

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

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 174 (2023)

Heft: 2

Artikel: Ökonomische Bewertung von waldbaulichen Strategien zur Anpassung an den Klimawandel im Schweizer Mittelland

Autor: Dumollard, Gaspard / Thomas, Mélanie / Rosset, Christian

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097127>

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: 01.05.2026

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

Ökonomische Bewertung von waldbaulichen Strategien zur Anpassung an den Klimawandel im Schweizer Mittelland

Gaspard Dumollard^{1,*}, Mélanie Thomas¹, Christian Rosset¹, Fabrizio Cioldi², Bernhard Pauli¹

¹Berner Fachhochschule, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, BFH-HAFL (CH)

²Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)

Abstract

Der Klimawandel wirkt sich bereits stark auf die Waldökosysteme der Schweiz aus und dürfte dies zukünftig noch viel stärker tun. Die Veränderung der Standortbedingungen und das erhöhte Risiko von Störungen (Trockenheit, Stürme, Borkenkäfer) haben erhebliche nachteilige Auswirkungen auf das waldbauliche Potenzial der Wälder. Diese Auswirkungen können durch die Wahl geeigneter Baumarten und Produktionszeiträume reduziert werden. Der Klimawandel erfordert daher eine vorausschauende Änderung der waldbaulichen Strategien, damit die Waldökosysteme vital und resilient bleiben und alle ihre Ökosystemleistungen nachhaltig erbringen können. Die Anpassungen müssen von den Waldbesitzenden durch die Inwertsetzung der verschiedenen Waldleistungen, von denen die Holzvermarktung ein wichtiger Bestandteil bleibt, finanziert werden können. Im vorliegenden Artikel werden vier unterschiedliche waldbauliche Strategien («Weiter wie bisher», «Sanfte Lenkung», «Ertragsorientiert», «Starke Anpassung») und die daraus resultierenden ökonomischen Konsequenzen vor dem Hintergrund unterschiedlicher Klimaszenarien beschrieben. Die ökonomischen Konsequenzen der Strategien wurden mithilfe eines Modells simuliert. Die ökonomischen Ergebnisse zeigen, dass eine aktive Anpassung der Wälder an den Klimawandel möglich und aus wirtschaftlicher Sicht sogar wünschenswert ist. Sie zeigen aber auch die hohe Bedeutung von öffentlichen Beiträgen für die künftigen Waldanpassungsstrategien.

Keywords: silvicultural strategies, economic evaluation, climate change, Swiss Plateau, forest planning
doi: 10.3188/szf.2023.0092

* Länggasse 85, CH-3052 Zollikofen, E-Mail gaspard.dumollard@bfh.ch

Der Klimawandel wirkt sich bereits stark auf die Waldökosysteme der Schweiz aus und dürfte sie in Zukunft noch viel stärker beeinflussen (BAFU 2020). Die Auswirkungen machen sich vor allem auf zwei Arten bemerkbar: zum einen durch eine allmähliche Veränderung der Klimabedingungen, zum anderen durch eine Zunahme der Störungsrisiken – z.B. durch eine höhere Wahrscheinlichkeit von Stürmen (Pauli et al 2016).

Die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) geht im Rahmen ihres Forschungsprogramms «Wald und Klimawandel» (Pluess et al 2016) von zwei möglichen Klimazukünften aus, eine «weniger trockenere» und eine «trockenere», für die die Auswirkungen auf die Höhenstufen im Zeitraum 2070–2099 modelliert wurden (Frehner & Huber 2019). Diese beiden

Klimazukünfte entsprechen demselben mittleren Emissionsszenario A1B des IPCC (nahe dem aktuellen RCP6.0), aber zwei unterschiedlichen regionalen Klimamodellen, nämlich RegCM3 bzw. CLM (Remund et al 2016). Im Vergleich zu ihrem historischen Niveau (im Zeitraum 1981–2010) werden die Höhenstufen in der Höhe «ansteigen» (Abbildung 1). So dürfte sich im Schweizer Mittelland die kolline Stufe geografisch stark ausdehnen, während die untermontane Stufe zurückgehen und schliesslich weitgehend verschwinden wird. Die daraus resultierende Veränderung der Waldstandortbedingungen hat bedeutende Auswirkungen auf das waldbauliche Potenzial im Mittelland, insbesondere im Hinblick auf die Wahl geeigneter Baumarten. Die Anfälligkeit für Störungsrisiken, in erster Linie Stürme, sowie Trockenheitsrisiken und Folgerisiken, wie Borkenkä-

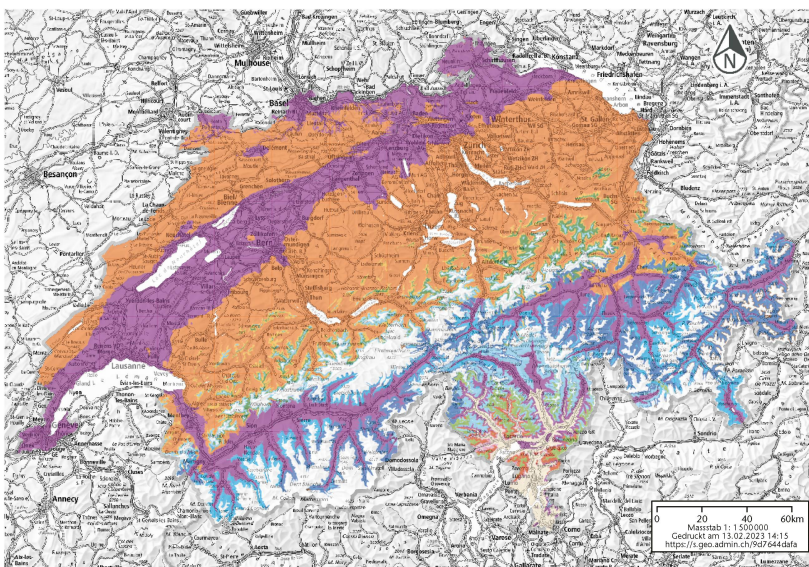


Abb 1 Höhenstufen der Waldvegetation in der Schweiz für die Periode 2070–2099 unter Annahme einer trockeneren Klimazukunft (Frehner & Huber 2019). Lila: collin, orange: submontan, blau: hochmontan. Detaillierte Legende: map.geo.admin.ch. Karte: map.geo.admin.ch

ferbefall, wird zunehmen. Sie variiert aber in Abhängigkeit von den einzelnen Baumarten und ihrer jeweiligen Umtriebszeit. Somit kann hier das Risiko durch geschickte Steuerung reduziert werden (Pauli et al 2016). Der Klimawandel erfordert daher eine vorausschauende Änderung der waldbaulichen Strategien, damit die Waldökosysteme vital und resilient bleiben und alle die geforderten und gewünschten Ökosystemleistungen nachhaltig erbringen können.

