

Zukünftige Potenziale der nachhaltigen Waldenergieholzversorgung in der Schweiz

Matthias Erni¹, Oliver Thees^{1,*}, Renato Lemm¹, Golo Stadelmann¹, Janine Schweier¹, Eric K. Zenner²

¹Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)

²Penn State University, Department of Ecosystem Science & Management (USA)

Abstract

Mit der Entwicklung eines konzeptionellen Rahmens sind wir in der Lage, die Auswirkungen ökologischer und ökonomischer Restriktionen auf die räumlich-zeitliche Verfügbarkeit von Waldenergieholz in der Schweiz zu quantifizieren. Wir haben sie über einen Zeitraum von 40 Jahren für drei Waldbewirtschaftungsszenarien und zwei Holzmarktsituationen mit und ohne Subventionen für die Bewirtschaftung von Schutzwäldern simuliert. Ökologische und ökonomische Restriktionen schränken die Verfügbarkeit von Waldenergieholz stark ein. Das theoretische Potenzial entsprach der jährlichen Holzproduktion von 9 bis 16 Mio. m³/a oder 67 bis 118 PJ/a. Ökologische Restriktionen reduzierten es auf etwa die Hälfte bis ein Drittel, die zusätzlichen ökonomischen auf ein Drittel bis ein Fünftel (14–41 PJ/a), und nach Abzug der aktuellen Nutzung verblieb ein Zehntel des theoretischen Potenzials oder weniger. Verglichen mit der derzeitigen Waldbewirtschaftung erhöhten die Szenarien zum Vorratsabbau die verfügbaren Energieholzmengen über 40 Jahre um das Drei- bis Vierfache – dies insbesondere kurzfristig. Günstige Energieholzmärkte erhöhten die Verfügbarkeiten um 20 bis 25% und Subventionen um 30%, vor allem in den alpinen Regionen. Unter den aktuellen Marktpreisen sind das Mittelland und der Jura mit den grössten ungenutzten Potenzialen und der geringsten Abhängigkeit von Subventionen vielversprechende Regionen für die Energieholzmobilisierung. Die Reduktion der Vorräte bietet sich an, um in der frühen Phase der Energiewende mehr Energieholz im Wald zu nutzen und auf diese Weise Versorgungslücken anderer erneuerbarer Energien auszugleichen.

Keywords: Waldenergieholz, Waldbewirtschaftungsszenarien, Holzmarktsituationen, ökologische Restriktionen, Kostenanalyse

doi: 10.3188/szf.2022.0024

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail oliver.thees@wsl.ch

Der Ersatz fossiler durch erneuerbare Energien gewinnt zunehmend an Bedeutung. Er ist im öffentlichen Interesse, weil dadurch die Auswirkungen des Klimawandels gemildert, die Energieversorgung diversifiziert und die Energieunabhängigkeit gefördert werden können (Searle et al 2015, European Commission 2020). Emissionsziele für Treibhausgase der Europäischen Union avisieren bis 2030 eine Erhöhung erneuerbar erzeugter Energiemengen von derzeit 20% auf 32% des Gesamtenergieverbrauchs (Burkard et al 2009, European Commission 2013). Gemäss den Schweizer Energieperspektiven 2050+ (BFE 2020) müssen für die Erreichung des Netto-Null-Treibhausgasemissionsziels sowie für die sichere Energieversorgung der Schweiz die inländischen Potenziale für Biomasse ausgeschöpft werden. Trotz der limitierten Menge dürfte Biomasse im zukünftigen Energiesystem eine wichtige Rolle spielen

(European Commission 2020, Burkard et al 2009), nicht zuletzt, um schwankende Beiträge aus Wind und Sonne auszugleichen.

Im Hinblick auf diese Zielsetzung wird das Waldenergieholz gegenwärtig nicht ausreichend oder genügend effizient genutzt (z.B. Fritsche et al 2014). Seine Mobilisierung – und damit zusammenhängende Investitionsentscheide und Beurteilungen zur Versorgungssicherheit – erfordern verlässliche Schätzungen von Potenzialen und Verfügbarkeit. Da solche Schätzungen von vielen Faktoren beeinflusst werden, können sie stark voneinander abweichen und die tatsächlichen Potenziale überschätzen (z.B. Mantau et al 2010, Solberg et al 2014).

Daher haben wir einen konzeptionellen Rahmen entwickelt, um die Waldenergieholzpotenziale der Schweiz auf regionaler und nationaler Ebene realistisch zu quantifizieren, wobei wir ökologische

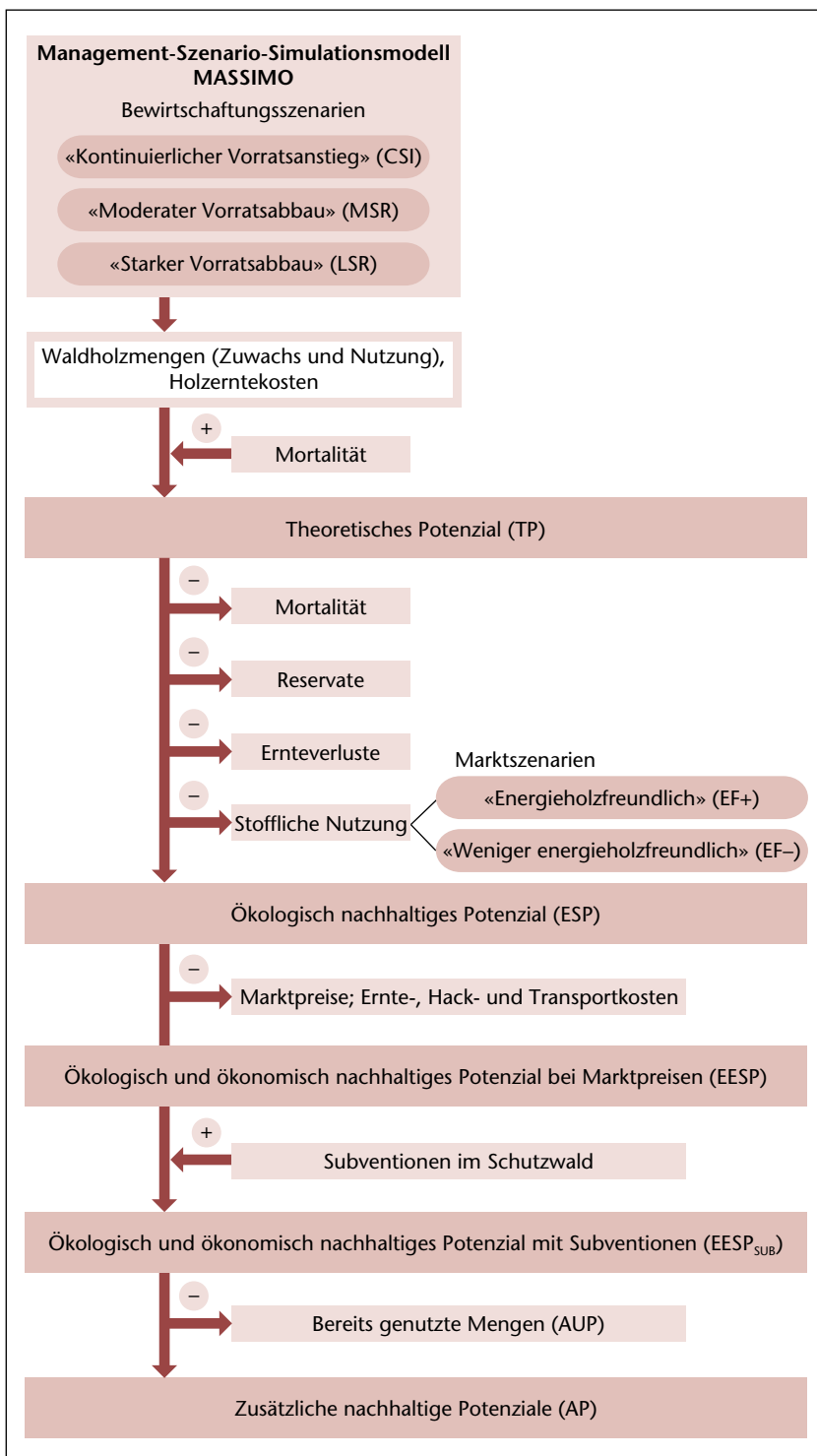


Abb 1 Konzeptioneller Rahmen zur Schätzung der Waldenergieholzpotenziale

und ökonomische Restriktionen detailliert berücksichtigt haben (Thees et al 2020). Die spezifischen Ziele waren

- die Quantifizierung der verfügbaren Waldenergieholzpotenziale unter drei Waldbewirtschaftungsszenarien mit graduell zunehmender Holzmobilisierung über einen Simulationszeitraum von 40 Jahren und unter Berücksichtigung zweier Marktsituationen,
- die Analyse der Bereitstellungskosten sowie der Auswirkungen der Subventionen für die Pflege der Schutzwälder auf die Potenziale, und

- die heutige und zukünftige regionale Verteilung der Waldenergieholzpotenziale und die Identifizierung strategisch vorteilhafter Standorte für Investitionen in die Bioenergie.

