentation de la température a été particulièrement marquée dans les régions de montagne ces dernières décennies. Si cette tendance se poursuit au XXI^e siècle, la fréquence et l'intensité des précipitations et des périodes de sécheresse pourraient changer, ce qui poserait un défi de taille à l'économie forestière. La sécheresse est un facteur déterminant pour les écosystèmes forestiers des vallées intra-alpines, où des dépérissements d'arbres dus à la sécheresse se constatent depuis des années. L'objectif de cet article est d'étudier la sensibilité de divers écosystèmes forestiers face au changement climatique et de tester des variantes de gestion, parfois extrêmes, dans la région de Viège. Des approches méthodiques, comme le monitoring, des expérimentations sur le terrain et des modélisations dynamiques ont été combinées en tenant compte de différentes prestations écosystémiques, notamment la production ligneuse, la protection contre les dangers naturels, le stockage du carbone et des aspects de la biodiversité. Les résultats indiquent que les essences indigènes atteignent leurs limites physiologiques dans les stations sèches de basse altitude et qu'à plus longue échéance, il faudrait envisager l'introduction d'essences de remplacement. En moyenne altitude, la sécheresse et les insectes nuisibles, comme les bostryches, pourraient bien dicter l'évolution future des forêts. Dans les zones supérieures par contre, les forêts s'étendront et croîtront mieux qu'aujourd'hui. Toutes les fonctions de la forêt analysées seront soumises à fortes variations par endroits. Les variantes de gestion discutées semblent adéquates pour augmenter l'alimentation hydrique des peuplements, principalement en basse altitude, ce qui renforcera momentanément la résistance des arbres face à la sécheresse. Mais il faut admettre que seules des interventions relativement rigoureuses peuvent produire des effets substantiels. La combinaison du monitoring environnemental, des expérimentations sur le terrain et de la modélisation, alliée aux prestations écosystémiques, est une solution prometteuse, car elle permet une estimation nuancée de la transformation des paysages et de ses effets sur les fonctions de la forêt.