Eine Voraussetzung hierfür sind wirtschaftlich leistungsfähige Waldbesitzende und Forstbetriebe. Die Transformation hin zu einem klimastabilen Wald muss also so erfolgen, dass die Waldbesitzenden sie über die finanzielle Inwertsetzung der Waldleistungen, von denen die Holzvermarktung ein wichtiger Bestandteil ist, finanzieren können.

Ziel dieser Studie ist es, zu ermitteln, in welchem Umfang die Holzproduktion zur Gegenfinanzierung der Klimaanpassung der Wälder beitragen könnte. Im vorliegenden Artikel werden deshalb unterschiedliche waldbauliche Strategien und die daraus resultierenden ökonomischen Konsequenzen vor dem Hintergrund unterschiedlicher Klimaszenarien beschrieben.

Untersuchungsgebiet und methodischer Ansatz

Das Schweizer Mittelland als Untersuchungsgebiet

Die Bewertung der ökonomischen Folgen der waldbaulichen Szenarien wurde für das Schweizer Mittelland durchgeführt. Diese ökonomische Bewertung ermöglicht einen Überblick über die Klimaauswirkungen und das Anpassungspotenzial auf der Ebene dieses für die Holzproduktion (bzw. die Holz-

versorgung aus der Schweiz) wichtigen Gebiets (fast 40% der Schweizer Holzproduktion finden in dieser Region statt, Abegg et al 2020). Im Mittelland werden sich die Waldstandortbedingungen mit einer potenziell starken Ausbreitung der für Nadelbäume kritischen kollinen Stufe stark verändern (Allgaier Leuch et al 2018). Diese Region kann somit als besonders anfällig für klimawandelbedingte Störungen im Wald bezeichnet werden.

Untersuchte waldbauliche Szenarien

Es wurden vier waldbauliche Szenarien untersucht: ein Baseline-Szenario und drei Anpassungsszenarien (oder Anpassungsstrategien). Bei den Anpassungsszenarien geht es darum, strategische Waldplanungsentscheidungen zu treffen, die zukünftige Waldstandortbedingungen berücksichtigen. Die grundsätzliche Ausrichtung der vier Szenarien kann folgendermassen umschrieben werden:

- Baseline-Szenario «Weiter wie bisher»: Kontinuität der bisherigen Bewirtschaftung im Sinne der Beibehaltung der aktuellen Baumartenzusammensetzung und der aktuellen demografischen Struktur.
- Anpassungsszenario «Sanfte Lenkung»: Die Baumartenzusammensetzung wird an die «weniger trockene» Klimazukunft angepasst, und es wird dabei so weit wie möglich auf Naturverjüngung gesetzt. Die Umtriebszeiten der Baumarten werden im Vergleich zum Szenario «Weiter wie bisher» baumartenspezifisch verkürzt.
- Anpassungsszenario «Ertragsorientiert»: Die Baumartenzusammensetzung wird aktiv an die «weniger trockene» Klimazukunft angepasst. Dabei wird z.B. die Douglasie stärker gefördert, da diese Baumart vor dem Hintergrund der erwarteten Waldstandortbedingungen eine gute Produktivität und Wirtschaftlichkeit aufweist. Die effektiven Umtriebszeiten der Baumarten werden verkürzt und in der Folge die Verjüngungsflächen in den nächsten drei Jahrzehnten (2022–2052) vergrössert, um die demografische Erneuerung zu beschleunigen.
- Anpassungsszenario «Starke Anpassung»: Hier wird die Baumartenzusammensetzung an die «trockenere» Klimazukunft angepasst, wobei der Schwerpunkt auf Laubbäumen liegt. Die Umtriebszeiten der Baumarten werden ebenfalls verkürzt und die Verjüngungsflächen in den nächsten drei Jahrzehnten vergrössert, um die demografische Erneuerung zu beschleunigen.

Die qualitativen waldbaulichen Szenarien wurden in quantitative Szenarien «übersetzt», die wiederum als Grundlage für eine Simulation der demografischen Entwicklungen sowie deren wirtschaftlichen Folgen verwendet wurden. Die quantitativen Szenarien beruhen auf folgenden waldbaulichen Basisüberlegungen:

- die langfristig angestrebte Baumartenzusammensetzung,

- die angestrebten Umtriebszeiten,
- die jeweiligen Gesamtverjüngungsflächen der kommenden drei Jahrzehnte, die wichtige Determinanten für die Rate der demografischen Erneuerung sind (Rosset & Dumollard 2018).

Demografische Simulationen

Ausgehend von der aktuellen demografischen Struktur des Mittellandes und den beschriebenen waldbaulichen Szenarien kann die Dynamik dieser demografischen Struktur mit dem Waldplanungstool WIS.2 simuliert werden (Rosset 2005a, Rosset et al 2014). Die demografischen Simulationen berücksichtigten nur die Flächen mit gleichförmigem Hochwald. Mit 84% hat dieser Waldtyp den grössten Anteil an der Gesamtwaldfläche des Mittellandes (Cioldi et al 2020, Tabelle 074). Diese Simulationen berechnen die Nutzungsflächen nach Baumart und Altersklasse für den Zeitraum von 2022 bis 2102.