Methoden

LFI-Daten und Simulation

Zur Abschätzung zukünftiger Waldenergieholzpotenziale haben wir die Szenarien B, C und E aus Stadelmann et al (2016) verwendet, die mit dem empirischen «Management-Szenario-Simulationsmodell» (MASSIMO, Stadelmann 2020) simuliert wurden. MASSIMO ist ein distanzunabhängiger Einzelbaum-Simulator, der demografische Prozesse (Verjüngung, Wachstum und Mortalität) und die Bewirtschaftung mit empirischen Modellen abbildet. Das Modell nutzt Daten aus dem Schweizerischen Landesforstinventar (LFI 2 und 3) und simuliert die Waldentwicklung und zukünftige Erntepotenziale.

Durch die Integration von HeProMo (Holm et al 2020) in MASSIMO konnten die Erntekosten für jede simulierte Holznutzung berechnet werden. Zusätzlich wurden Kosten von 40 CHF/m³ für die Produktion und den Transport der Hackschnitzel zu den Konversionsanlagen angenommen (Thees et al 2017). Aufgrund unterschiedlicher Energiegehalte von Nadel- und Laubholz wurden deren Kosten getrennt berechnet und Klassen à 25 CHF/m³ von ≤65 bis >190 CHF/m³ zugeordnet (Tabelle 1).

Bewirtschaftungsintensität und Holzmarktsituation

Für die Simulation über vier Jahrzehnte haben wir die folgenden Bewirtschaftungsszenarien gewählt:

- Szenario «Kontinuierliche Vorratszunahme» (CSI), das vergangene Ernteintensitäten widerspiegelt, sodass in allen Regionen, ausser dem Mittelland, die Vorräte steigen (Tabelle 2, Abegg et al 2014)
- Szenario «Moderate Vorratsreduktion» (MSR) mit Absenkung der Vorräte auf 300–310 m³/ha bis 2046
- Szenario «Starke Vorratsreduktion» (LSR), das die Bereitstellung von Waldenergieholz durch häufigere Durchforstungen sowie 40% kürzere Umtriebszeiten bis 2046 erhöht und auf geringere Vorratsvolumen von 200–300 m³/ha abzielt (Stadelmann et al 2016)

Da die Holzmärkte die Anteile des energetisch und stofflich genutzten Holzes bestimmen, wurden die Potenziale der Szenarien jeweils für eine «energieholzfreundliche» (EF+) mit grösseren Anteilen der energetischen Nutzung und eine «weniger energieholzfreundliche» (EF-) Marktsituation mit mehr stofflicher Nutzung ermittelt (Thees et al 2013). Diese Marktsituationen wurden in Absprache mit

Art	Kostenklasse(n) (CHF / m ³)	Anteil Waldenergieholz (%)
Nadelholz	<90	100
	90–115	45
	>115	0
Laubholz	<140	100
	140–165	9
	>165	0

Tab 1 Anteil des verfügbaren Waldenergieholzes bei gegebenen Kostenklassen für Ernte, Hacken und Transport

Forst- und Holzwirtschaftsverbänden definiert und bereits in früheren Studien angewandt (Abegg et al 2014, Thees et al 2013).

Herleitung des Waldenergieholzpotenzials

Basierend auf einer hierarchischen Analyse, welche auf drei Bewirtschaftungsszenarien und zwei Marktsituationen zurückgreift, resultierten verschiedene Waldenergieholzpotenziale (Abbildung 1). Beim «Theoretischen Potenzial» (TP) wurde die maximal mögliche Energieholznutzung über die Standortqualität und das forstliche Management bestimmt. TP resultiert aus dem jährlichen Zuwachs und einem allfälligen Vorratsabbau. Volumina abgestorbener Bäume, die vor der Zersetzung grundsätzlich als Energieholz verwendet werden können, sind der Teil des TP, der in MASSIMO abgezogen wird und daher den simulierten Ernteszenarien zunächst wieder hinzugefügt werden muss (+15% in CSI und MSR, +10% im LSR).

Die energetische Nutzung des TP ist durch ökologische und ökonomische Restriktionen begrenzt

(Abegg et al 2014, Temperli et al 2017), woraus sich ein geringeres «ökologisch nachhaltiges Potenzial» (ESP) ergibt. Das ESP ist eine realistischere obere Angebotsgrenze des Waldenergieholzes, zu dessen Schätzung folgende Mengen vom TP subtrahiert wurden:

- (i) Mortalität
- (ii) Aus rechtlichen Gründen nicht nutzbares Holz aus Naturwaldreservaten (0.3–25% der Waldfläche pro Region, BAFU 2014)
- (iii) Ernteverluste, das heisst Teile der gefälltten und aufgearbeiteten Bäume, die durch unvollständige Nutzung im Wald verbleiben (abgeleitet aus Hepperle 2010)
- (iv) Der Anteil des wertvolleren, stofflich genutzten Waldholzes basierend auf einem «energieholzfreundlichen» (EF+) und einem «weniger energieholzfreundlichen» (EF-) Holzmarkt (Thees et al 2013)

Die Berücksichtigung wirtschaftlicher Restriktionen ergibt das «ökologisch und ökonomisch nachhaltige Potenzial» (EESP_{MP}, MP=Marktpreis), also diejenigen Holz mengen, die zu aktuellen Holzmarktpreisen pro kWh zur Verfügung gestellt werden können. Subventionen für die Bewirtschaftung von Schutzwäldern (Losey und Wehrli 2013) erweitern indirekt die wirtschaftlich verfügbare Holzmenge, woraus sich das «ökologisch und ökonomisch nachhaltige Potenzial mit Subventionen» (EESP_{SUB}) ergibt.

Nach Abzug energetisch bereits genutzter Mengen («bereits genutztes Potenzial», AUP) vom EESP_{SUB}, das auch Holz aus subventionierten Schutzwäldern enthält, ergibt sich das «zusätzliche Potenzial» (AP) für Bioenergie.

Produktionsregionen	Art	Vorrat (m ³ ha ⁻¹)	Nettozuwachs (m ³ ha ⁻¹ a ⁻¹)	Ernte (m ³ ha ⁻¹ a ⁻¹)	Absolute Ernte (Mio m ³ ha ⁻¹ a ⁻¹)
Jura	Nadelholz	199 ±8	4.5 ±0.36	4.5 ±0.59	0.90 ±0.12
	Laubholz	166 ±6.6	3.3 ±0.33	3.0 ±0.39	0.60 ±0.078
	Total	366 ±11	7.8 ±0.47	7.5 ±0.75	1.50 ±0.15
Mittelland	Nadelholz	217 ±8.7	7.0 ±0.42	9.6 ±0.86	2.21 ±0.22
	Laubholz	176 ±7	4.9 ±0.39	4.2 ±0.42	0.95 ±0.10
	Total	393 ±11.8	11.8 ±0.47	13.8 ±1.10	3.16 ±0.25
Voralpen	Nadelholz	339 ±13.6	7.0 ±0.56	6.0 ±0.78	1.30 ±0.17
	Laubholz	111 ±6.7	2.1 ±0.29	1.1 ±0.26	0.25 ±0.06
	Total	451 ±13.5	9.1 ±0.63	7.2 ±0.86	1.55 ±0.19
Alpen	Nadelholz	268 ±8	4.1 ±0.33	2.1 ±0.34	0.77 ±0.12
	Laubholz	49 ±3.4	1.1 ±0.20	0.4 ±0.12	0.16 ±0.05
	Total	316 ±9.5	5.2 ±0.36	2.5 ±0.35	0.93 ±0.13
Südalpen	Nadelholz	132 ±10.6	2.5 ±0.45	0.6 ±0.31	0.09 ±0.05
	Laubholz	113 ±6.8	1.9 ±0.48	0.2 ±0.09	0.03 ±0.02
	Total	245 ±9.8	4.4 ±0.62	0.9 ±0.36	0.13 ±0.05
Schweiz	Nadelholz	242 ±4.8	5.1 ±0.20	4.6 ±0.28	5.27 ±0.32
	Laubholz	114 ±2.3	2.5 ±0.15	1.7 ±0.20	1.99 ±0.14
	Total	356 ±3.6	7.6 ±0.23	6.3 ±0.32	7.26 ±0.36

Tab 2 Vorrat, Zuwachs und Ernte von Nadel- und Laubholz in der Schweiz und in den Produktionsregionen der Schweiz (Abegg et al 2014)

Waldbewirtschaftungsszenario	Kontinuierlicher Vorratsanstieg (CSI)		Moderater Vorratsabbau (MSR)		Starker Vorratsabbau (LSR)	
TP	100% (88.1 PJ a ⁻¹)		103% (90.6 PJ a ⁻¹)		110% (97.1 PJ a ⁻¹)	
Holzmarkt	EF-	EF+	EF-	EF+	EF-	EF+
ESP	29%	35%	38%	47%	44%	54%
	(25.5 PJ a ⁻¹)	(31.1 PJ a ⁻¹)	(33.6 PJ a ⁻¹)	(41.2 PJ a ⁻¹)	(38.6 PJ a ⁻¹)	(47.4 PJ a ⁻¹)
EESP _{SUB}	20%	25%	25%	31%	28%	35%
	(17.8 PJ a ⁻¹)	(21.8 PJ a ⁻¹)	(22.2 PJ a ⁻¹)	(27.4 PJ a ⁻¹)	(25.0 PJ a ⁻¹)	(30.8 PJ a ⁻¹)
EESP _{MP}	17%	21%	20%	24%	22%	27%
	(14.8 PJ a ⁻¹)	(18.1 PJ a ⁻¹)	(17.6 PJ a ⁻¹)	(21.5 PJ a ⁻¹)	(19.6 PJ a ⁻¹)	(23.9 PJ a ⁻¹)
AP	1%	6%	6%	12%	9%	16%
	(1.1 PJ a ⁻¹)	(5.1 PJ a ⁻¹)	(5.5 PJ a ⁻¹)	(10.7 PJ a ⁻¹)	(8.3 PJ a ⁻¹)	(14.1 PJ a ⁻¹)

Tab 3 Kaskade der Potenziale von Waldenergieholz in der Schweiz gemittelt über vier 10-Jahres-Simulationszeiträume zwischen 2017 und 2056 nach 3 Bewirtschaftungsszenarien und 2 Holzmarktsituationen. Die Prozentangaben sind relativ zum Wert von 88.1 PJ/a (=100%) im CSI-Bewirtschaftungsszenario. EF- bezieht sich auf einen weniger energieholzfreundlichen Markt, EF+ bezieht sich auf einen energieholzfreundlichen Markt. TP = Theoretisches Potenzial, ESP = Ökologisch nachhaltiges Potenzial, EESP_{SUB} = Ökologisch und ökonomisch nachhaltiges Potenzial mit Subventionen, EESP_{MP} = Ökologisch und ökonomisch nachhaltiges Potenzial zum Marktpreis, AP = Zusätzliches Potenzial mit Subventionen

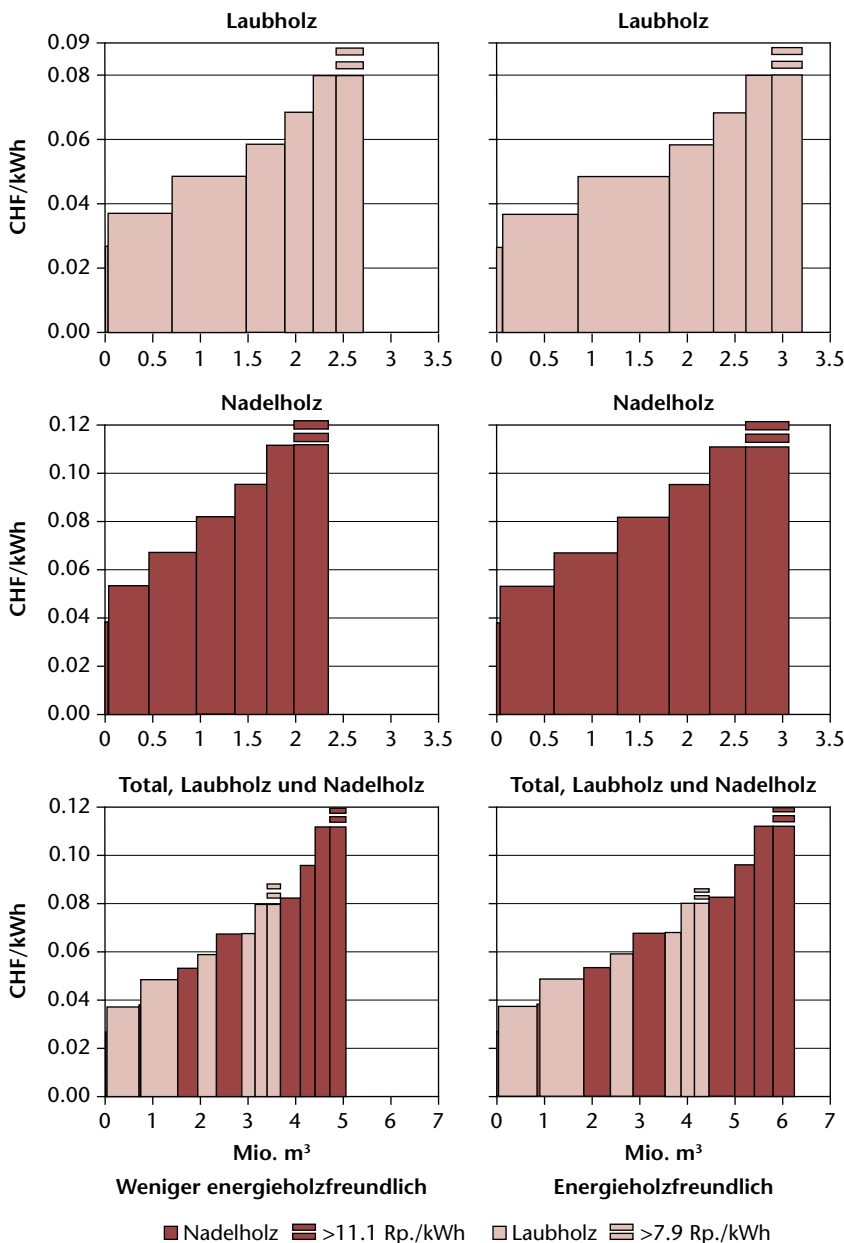


Abb 2 Effekt der Holzenergiepreise auf die jährlichen Waldenergieholzpotenziale. Gezeigt wird das ökologische nachhaltige Potenzial (ESP) zwischen 2017 und 2026 für das Szenario moderater Vorratsabbau (MSR) bei einer weniger energieholzfreundlichen (EF-, links) und einer energieholzfreundlichen (EF+, rechts) Marktsituation.