Ökonomische Bewertung

Die zukünftigen Nutzungsflächen werden mithilfe der im Rahmen des Forschungsprogramms «Wald und Klimawandel» erstellten Tools zur ökonomischen Bewertung (Pauli et al 2016) in genutzte Mengen und Finanzströme übersetzt. Dieses Set von Tools wird auch als Klimarechner bezeichnet. Die ökonomische Bewertung anhand der für diese Studie weiterentwickelten Version des Klimarechners wird pro Bestand vorgenommen und entspricht den beiden folgenden Phasen:

- Die Anpassungsphase entspricht dem Zeitraum 2022–2102: Die ökonomische Bewertung basiert in diesem Fall auf dem Kapitalwert der «tatsächlichen» Nutzungen, wie sie vom WIS.2 simuliert werden.
- Die Gleichgewichtsphase entspricht der darauffolgenden Phase, deren Zeithorizont unendlich ist: Die ökonomische Bewertung basiert in diesem Fall auf dem Bodenertragswert der Baumart des Bestandes sowie auf der im Szenario festgelegten Umtriebszeit für diese Baumart.

Die Gleichgewichtsphase ist theoretisch und wird in der Realität aufgrund der sich ändernden natürlichen und wirtschaftlichen Bedingungen und aufgrund von Störungen nie erreicht. Sie ist jedoch für eine genauere wirtschaftliche Bewertung wich-

tig, da sie es ermöglicht, die potenziellen langfristigen wirtschaftlichen Folgen der aktuellen Entscheidungen zumindest teilweise zu berücksichtigen. Das wirtschaftliche Ergebnis pro Szenario entspricht der Summe aus dem Kapitalwert der Anpassungsphase und dem Bodenertragswert der Gleichgewichtsphase (jeweils mit einem Zinssatz von 2% berechnet).

Die Berechnung des genutzten Volumens aus den Nutzungsflächen basiert hauptsächlich auf den Schweizer Ertragsstafeln, deren Ergebnisse teilweise angepasst wurden. Die der ökonomischen Bewertung zugrunde gelegten Holzpreise stammen aus einem grossen Forstbetrieb im Schweizer Mittelland, dessen Preise stellvertretend für die Preise im Mittelland stehen. Für die Jahre 2005 bis 2017 standen die Sortimentsdaten für alle Durchmesserklassen der häufigsten Baumarten zur Verfügung. Die Preise bildeten die Grundlage für die Simulation künftiger Holzpreisschwankungen mittels einer Monte-Carlo-Simulation (Pauli et al 2016). Da künftige Holzpreise nur bedingt von Vergangenheitswerten abgeleitet werden können, wurden drei Preistrendszenarien definiert, die einen gleichbleibenden (d.h. historischen), einen fallenden oder einen steigenden Holzpreis beschreiben (Pauli et al 2016).

Je nach waldbaulichem Szenario und der darin definierten Baumartenzusammensetzung müssen die angestrebten Baumarten mit einer unterschiedlich hohen Rate über Pflanzungen eingebracht werden. Vereinfacht ausgedrückt entspricht die Pflanzrate einer bestimmten Baumart also der Differenz zwischen dem angestrebten Anteil dieser Baumart in einem bestimmten Szenario und dem Anteil dieser Baumart in der initialen Baumartenzusammensetzung. Die Pflanzrate stellt eine grobe Vereinfachung dar. Sie berücksichtigt unter anderem weder die Situationen, in denen der Verjüngungsprozess mit Naturverjüngung nicht erfolgreich war, noch die unterschiedlichen Samenverbreitungsmuster der Baumarten. Dieser Annahme folgend gibt es im Baseline-Szenario keine Pflanzkosten. Nach derselben Logik wird angenommen, dass die Pflanzkosten in der Gleichgewichtsphase null betragen. Daraus abgeleitet kann der finanzielle Aufwand für die Begründungsphasen des Waldumbaus ermittelt werden. Als Kostensätze für die Bestandsbegründung wurden 19 000 CHF/ha für Nadelholzflächen und 25 000 CHF/ha für Laubholzflächen angenommen. Diese basieren auf Expertenangaben aus der Praxis sowie auf Roy (2020). Die der Simulation zugrunde gelegten Kostensätze für die Holzernte sowie für die Jungwaldpflege basieren auf Pauli et al (2016). Die Simulationen wurden sowohl mit als auch ohne öffentliche Beiträge zu Pflanzungen und Pflege durchgeführt. Es wurde angenommen, dass 70% der Kosten für Pflanzungen, unabhängig von den Baumarten, durch öffentliche Beiträge abgegolten werden. Die Pflegekosten variieren von Baumart zu Baumart

Klimabedingungen	Anteil der Höhenstufen im Mittelland (flächenmässig)	Maximaler Nadelholzanteil
Historisches Klima (Höhenstufen 1995)	3% kollin; 74% submontan; 23% untermontan	48%
Weniger trockene Klimazukunft 2070–2099	21% kollin; 79% submontan	40%
Trockenere Klimazukunft 2070–2099	60% kollin; 40% submontan	20%

Tab 1 Höhenstufen und maximaler Nadelholzanteil im Mittelland, historisch und in zwei Klimazukünften (Frehner & Huber 2019).