Energieberechnungen und Konversion

Nach der Konversion volumenbasierter Bereitstellungskosten in Kosten pro kWh wurden Volumina [m³] mit Umrechnungsfaktoren für frisch gefälltes (50% Feuchtigkeitsgehalt) Nadelholz (Fichte, 0.758 t/m³) und Laubholz (Buche, 1.116 t/m³) (LWF 2014) zunächst in Frischgewichte [t] umgerechnet. Deren Energiegehalt wurde dann mit Heizwerten von 2260 kWh/t für Nadelholz und 2160 kWh/t für Laubholz mit einem Faktor von 3.6 × 10⁶ J/kWh in Joule umgerechnet (BFE 2006).

$$\text{Energieinhalt Nadelholz (Ecf)} = \text{Volumen Nadelholz m}^3 \times 0.758 \text{ t/m}^3 \times 2260 \text{ kWh/t} \times 3.6 \times 10^6 \text{ J/kWh}$$

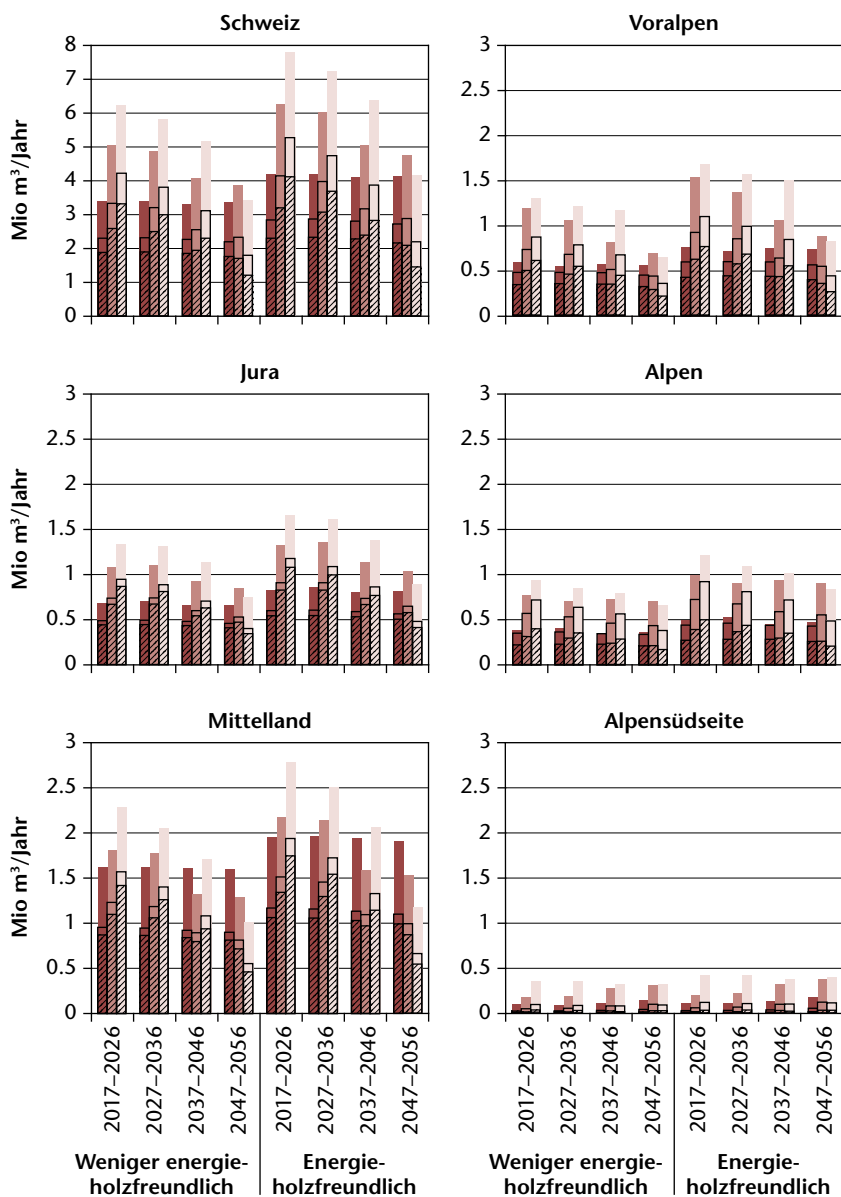
$$\text{Energieinhalt Laubholz (Ebl)} = \text{Volumen Laubholz m}^3 \times 1.116 \text{ t/m}^3 \times 2160 \text{ kWh/t} \times 3.6 \times 10^6 \text{ J/kWh}$$

Marktpreise

Da das meiste Waldenergieholz als Frischholz-Hackschnitzel verkauft wird, wurde die obere aktuelle Marktpreisempfehlung (2017/18) von 0.049–0.059 CHF/kWh für Frischholz (Wald und Holz 2017) als Grenze für eine wirtschaftlich nachhaltige Produktion festgelegt. Holzernte- und Bereitstellungskosten, die die aktuelle Marktpreisempfehlung übersteigen, schliessen eine energetische Nutzung aus. Der höhere Energiegehalt von Laubholz ermöglicht höhere Kostenschwellen von 142.22 CHF/m³ für Ernte, Hackung und Transport im Vergleich zu 101.07 CHF/m³ für Nadelholz (vgl. Tabelle 2).

Subventionen im Schutzwald

In der Schweiz wird die Bewirtschaftung von Schutzwäldern subventioniert, um eine minimale Pflege nach nationalen Richtlinien zu gewährleisten (Huber et al 2015, Frehner et al 2005). Dies betrifft im Mittelland 3%, in den Berggebieten bis zu 90% sowie insgesamt 49% des Waldes (Losey und Wehrli 2013). Aufgrund dieser Subventionen wurden Bereit-



■ Vorratsanstieg ■ Moderater Vorratsabbau ■ Starker Vorratsabbau
 Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Potenzial bei Berücksichtigung von Subventionen (SilvaProtect)
 Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Potenzial gemäss Marktpreis bis 5.9 Rp./kWh

Abb 3 Entwicklung der Waldenergiepotenziale der Schweiz (unterschiedliche Skalen, x-Achse fett beschriftet) und in den Produktionsregionen dargestellt in vier Dekaden für drei Bewirtschaftungsszenarien (Vorratsanstieg, CSI, dunkelrot; moderater Vorratsabbau, MSR, rot; starker Vorratsabbau, LSR, hellrot) und zwei Marktsituationen (weniger energieholzfreundlich EF-; energieholzfreundlich EF+). Ökologisches und ökonomisches nachhaltiges Potenzial mit Subventionen im Schutzwald (EESP_{SUB}, schwarz umrandet) und zu Marktpreisen von 0.059 CHF/kWh (EESP, gestrichelt)

stellungskosten von bis zu 190 CHF/m³ für Waldenergieholz in Schutzwäldern als wirtschaftlich rentabel betrachtet (Taverna et al 2016).

Zusätzliche Potenziale

Die bereits genutzte Menge (AUP) von 2.2 Mio m³ oder 16.8 PJ im Referenzjahr 2014 wurde der Forststatistik (BAFU 2015) entnommen, auf die sich unsere Untersuchungen aller heimischen Biomassen ebenfalls beziehen (Burg et al 2018). Seither hat sich die Nutzung von Waldenergieholz nur leicht verän-

dert (-3%, BAFU 2018). Um die abgeleiteten Volumina bereits genutzter Mengen (BAFU 2015) mit dem Output des MASSIMO-Modells verrechnen zu können, wurden die Volumina mit folgenden Faktoren korrigiert: +12.3% für Rinde, +7.1% für Messfehler, +7.0% für nicht erfasste Holzmenzen auf privaten Grundstücken und +2.8% auf öffentlichen Grundstücken (Altwegg et al 2010). Durch Abzug des so ermittelten AUP vom nachhaltigem EESP_{SUB} ergibt sich das zusätzliche Potenzial (AP).

Resultate

Energieholzpotenziale und Marktszenarien

Der 40-Jahre-Durchschnitt des TP von 88.1 PJ/a (=100%) bei Bewirtschaftung «weiter wie bisher» (CSI) wurde durch die stoffliche Nutzung und die ökologischen Restriktionen je nach Bewirtschaftungsszenario und Marktbedingungen auf etwa ein Drittel bis auf die Hälfte des TP reduziert. Dieser Wert entspricht dem ökologisch nachhaltigen Potenzial (ESP) (Tabelle 3). Zusätzliche wirtschaftliche Restriktionen (Bereitstellungskosten) reduzierten das durchschnittliche EESP_{MP} auf etwa ein Fünftel bis ein Viertel des TP. Durch die Subventionen für Schutzwälder (EESP_{SUB}) wurde das Potenzial wieder auf ein Viertel bis ein Drittel des TP erhöht. Die durchschnittlichen zusätzlichen Potenziale mit Subventionen für Schutzwälder (AP) betragen zwischen 1% und 16% des TP. In allen drei Bewirtschaftungsszenarien erhöhten energieholzfreundliche Marktsituationen (EF+) die Waldenergieholzpotenziale um 22% im Vergleich zu weniger energieholzfreundlichen Märkten (EF-).

Bei einem aktuellen Marktpreis von 0.059 CHF/kWh könnten durchschnittlich 1.9 Mio. m³ Laubholz und 0.6 Mio m³ Nadelholz pro Jahr für die Energieholznutzung mobilisiert werden. Während Laubholz zu geringeren Kosten (65–115 CHF/m³) bereitgestellt werden kann, ist Nadelholz teurer und gleichmässiger über alle Kostenklassen verteilt (Abbildung 2). Bei Marktpreisen unter 0.059 CHF/kWh dominieren Laubhölzer zunehmend die Waldenergieholzversorgung, während der Nadelholzanteil bei Marktpreisen über 0.08 CHF/kWh zunimmt. Preisschwankungen um 0.01 CHF/kWh erhöhen beziehungsweise vermindern Energieholzmengen (EESP_{MP}) um ~1 Mio. m³/a.

Bewirtschaftung

Im Durchschnitt des 40-Jahr-Simulationszeitraums stiegen alle Potenziale unter beiden Marktbedingungen mit zunehmender Ernte und Vorratsreduzierung im Vergleich zum CSI-Szenario an, was zu einer grösseren Verfügbarkeit von Waldenergie-

Bewirtschaftung	Kontinuierlicher Vorratsanstieg (CSI)				Moderater Vorratsabbau (MSR)				Starker Vorratsabbau (LSR)			
	2017–2026	2027–2036	2037–2046	2047–2056	2017–2026	2027–2036	2037–2046	2047–2056	2017–2026	2027–2036	2037–2046	2047–2056
Theoretisches Potenzial (TP)												
Mio. m ³ /a	12.2	12.1	12.0	12.1	14.1	13.3	11.5	11.1	16.3	15.1	13.3	9.2
PJ/a	88.9	87.8	87.3	88.3	102.1	96.5	83.7	80.1	118.1	109.1	94.8	66.5
Ökologisches nachhaltiges Potenzial (ESP)												
E-Markt	EF–/EF+	EF–/EF+	EF–/EF+	EF–/EF+	EF–/EF+	EF–/EF+	EF–/EF+	EF–/EF+	EF–/EF+	EF–/EF+	EF–/EF+	EF–/EF+
Mio. m ³ /a	3.4/4.2	3.4/4.2	3.4/4.1	3.3/4.1	5.0/6.3	4.9/6.0	4.1/5.1	3.9/4.8	6.2/7.8	5.8/7.2	5.2/6.4	3.4/4.2
PJ/a	25.7/31.4	25.9/31.6	25.1/30.1	25.4/31.1	37.9/46.6	36.8/45.2	30.8/37.8	28.9/35.3	47.0/58.1	43.8/53.9	38.3/46.9	25.4/30.6
Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Potenzial mit Subventionen im Schutzwald (EESP _{SUB})												
Mio. m ³ /a	2.3/2.8	2.3/2.9	2.3/2.8	2.2/2.7	3.3/4.1	3.2/4.0	2.6/3.2	2.3/2.9	4.2/5.3	3.8/4.7	3.1/3.9	1.8/2.2
PJ/a	18.0/22.0	18.2/22.3	17.7/21.8	17.2/21.1	25.9/31.9	25.1/30.9	19.9/24.5	18.0/22.1	32.8/40.7	29.5/36.4	23.8/29.3	13.7/16.6
Ökologisch-ökonomisch nachhaltiges Potenzial zu Marktpreisen (EESP)												
Mio. m ³ /a	1.9/2.3	1.9/2.3	1.9/2.3	1.8/2.2	2.6/3.2	2.5/3.1	1.9/2.4	1.7/2.1	3.3/4.1	3.0/3.7	2.3/2.8	1.2/1.5
PJ/a	15.0/18.4	15.2/18.6	14.9/18.2	14.1/17.3	20.8/25.5	20.2/24.7	15.7/19.2	13.7/16.6	26.6/32.8	23.9/29.3	18.2/22.1	9.6/11.5
Zusätzliches Potenzial mit Subventionen im Schutzwald (AP)												
Mio. m ³ /a	0.1/0.7	0.2/0.7	0.1/0.6	0.0/0.6	1.2/2.0	1.0/1.8	0.4/ 1.0	0.2/ 0.7	2.1/3.1	1.6/2.6	1.0/1.7	–0.4/0.0
PJ/a	1.3/5.3	1.4/5.6	1.0/5.0	0.5/4.4	9.1/15.2	8.4/14.2	3.2/7.8	1.3/5.4	16.0/23.9	12.8/19.7	7.1/12.5	0.0/0.0

Tab 4 Heutige und zukünftige Waldenergieholzpotenziale der Schweiz nach drei Bewirtschaftungsszenarien, zwei Marktsituationen (weniger energieholzfreundlich EF–, energieholzfreundlich EF+) sowie mit und ohne Subventionen im Schutzwald. Die Potenziale beinhalten Derbholz, Reisig und Rinde, nicht aber Wurzelstöcke, Nadeln und Blätter; sie basieren auf einem aktuellen Marktpreis von 0.059 CHF/kWh. Das zusätzliche Potenzial (AP) ergibt sich durch Subtraktion des bereits genutzten Potenzials (AUP) vom ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Potenzial mit Subventionen (EESP_{SUB}). Dabei wird angenommen, dass die Menge AUP (2.2 Mio m³/a beziehungsweise 16.7 PJ/a, nicht abgebildet) in Zukunft konstant bleibt.

holz führt (Tabelle 3). Beispielsweise überstiegen die durchschnittlichen EESP_{SUB}- und EESP_{MP}-Waldenergieholzpotenzial im MSR-Szenario in beiden Marktszenarien die des CSI-Szenarios in beiden Marktszenarien um 25% beziehungsweise 19% und im LSR-Szenario sogar um 41% beziehungsweise 32%. Zieht man die derzeit bereits genutzten 16.7 PJ/a ab (AUP), so verbleiben verfügbare Potenziale (AP) zwischen 1% und 6% der TP im CSI-Basisszenario, 6% und 12% im MSR-Szenario und 9% und 16% im LSR-Szenario.

Ein Überblick über die kaskadierten landesweiten Waldenergieholzpotenziale (TP, ESP, EESP_{SUB}, EESP_{MP}, AP) nach Managementszenario und Marktbedingungen für jedes Jahrzehnt zeigt einen Anstieg des Durchschnitts aller Waldenergieholzpotenziale mit zunehmender Ernteintensität (Tabelle 4; Abbildung 3). Verglichen mit mehr oder weniger zeitlich konstanten Waldenergieholzpotenzialen im CSI-Szenario gingen sie in den MSR- und LSR-Szenarien mit der Zeit zurück, vor allem im dritten Jahrzehnt (2037–2046) im MSR und im vierten Jahrzehnt (2047–2056) im LSR (Abbildung 3). Während die vom MSR-Szenario erzeugten EESP_{SUB}- und AP-Potenziale im vierten Jahrzehnt immer noch über denen des CSI-Szenarios lagen, war dies beim EESP_{MP} nicht der Fall. Im Vergleich dazu waren die EESP_{MP}-, EESP_{SUB}- und AP-Potenziale des LSR-Szenarios im letzten Jahrzehnt geringer als die des MSR- und auch jene des CSI-Szenarios.