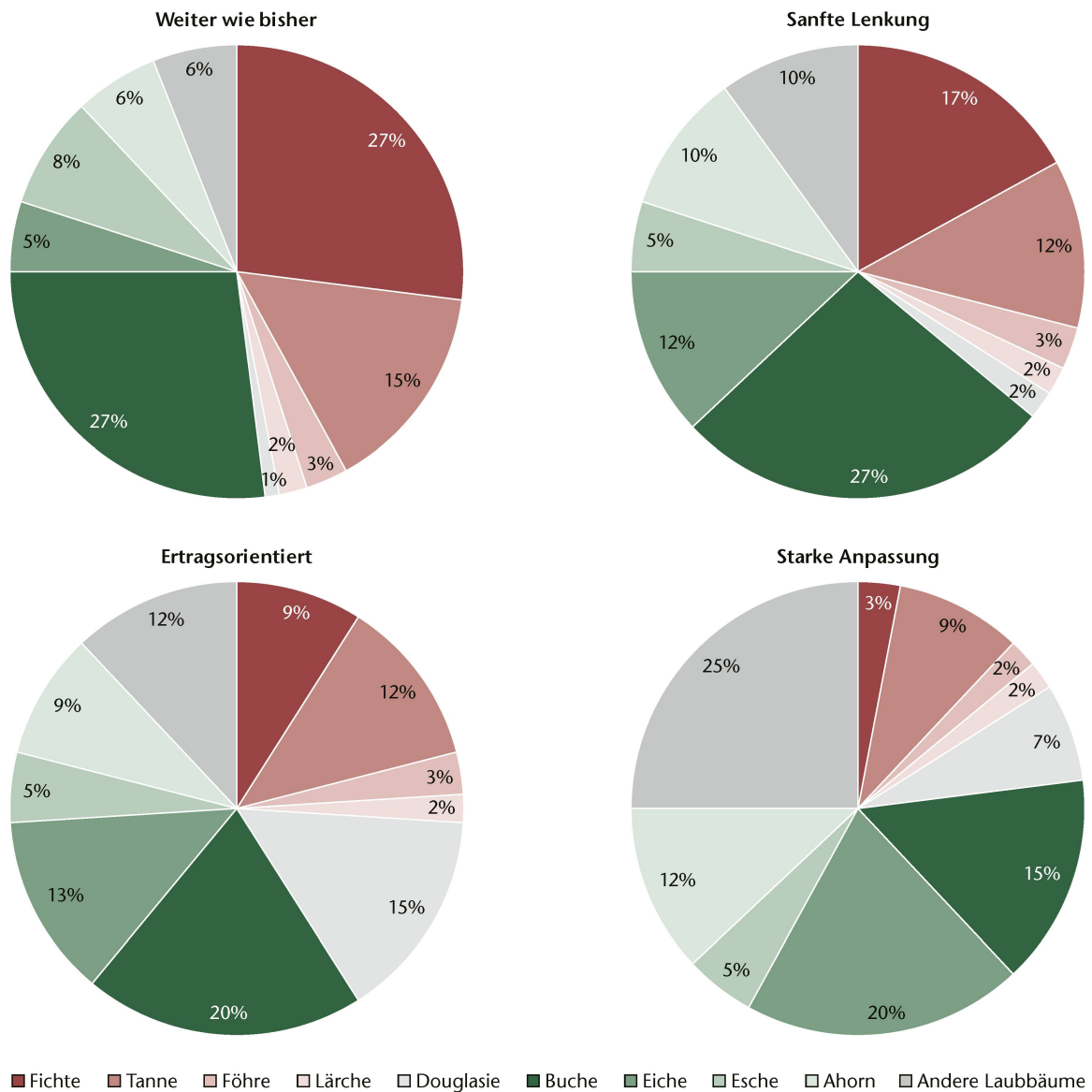


Abb 2 Ziele für die Baumartenzusammensetzung in den verschiedenen waldbaulichen Szenarien.

und liegen zwischen 2600 CHF/ha und 3300 CHF/ha. Durchforstungen werden in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Simulationen werden in Form einer vergleichenden und relativen ökonomischen Bewertung der drei Anpassungsszenarien zur Baseline («Weiter wie bisher») dargestellt.

Festlegung der Szenarien

Waldstandortbedingungen in den Klimazukünften

In einem ersten Schritt wird der maximale Nadelholzanteil für jedes Szenario und für jede angenommene Klimazukunft bestimmt (Tabelle 1). Grundlage hierfür sind die jeweiligen Flächenanteile der künftigen Höhenstufen in der Region Mittelland sowie die von kantonalen Forstdiensten vorgeschlagenen maximalen Nadelholzanteile pro Stufe (Bur-

ger et al 1996 für Bern, von Wyl et al 2021 für Luzern). Diese betragen rund 50% in der submontanen Stufe und theoretisch 0% in der kollinen Stufe.

Festlegung des langfristigen Ziels für die Baumartenzusammensetzung

Während die Klimabedingungen bei einer «weniger trockenen» Klimazukunft einen moderaten Einfluss auf den maximalen Nadelholzanteil haben, ist er in einer «trockeneren» Klimazukunft deutlich ausgeprägter (Tabelle 1). Auf der Grundlage der maximalen Nadelholzanteile wurden für die Waldbauszenarien die in Abbildung 2 gezeigten Ziele für die künftige Baumartenzusammensetzung festgelegt.

Im Baseline-Szenario («Weiter wie bisher») wurde die aktuelle Baumartenzusammensetzung (nach dem vierten Landesforstinventar in Bezug auf die Grundfläche, WSL 2022) in die Simulation übernommen und weitergeführt. Das Baseline-Szenario

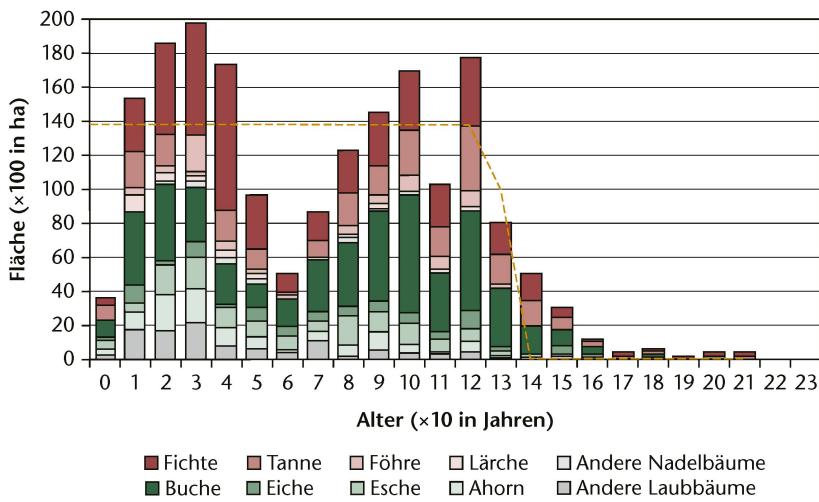


Abb 3 Nach Baumarten differenzierte demografische Struktur im Schweizer Mittelland gemäss viertem LFI (2009–2017). Die gelbe Kurve entspricht dem Normalwaldmodell des Szenarios «Weiter wie bisher» (Quelle: WSL 2022 und Darstellung aus dem Tool WIS.2, Rosset 2005a, Rosset et al 2014).