Subventionen

Subventionen für die Bewirtschaftung von Schutzwäldern erhöhten die nachhaltigen Potenziale (EESP_{SUB} in Vergleich zu EESP_{MP}) je nach Bewirtschaftungsszenario und gemittelt über alle vier Jahrzehnte und beide Holzmarktsituationen um 20% (CSI), 27% (MSR) und 28% (LSR) (Tabelle 3, Abbildung 3). Dies führte zu subventionsbedingten Energie- beziehungsweise Holzmengen von 3.3 PJ/a (0.4 Mio. m³/a, CSI), 5.2 PJ/a (0.8 Mio. m³/a, MSR) und 6.1 PJ/a (0.9 Mio. m³/a, LSR). Die Grössenordnung der additiven Wirkung der Subventionen auf die Potenziale entsprach dem Gewinn durch die intensivere MSR-Bewirtschaftung gegenüber CSI. Subventionen können jedoch die mit der Zeit abnehmenden Waldenergieholzmengen in den intensiveren MSR- und LSR-Szenarien nicht ausgleichen.

Regionale Unterschiede

Erhebliche regionale Unterschiede existieren für alle Waldenergieholzpotenziale. Beispielsweise überschritten die Potenziale im Mittelland diejenigen der Berggebiete deutlich (Abbildung 3 und 4). Aufgrund höherer Erntekosten waren wirtschaftliche Restriktionen (EESP_{MP}) in den Berggebieten (Südalpen, Alpen und Voralpen) besonders ausgeprägt, wobei diese dafür stärker von Subventionen (EESP_{SUB}) profitierten. Unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte führten die intensiveren MSR- und LSR-Szenarien in den ersten drei Jahrzehnten im Vergleich

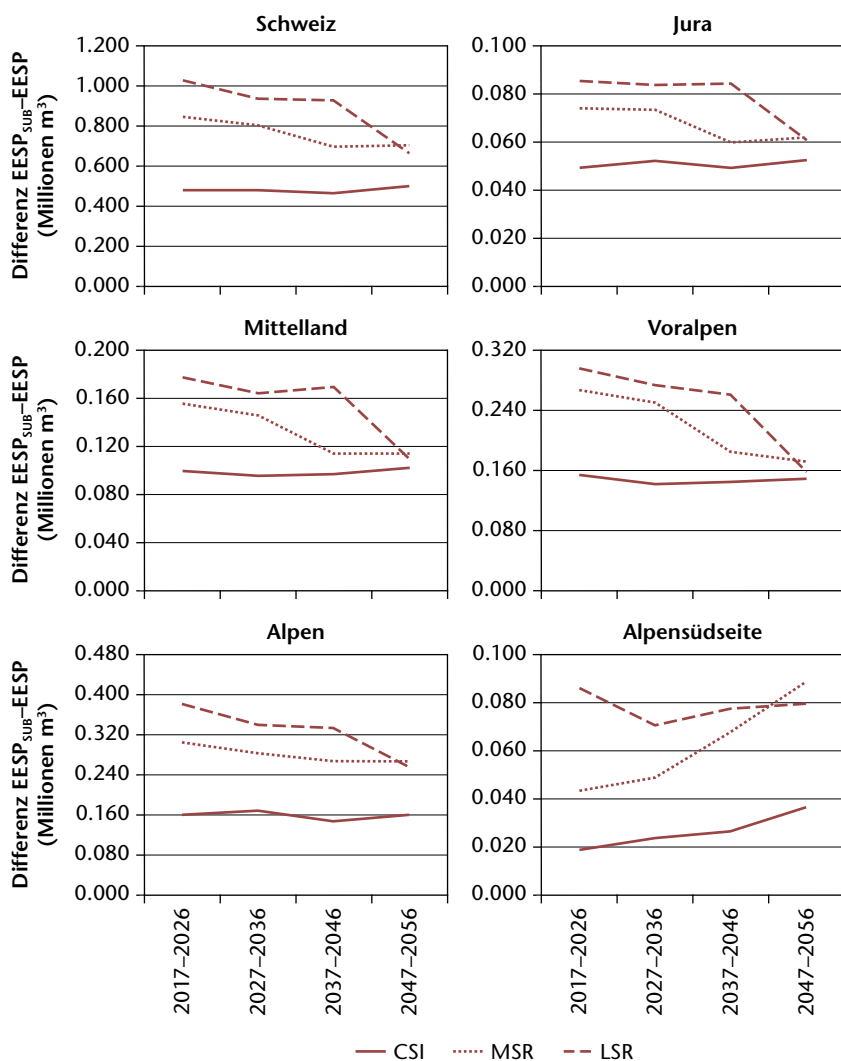


Abb 4 Effekt der Subventionen auf die Waldenergieholzpotenziale. Gezeigt wird die Differenz zwischen dem ökologischen und ökonomisch nachhaltigen Potenzial mit Subventionen im Schutzwald (EESP_{SUB}) und jenem zu Marktpreisen (EESP) für die Bewirtschaftungsszenarien kontinuierlicher Vorratsanstieg (CSI, durchgezogene Linie), moderater Vorratsabbau (MSR, gepunktete Linie) und starker Vorratsabbau (LSR, gestrichelte Linie). Dargestellt für die ganze Schweiz und die Produktionsregionen für vier Dekaden zwischen 2017 und 2056.

zum CSI zu beträchtlichen Steigerungen der EESP_{MP} und EESP_{SUB} in allen Regionen. Im vierten Jahrzehnt sanken die Potenziale in allen Regionen mit Ausnahme der südlichen Alpen. Während die EESP_{MP}- und EESP_{SUB}-Potenziale in allen Regionen im LSR-Szenario die des MSR in der nahen Zukunft überstiegen, erbrachte das MSR-Szenario in ferner Zukunft die grössten Waldenergieholzpotenziale in allen Regionen ausser im Mittelland und den Südalpen (Abbildung 3). Die Subventionseffekte waren in den Alpen und Voralpen am grössten, in den Südalpen am geringsten und während der gesamten Simulationsperiode grösser im LSR- und MSR-Szenario als im CSI-Szenario (Abbildung 4). Ein Drittel des schweizweit bereits genutzten Potenzials (AUP) von 16.8 PJ/a (2.2 Mio. m³/a) wurde im Mittelland (32%) abgeschöpft, das restliche in den Alpen (22%), in den Voralpen (20%), im Jura (19%) und auf der Alpensüdseite (7%).

Wegen des höchsten Zuwachses ist auch in naher Zukunft die grösste zusätzliche Menge (AP) im Mittelland verfügbar, gefolgt von Jura und Voralpen (Abbildung 5). In ferner Zukunft ist im Mittelland und im Jura nur noch ein bescheidenes AP zu erwarten. Negative AP-Werte sind möglich, wenn AUP-Werte die EESP-Werte übersteigen.

Diskussion

Potenziale und Bewirtschaftungsszenarien

Die Schätzungen realistisch verfügbarer Waldenergieholzmengen liegen bei 25%–50% des Theoretischen Potenzials (TP). Diese Reduktion im ESP ist vor allem eine Folge des Abzugs der stofflichen Holznutzungen. Unter Berücksichtigung weiterer wirtschaftlicher Restriktionen sinkt das verfügbare Potenzial sogar bis zu weniger als 25% (beziehungsweise ein Drittel mit Subventionen).

Die Szenarien prägen die zeitliche Entwicklung und Verfügbarkeit der Waldenergieholzpotenziale stark. Verglichen mit dem am wenigsten intensiven Bewirtschaftungsszenario (CSI), das eine konstante Versorgung mit Waldenergieholz über mehrere Jahrzehnte ermöglicht, erhöhten beide Vorratsabbauszenarien die kumulativen Gesamtpotenziale und führten zu einem Anstieg des ESP über den gesamten Zeitraum von 32% (MSR) beziehungsweise 52% (LSR) (8–16 PJ/a beziehungsweise 1.1–2.2 Mio. m³/a).

Starker Vorratsabbau (LSR) führt zwangsläufig zu einer verbesserten kurzfristigen, jedoch stark verminderten langfristigen Verfügbarkeit von ökologisch und ökonomisch nachhaltigem Waldenergieholz nach 2046, weil erheblich reduzierte verbleibende Lagerbestände die jährlichen Zuwächse begrenzen. Kurzfristige (2017–2026) Zuwächse beim EESP_{SUB} von 9.3–16.5 PJ/a beziehungsweise 1.2–2.2 Mio. m³ im LSR- gegenüber dem CSI-Szenario zeigen deutlich, dass Vorratsabbau eine rationale Antwort auf politische Forderungen nach erweiterter Nutzung von Holz als erneuerbarem Energieträger darstellt, der kurz- bis mittelfristig einen Beitrag zur Schliessung von Versorgungslücken während der Energiewende leisten kann.

Um die Schwankungen des «Boom and Bust»-Zyklus des LSR-Szenarios zu vermeiden und eine stetige, zuverlässige und langfristige Versorgung der Industrie mit Waldenergieholz sicherzustellen, wäre das MSR-Szenario, das weniger stark von der bisherigen Bewirtschaftung abweicht, vorzuziehen. Trotz abnehmender zusätzlicher Potenziale im Laufe der Zeit liefert es einen ökologisch und ökonomisch nachhaltigeren Waldenergieholzbeitrag als das CSI-Szenario und dürfte von der Forst- und Holzindustrie favorisiert werden, weil es die Nutzung in ein engeres Gleichgewicht mit der jährlichen Volumen-

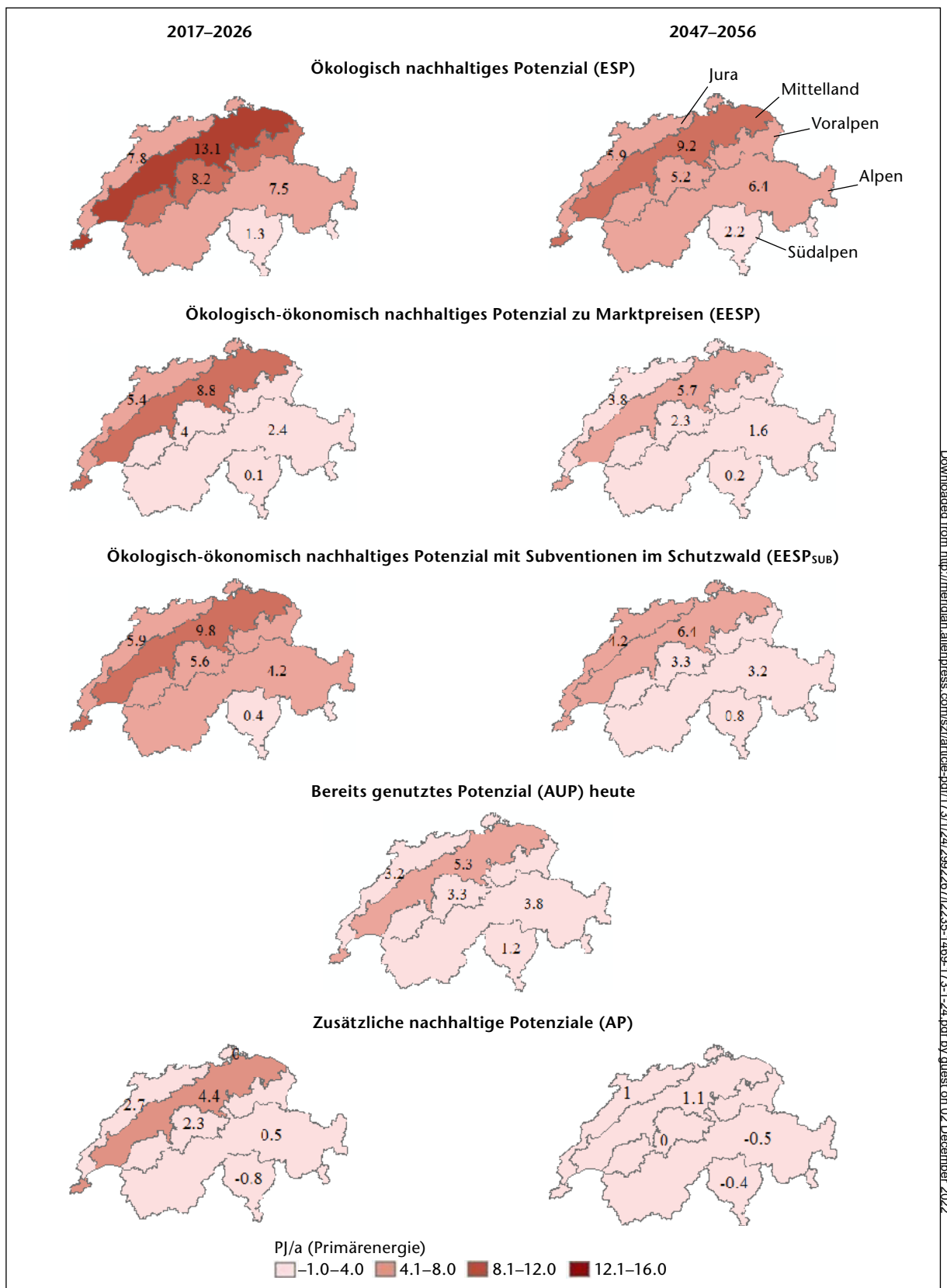


Abb 5 Regionale Waldenergieholzpotenziale (PJ/a, Primärenergie) im Vergleich zwischen naher und ferner Zukunft (2017–2026, links, beziehungsweise 2047–2056, rechts). Basierend auf dem Szenario moderater Vorratsabbau (MSR) und der weniger energiefreundlichen Marktsituation (EF–)

produktion bringt. Gleichzeitig bietet es zusätzliche Vorteile wie verbesserte Stabilität der Waldbestände gegen Windwurf, grössere Struktur- und Artenvielfalt und grössere Flexibilität beim Wechsel zu Baumarten mit kürzeren Umtriebszeiten oder als Reaktion auf den Klimawandel. Ob eine Vorratsreduktion er-

folgreich umgesetzt werden kann, hängt jedoch von weiteren externen Bedingungen ab – zum Beispiel von ausreichend hohen Rundholzpreisen und Sägewerkskapazitäten, welche die traditionelle Nutzung von Waldenergieholz als Nebenprodukt erleichtern. Jedoch könnten sowohl steigende Kosten für die Be-

reitstellung als auch Widerstand von Bewirtschaftenden und der Gesellschaft gegen intensivere Forstwirtschaftsmethoden die Nutzung von Energieholz beeinträchtigen

Unter der Annahme, dass CSI und MSR die realistischen Bewirtschaftungsszenarien sind und die entsprechenden EESP_{MP}- und EESP_{SUB}-Potenziale realistische Schätzungen der Verfügbarkeit von Waldenergieholz abbilden, bewegen sich deren Untergrenzen über den gesamten Simulationszeitraum zwischen 13.7 und 25.5 PJ/a (1.7–3.2 M m³/a) und die Obergrenzen zwischen 17.2 und 31.9 PJ/a (2.2–4.1 M m³/a).

Subventionen

Subventionen für die Schutzwaldpflege erhöhen die Waldenergieholzpotenziale in allen Szenarien um durchschnittlich 25% (Energienmenge) und 28% (Holzmenge). Die Differenz zwischen Energie- und Holzmenge widerspiegelt die Dominanz des Nadelholzes mit geringerem Energiegehalt pro Volumeneinheit in Berggebieten, wo sich die meisten Schutzwälder befinden. Im Vergleich zu EESP_{MP} führten die Subventionen zu einem EESP_{SUB}-Anstieg von 25% (MSR) beziehungsweise 41% (LSR) (4–9 PJ/a beziehungsweise 0.6–1.2 Mio. m³/a) bei Vorratsabbau.