Baumart	Weiter wie bisher	Sanfte Lenkung	Ertragsorientiert	Starke Anpassung
Fichte	140 Jahre	80 Jahre	80 Jahre	80 Jahre
Tanne	140	80	80	80
Föhre	130	120	120	120
Lärche	130	120	120	120
Douglasie	130	120	90	90
Buche	140	100	100	100
Eiche	140	110	110	110
Esche	130	80	80	80
Bergahorn	130	80	80	80
Andere Laubbäume	130	60	60	60

Tab 2 Umtriebszeiten in den verschiedenen Szenarien.

ist, weil ein «Weiter wie bisher» durch die aktuelle Entwicklung praktisch ausgeschlossen erscheint, als reine Referenz zu betrachten. In den drei Anpassungsszenarien wird das durch den Klimawandel steigende Ausfallrisiko bei der Fichte berücksichtigt (Anfälligkeit für Trockenheit, Borkenkäferprobleme usw.) und der Fichtenanteil reduziert. Je nach Szenario steigt im Gegenzug der Flächenanteil anderer Baumarten, wie der Anteil der Douglasie beim ertragsorientierten Szenario oder der Anteil der Eiche beim Szenario «Starke Anpassung». Der gesamthafte Rückgang des Nadelholzanteils wird durch einen Anstieg des Laubholzanteils ausgeglichen, insbesondere durch Eiche, Ahorn und anderes Laubholz. In den Szenarien «Ertragsorientiert» und «Starke Anpassung» wird auch der Anteil der Buche reduziert, da diese Baumart für die Standortbedingungen der kollinen Stufe deutlich weniger geeignet ist als für die höheren Stufen. Die Anpassungsfähigkeit der Buche (im Sinne ihrer genetischen Vielfalt auf europäischer Ebene, Robson & Garzón 2018) könnte es zwar ermöglichen, weiterhin mit dieser Baumart zu arbeiten. In dieser Studie wurde eher zurückhaltend mit

der Buche umgegangen. Die Kategorie «Andere Laubbäume» entspricht den Baumarten, die in Abbildung 2 nicht explizit aufgeführt sind, die aber an die Standorte der kollinen Stufe angepasst sind, z.B. Hainbuche, Linde, Kastanie, Erle, Weide, Kirschbaum, Walnuss, Birke, Aspe, Espe oder Ulme (Ammann & Junod 2022).

Festlegung der Umtriebszeiten

Die nach Baumarten differenzierte «aktuelle» demografische Struktur im Mittelland ist aus den Daten des vierten Landesforstinventars (LFI 2009–2017) bekannt (WSL 2022) und in der Abbildung 3 dargestellt. Die demografische Struktur für eine bestimmte Baumart liefert Informationen über die Umtriebszeit, die für diese Baumart in den vergangenen Jahrzehnten im Durchschnitt praktiziert wurde. So deutet z.B. das Vorhandensein relativ grosser Flächen von Fichtenbeständen mit einem Alter von 130 bis 150 Jahren auf eine Umtriebszeit von etwa 140 Jahren hin. Die volle Wirkung der derzeit praktizierten, kürzeren Umtriebszeiten war nämlich zum Zeitpunkt des vierten LFI (2009–2017) noch nicht in der demografischen Struktur erkennbar.

Im Szenario «Weiter wie bisher» werden diese effektiven Umtriebszeiten fortgeführt. Die Schätzung dieser Umtriebszeiten ist eine grobe Vereinfachung, da hier die Flächen der Waldreservate und Altholzinseln nicht abgezogen wurden, was zu einer Überschätzung führen kann. Die Festlegung der Umtriebszeit bei den Anpassungsszenarien erwies sich als anspruchsvoll, da die in der Literatur genannten Empfehlungen unter anderem von den waldbaulichen Produktionszielen und den zugrunde gelegten waldbaulichen Prinzipien abhängen. Historische Instrumente wie die Schweizer Ertragstabellen (Badoux 1983), Publikationen (Ammann 2013) sowie neuere Produktionskonzepte (z.B. der Burggemeinde Bern, persönliche Mitteilung) liefern jedoch Hinweise für mögliche Ausprägungen anzustrebender Umtriebszeiten. Aus rein wirtschaftlicher Sicht sind sehr kurze Umtriebszeiten sinnvoll (z.B. weniger als 60 oder sogar als 50 Jahre für die Fichte oder Douglasie, wie in Deutschland oder Frankreich praktiziert, persönliche Mitteilungen). Doch wirft dies gewisse Fragen in Bezug auf bestimmte Waldleistungen und die Nachhaltigkeit auf (z.B. Biodiversität, Erholung sowie in Bezug auf die Bodennährstoffe, siehe Ranger et al 2002). In Übereinstimmung mit Empfehlungen von Fachleuten wurden deshalb die in der Tabelle 2 dargestellten Umtriebszeiten verwendet.

Während die drei Anpassungsszenarien in Bezug auf die geplanten Umtriebszeiten sehr ähnlich sind, unterscheiden sie sich hinsichtlich der Baumartenanteile sowie der Gesamtverjüngungsflächen zum Teil deutlich; letzteres zeigt Abbildung 4.

Im Szenario «Sanfte Lenkung» entspricht die Gesamtverjüngungsfläche stets der nachhaltigen

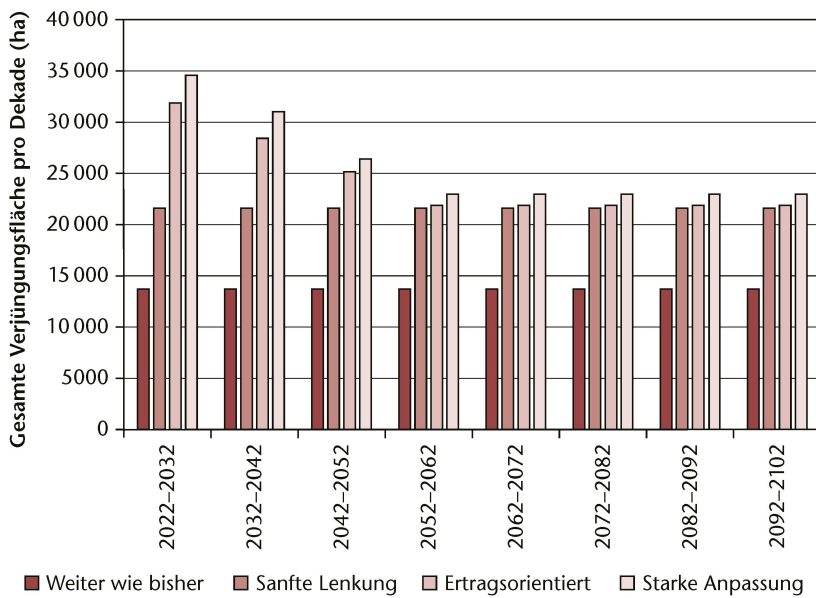


Abb 4 Gesamtverjüngungsflächen pro Jahrzehnt für die verschiedenen Szenarien

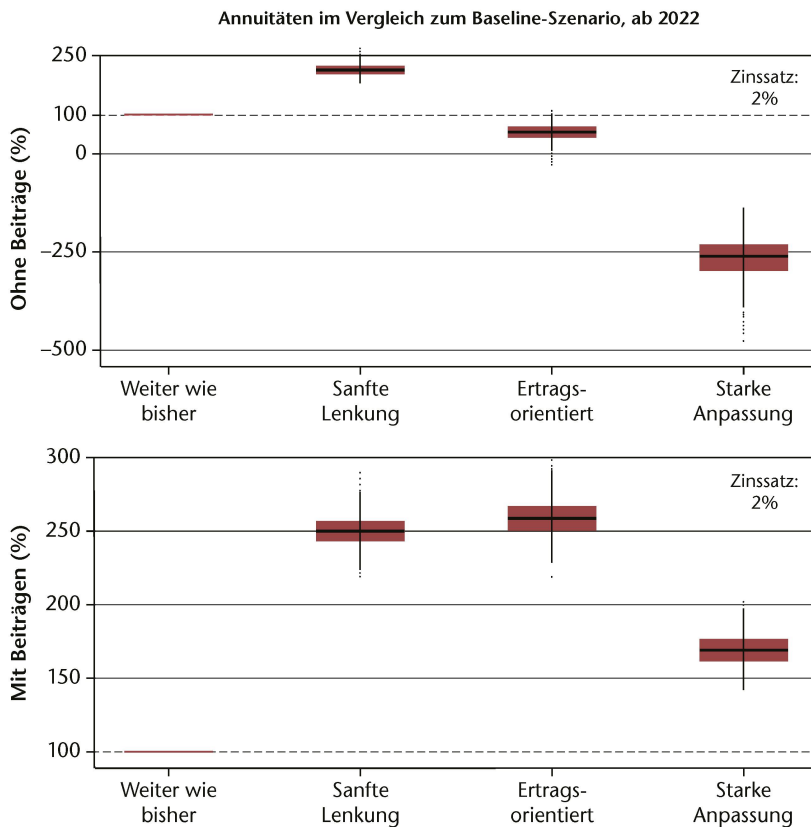


Abb 5 Ergebnisse der ökonomischen Bewertung für die verschiedenen Szenarien ohne öffentliche Beiträge (oben) und mit öffentlichen Beiträgen (unten).

Verjüngungsfläche, also jener Fläche, die dem Normalwaldmodell entspricht (Rosset 2005b). In den Szenarien «Ertragsorientiert» und «Starke Anpassung» wird die Gesamtverjüngungsfläche stark erhöht, um Bestände, welche die Umtriebszeiten bereits überschritten haben, schneller zu nutzen, aber ohne das demografische Gleichgewicht zu gefährden (Rosset & Dumollard 2018).

Ergebnisse der ökonomischen Bewertung

Die Gegenüberstellung der ökonomischen Auswirkungen der verschiedenen Szenarien zeigt, dass das Szenario «Sanfte Lenkung» zu deutlich höheren Annuitäten führen als das Baseline-Szenario (Abbildung 5). Grund dafür sind vor allem die erhöhten Nutzungsmengen als Folge der grösseren Gesamtverjüngungsflächen. Bei den Szenarien «Ertragsorientiert» und «Starke Anpassung» sind die Verjüngungsflächen (zumindest mittelfristig) noch grösser als beim Szenario «Sanfte Lenkung». Die höheren Pflanzkosten haben aber einen grösseren negativen Einfluss, weshalb «Sanfte Lenkung», deren schrittweise Verkürzung der Umtriebszeiten hohe Pflanzkosten vermeidet, im Vergleich besser abschneidet. Es gilt jedoch hervorzuheben, dass im Fall des Szenarios «Ertragsorientiert» die höheren Pflanzkosten durch höhere Einnahmen aufgrund der sehr dynamischen Nutzung praktisch ausgeglichen werden. Die Ergebnisse des Szenarios «Starke Anpassung» sind deutlich niedriger. Zwar werden in diesem Szenario höhere holzerntekostenfreie Erlöse erzielt, diese reichen aber wiederum nicht aus, um die zusätzlichen Pflanzkosten zu decken.

Geht man davon aus, dass ca. 70% der Pflanz- und Pflegekosten über öffentliche Beiträge gegenfinanziert werden, dann sind die aktiveren Anpassungsszenarien mit einem hohen Anteil an Verjüngungsflächen und einem höheren Nadelholzanteil ökonomisch vorteilhafter als das Baseline-Szenario mit weniger Verjüngungsflächen.

Schlussfolgerungen

Die ökonomischen Ergebnisse der Bewertungen zeigen, dass eine aktive Anpassung der Wälder des Mittellandes an den Klimawandel möglich und aus ökonomischer Sicht sogar wünschenswert ist. Sie zeigen aber auch die Wichtigkeit von öffentlichen Beiträgen für die künftige Waldanpassungsstrategie. Ohne öffentliche Beiträge wäre eine schrittweise Anpassung (Szenario «Sanfte Lenkung») trotzdem vorteilhaft und eine ertragsorientierte Anpassung (Szenario «Ertragsorientiert») nahezu wirtschaftlich ausgeglichen.

Diese Ergebnisse zugunsten der Klimaanpassung unterschätzen jedoch die wirtschaftlichen Vorteile der Anpassung, da die durchgeführten Simulationen Störungen (Trockenheit, Stürme, Borkenkäfer usw.) und den potenziellen Wertverlust des Holzes mit zunehmendem Alter nicht berücksichtigen. Die Auswirkungen der Störungen auf die wirtschaftlichen Ergebnisse der Forstbetriebe sind wichtig und könnten künftig sogar noch an Bedeutung gewinnen (Pauli et al 2016). Dennoch würde die Berück-

sichtigung der Risiken die vorgeschlagenen Anpassungsszenarien (und insbesondere die Szenarien «Starke Anpassung» und «Ertragsorientiert») nicht ungünstig machen, sondern im Gegenteil ihre wirtschaftliche Bilanz stärken (Pauli et al 2016).

Die Anpassung der Baumartenzusammensetzung der Waldgebiete an die künftigen Waldstandortbedingungen führt zu einem hohen Pflanzbedarf, der mit erheblichen Pflanz- und Pflegekosten verbunden ist, falls keine Naturverjüngung möglich ist. Um diese Massnahmen umsetzen zu können, gilt es, die Pflanz- und Pflegekosten zu reduzieren. Neben der bekannten biologischen Rationalisierung ist es im Zusammenhang mit dem Klimawandel umso wichtiger, Risiken zu reduzieren und Fehlinvestitionen zu vermeiden. Ansätze dafür sind z.B. die sorgfältige Einführung der Naturverjüngung, je nach Baumarten Pflanzungen einzeln im Weitabstand oder gruppenweise Mischung und klare Produktionsziele für die einzelnen Standorte (Amman 2013, Amman 2022). Durch die schrittweise Verkürzung der Umtriebszeiten und eine mittelfristig sehr dynamische Verjüngung (d.h. insgesamt eine stärkere demografische Walderneuerung) können höhere Einnahmen durch den Holzverkauf erzielt werden, die eine Gegenfinanzierung des Waldumbaus grösstenteils ermöglicht. Durch diesen Liquiditätszufluss können die Kosten für die Pflanzung zumindest teilweise und langfristig abgedeckt werden. Voraussetzung hierfür sind aber geeignete Absatzmöglichkeiten für das geerntete Holz. Die aktiven Anpassungsszenarien führen aber auch zu einer Erhöhung der Holznutzung um mindestens 30%. Wenn diese Mehrmenge im Markt zu niedrigeren Holzpreisen führen würde oder sie sogar nicht absetzbar wäre, dann würden die aktiven Anpassungsszenarien deutlich schlechter abschneiden. Für eine erfolgreiche Umsetzung der Anpassungsszenarien sind somit ausreichende Verarbeitungskapazitäten in der gesamten Wald- und Holzbranche eine Voraussetzung.

Die Ergebnisse dieser Studie dürfen nicht als absolute Werte interpretiert werden. Vielmehr weisen die Werte lediglich darauf hin, welche Szenarien relativ betrachtet günstiger sind. Die den Vergleichen zugrunde liegende konservative Baseline basiert auf einem langfristigen historischen Management der Wälder.

Aus methodischer Sicht wird in dieser Studie ein Vorgehen vorgeschlagen und beschrieben, das im Rahmen der forstlichen Planung angewendet werden kann, um die zentrale Frage der Anpassung an den Klimawandel zu beantworten. ■

Eingereicht: 25. Juli 2022, akzeptiert (mit Review): 14. Dezember 2022

Literatur

- ABEGG M, BRÄNDLI U B, CIOLDI F, FISCHER C, HEROLD A ET AL (2020) Schweizerisches Landesforstinventar – Ergebnistabelle Nr. 796439. Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt WSL. doi.org/10.21258/1385172
- ALLGAIER LEUCH B, STREIT K, STILLHARD J, CIOLDI F, BRANG P (2018) Zukunft der Fichte im Schweizer Mittelland. *Wald und Holz* 98(3): 31–34.
- AMMANN P (2013) Erfolg der Jungwaldpflege im Schweizer Mittelland? Analyse und Folgerungen (Essay). *Schweiz Z Forstwes* 164 (9): 262–270.
- AMMAN P (2022) Bestandesbegründung: Die richtige Mischung macht's. *Zürcher Wald* 4/22: 4–8.
- AMMANN P, JUNOD P (2022) Ökogramm collin. Fachstelle Waldbau. www.waldbau-sylviculture.ch/publica/2022_Ökogramm_collin_mit_Link_FWB.pdf (13.2.2023)
- BADOUX E (1983) Ertragstafeln für die Fichte in der Schweiz. Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, 3. Auflage. Birmensdorf: Eidg. Anst. forstl. Versuchswes..
- BAFU (2020) Klimawandel in der Schweiz. Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen, Massnahmen. Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. Umwelt-Zustand Nr. 2013. 105 p.
- BURGER T, STOCKER R, DANNER E, KAUFMANN G, LÜSCHER P (1996) Standortkundlicher Kartierungsschlüssel für die Wälder der Kantone Bern und Freiburg. Kommentare zu den Waldgesellschaften. Solothurn, Lenzburg: ARGE Kaufmann & Partner.
- CIOLDI F, BRÄNDLI U B, DIDION M, FISCHER C, GINZLER C ET AL (2020) Waldressourcen. In: Brändli UB, Abegg M, Allgaier Leuch B, editors. Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der vierten Erhebung 2009–2017. Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt WSL, pp. 35–119.
- FREHNER M, HUBER B (2019) mit Beiträgen von Päivi Gubelmann (Teil 1 und 3), Nora Zürcher-Gasser (Teil 4 und 5), Niklaus E. Zimmermann (Teil 3), Sabine Braun (Teil 2), Martin Scherler (Teil 2), Andreas Zischg (Teil 1), Jacques Burnand (Teil 1), Gabriele Carraro (Teil 1), Harald Bugmann (Teil 3), Achilleas Psoomas (Teil 3). Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel»: Übersicht über die Teilberichte. Sargans: Forstingenieurbüro Frehner & Chur, Abenis AG.
- PAULI B, STÖCKLI B, HOLTHAUSEN N, ROSSET C (2016) Ökonomische Beurteilung waldbaulicher Strategien zur Bewältigung des Klimawandels im Schweizer Mittelland. In: Pluess A R, Augustin S, Brang P editors. *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien*. Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU, Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt WSL. Haupt, Bern, Stuttgart, Wien. pp. 311–337.
- PLUESS AR, AUGUSTIN S, BRANG P, EDITORS (2016) *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien*. Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU, Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt WSL. Haupt, Bern, Stuttgart, Wien. 447 p.
- RANGER J, ALLIE S, GELHAYE D, POLLIER B, TURPAULT M P, GRANIER A (2002) Nutrient budgets for a rotation of a Douglas-fir plantation in the Beaujolais (France) based on a chronosequence study. *For Ecol Manag* 171 (1–2): 3–16.
- REMUND J, VON ARX G, GALLIEN L, REBETEZ M, HUBER B, ZIMMERMANN NE (2016) Klimawandel in der Schweiz – Entwicklung walddrelevanter Klimagrößen. Ökonomische Beurteilung waldbaulicher Strategien zur Bewältigung des Klimawandels im Schweizer Mittelland. In: Pluess AR, Augustin S, Brang P (ed.) *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien*. Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU, Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt WSL. Haupt, Bern, Stuttgart, Wien. pp. 23–37.
- ROBSON TM, GARZÓN MB (2018) Phenotypic trait variation measured on European genetic trials of *Fagus sylvatica* L. *Sci Data* 5(1): 1–7.

- ROSSET C (2005A)** Le WIS.2, un instrument informatique performant pour une gestion efficiente et ciblée des écosystèmes forestiers| WIS.2: a powerful software instrument for the efficient management of forest ecosystems. *Schweiz Z Forstwes* 156 (12): 496–509.
- ROSSET C (2005B)** Système de gestion sylvicole intégrée et d'aide à la décision. Le WIS.2, un instrument informatique pour une gestion sylvicole efficiente et ciblée, durable, multifonctionnelle et proche de la nature. Zurich: EPF Zurich. Diss. n° 16005, 175 p.
- ROSSET C, SCHÜTZ JP, GÜNTER M, GOLLUT C (2014)** From WIS.2 to Smart Forest – a sustainable forest management decision support system. *Math Comput For Nat Res Sci* 6 (2): 89–100.
- ROSSET C, DUMOLLARD G (2018)** Incertitude et pilotage des écosystèmes forestiers (essai). *Schweiz Z Forstwes* 169 (4): 194–198.
- ROY D (2020)** Die Erarbeitung von Pflanzkonzepten für die Ersetzung der von Klimawandel stark gefährdeten Bestände im Waldgebiet des Forstbetriebs der Burgergemeinde Bern (FBB). Semesterarbeit an der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften.
- VON WYL B, STOCKER R, FREHNER M (2021)** Waldbaukommentar – Waldbau und Beschreibung der natürlichen Standortstypen im Kanton Luzern. UTAS AG, Giswil/Lawa.
- WSL (2022)** Schweizerisches Landesforstinventar LFI. Daten der Erhebung 2009/17 (LF14), Datenbankauszug vom 31.3.2022. Fabrizio Cioldi-DL1385. Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt WSL

Evaluation économique de stratégies sylvicoles d'adaptation au changement climatique sur le Plateau suisse

Le changement climatique exerce une influence toujours plus forte sur les écosystèmes forestiers suisses. La modification des conditions stationnelles et le risque accru de perturbations (sécheresses, chablis, tempêtes) ont un impact négatif considérable sur le potentiel sylvicole des forêts. Ces effets peuvent toutefois être atténués par le choix d'essences et de périodes de production appropriées. Le changement climatique exige donc une adaptation anticipée des stratégies sylvicoles afin de maintenir la vitalité et la résilience des écosystèmes forestiers et de garantir la fourniture des services écosystémiques de manière durable. Il est par ailleurs nécessaire que ces adaptations puissent être financées par les propriétaires forestiers par le biais de la valorisation des différentes prestations forestières dont la commercialisation du bois reste une composante importante. Le présent article décrit trois stratégies d'adaptation différentes («Adaptation douce», «Recherche de rendement», «Adaptation forte») et les conséquences économiques qui en découlent dans le contexte de différents scénarios climatiques. Les conséquences économiques des différentes stratégies ont été simulées à l'aide d'un modèle. Les résultats économiques montrent qu'une adaptation proactive des forêts au changement climatique est possible et même souhaitable d'un point de vue économique. Ils montrent également la grande importance des contributions publiques pour financer la transformation des forêts.

Economic evaluation of silvicultural strategies for adaptation to climate change on the Swiss Plateau

Climate change exerts an increasingly strong influence on Swiss forest ecosystems. Changes in site conditions and the increased risk of disturbances (droughts, windthrow, storms) have a considerable negative impact on the silvicultural potential of forests. However, these effects can be mitigated by choosing appropriate species and rotation lengths. Climate change therefore demands a proactive adaptation of silvicultural strategies in order to maintain the vitality and resilience of forest ecosystems and to ensure the provision of ecosystem services in a sustainable way. It is also necessary that these adaptations can be financed by the forest owners through the financial valorization of the different forest services of which wood production remains an important component. This article describes four different silvicultural strategies («Business as usual», «Soft adaptation», «Search for yield», «Strong adaptation») and the resulting economic consequences in the context of different climate scenarios. The economic consequences of the different strategies were simulated using a model. The economic results show that a proactive adaptation of forests to climate change is possible and even desirable from an economic point of view. They also show the great importance of public contributions to finance the needed forest transformations.