Erwartungsgemäss fallen im Alpenraum die relativ grössten subventionsbedingten Mehrmengen an (Abbildung 4). Trotz erhöhter wirtschaftlicher Attraktivität von Holzernte in Schutzwäldern ist der primäre Zweck der Subventionen die Förderung der Schutzwaldpflege und nicht die Mobilisierung von Waldenergieholz.

Regionale Unterschiede

Die regionalen Analysen führten zu unterschiedlichen Ergebnissen bei alpinen und nicht alpinen Regionen und weisen auf Regionen hin, die sich für Investitionen in Bioenergie aus Wäldern anbieten. Die Verringerung der Vorräte in den MSR- und LSR-Szenarien führte zu den grössten relativen Zunahmen von EESP_{SUB} und EESP_{MP} in den Südalpen, Alpen und Voralpen, wo sich in den letzten Jahrzehnten grosse Mengen an Vorräten aufgebaut haben (Stadelmann 2020). Die substanziellen Verringerungen von ESP zu EESP_{MP} in den alpinen Regionen – weniger als die Hälfte des ESP in den MSR- und LSR-Szenarien und etwas mehr als die Hälfte im CSI-Szenario – offenbaren jedoch die Herausforderungen einer kosteneffizienten Holznutzung in Gebirgswäldern. Diese Potenziale können daher in den alpinen Regionen zu einem grossen Teil nur mithilfe von Subventionen mobilisiert werden. Im besser zugänglichen Gelände des laubholzreicheren Juras und des Mittellandes ist eine deutlich geringere Reduktion der Waldenergieholzpotenziale aufgrund wirtschaftlicher Beeinträchtigungen zu er-

warten, wie ein viel geringerer Anstieg von EESP_{SUB} über den EESP_{MP} verdeutlicht. Ausgehend von der regionalen Verteilung der zusätzlichen Potenziale sind das Mittelland und der Jura wegen der geringeren Abhängigkeit von Subventionen die einzigen Regionen, in denen strategische Investitionen in die vermehrte Nutzung von Waldenergieholz vorteilhaft scheinen. Jedoch ist auch in diesen beiden Regionen die Verfügbarkeit von zusätzlichem Waldenergieholz recht begrenzt.

Qualität der Modellierung

Die Verlässlichkeit unserer Schätzungen ergibt sich dadurch, dass sie zahlreiche wichtige Bedingungen einbeziehen, die einen realistischen analytischen Rahmen bilden, der allzu optimistische Annahmen und Einschätzungen verfügbarer Waldenergieholzmengen vermeidet. Deshalb wurden Bewirtschaftungsszenarien mit Personen aus der Praxis abgestimmt, regionale ökologische Restriktionen (das heisst Reservatsflächen und Schutzwälder) einbezogen und ökonomische Bedingungen hinsichtlich unterschiedlicher Bereitstellungskosten und Marktbedingungen (das heisst die höherwertige stoffliche Nutzung von Holz) berücksichtigt. Mit diesem Ansatz lassen sich Auswirkungen verschiedener Beschränkungen quantifizieren und können realistische Grössenordnungen der Mindest- und Höchstgrenzen verschiedener Waldenergieholzpotenziale bestimmt werden. Unsere Schätzungen sind mit früheren Potenzialstudien für die Schweiz (Thees et al 2014, Taverna et al 2016, Pauli et al 2010) vergleichbar, insbesondere wenn man methodische Unterschiede und stark variierende Annahmen berücksichtigt (Solberg et al 2014, Mantau et al 2010, Abegg et al 2014).

Einordnung in den Energiekontext

Die Obergrenze von 209 PJ/a nachhaltiger Primärenergie aus Biomasse entspricht dem Energiegehalt von 4.8 Millionen Tonnen Rohöl oder rund 19% des gesamten Energieverbrauchs der Schweiz (Burg et al 2018). Unsere Minimal- und Maximalschätzungen von 9.6–32.8 PJ/a für EESP_{MP} beziehungsweise 13.7–40.7 PJ/a für EESP_{SUB} deuten darauf hin, dass in den nächsten 40 Jahren lediglich 1%–4% des gesamten nationalen Energieverbrauchs mit Waldenergieholz gedeckt werden können. Berücksichtigt man jedoch auch andere verfügbare holzartige Biomassen, könnten in der Schweiz zusätzlich 24.1 PJ/a (11.7 PJ/a aus Altholz, 7.6 PJ/a aus industriellen Holzresten und 4.8 PJ/a aus Holz aus der Landschaftspflege) mobilisiert werden (Burg et al 2018). Damit würde das Ziel der Europäischen Union von 5% aus holzartiger Biomasse, (EEA 2013), dessen Anteil an der gesamten nachhaltig nutzbaren Energie in der Schweiz rund 50% beträgt, übertroffen (Thees et al 2017).

Ob die zusätzlichen Potenziale (AP) tatsächlich zur Energieerzeugung genutzt werden, hängt zu einem grossen Teil von den Holz- und Energiepreisen ab, wobei eine Preiserhöhung um 0.01 CHF/kWh das nachhaltige Waldenergieholzpotenzial um etwa 8 PJ/a oder 1 Mio. m³/a erhöhen würde. Aufgrund langfristiger Verträge mit indexierten Preisen für Hackschnitzzellieferungen (Kanton Thurgau, 2017) sind die Waldenergieholzpreise im Gegensatz zu jenen anderer Holzsortimente in der Schweiz in den letzten Jahren jedoch relativ stabil geblieben.

Subventionen zur direkten Förderung der Waldenergieholznutzung gelten als problematisch und unrealistisch. Es ist zwar nicht undenkbar, dass die Schweizer Gesellschaft bereit sein könnte, mehr für erneuerbare Energien zu bezahlen, für eine nachhaltige Mobilisierung des AP wären eine grössere Nachfrage beziehungsweise zusätzliche Konversions- und Sägewerkskapazitäten nötig. Verglichen mit der fehlenden Nachfrage sind die Mobilisierungsmöglichkeiten via Kostensenkungen durch effizientere Holzertesysteme gering (Thees 2016).

Neben der Umstellung auf erneuerbare Energien und dem Ausstieg aus der Kernenergie zielt die Energiewende in der Schweiz auch auf die Reduktion von CO₂-Emissionen ab. Auch wenn die Möglichkeiten zur CO₂-Reduktion durch Kaskadennutzung bisher kaum genutzt werden, bietet die energetische Nutzung von Holz infolge der Substitution fossiler Energien ein grosses Optimierungspotenzial. Optimierungen müssen Ansätze berücksichtigen, die über die begrenzten Möglichkeiten der Waldbewirtschaftung zur Erhöhung der Ressourcenmengen und über den Ersatz fossiler Brennstoffe durch Verbrennung von Holz zur Wärmeerzeugung hinausgehen. Beispielsweise bieten alternative Konversionsverfahren ein erhebliches Potenzial, CO₂-Emissionen im gesamten System deutlich zu mindern. Nutzungspfade, die auf der Methanisierung von Holz in Kombination mit einem Power-to-Gas-Verfahren basieren, erreichen eine fast zehnfache CO₂-Emissionsreduktion im Vergleich zur Verbrennung von holzartiger Biomasse (Girones et al 2018). Eine zukünftige Herausforderung wird es sein, die energetischen Nutzungspfade von Holz zur Minimierung der CO₂-Emissionen zu optimieren und die Möglichkeiten der Waldressourcenproduktion unter diesem Aspekt zu integrieren.

Schlussfolgerungen

Detaillierte räumlich und zeitlich differenzierte Analysen ermöglichen die transparente Beschreibung, Eingrenzung und Verringerung von Unsicherheiten bezüglich zukünftiger Waldenergieholzpotenziale für Politik und Industrie. Hierzu notwendig sind zuverlässige Inventurdaten und die Ver-

fügbare robuster Modelle zur Simulation von Waldwachstum und -bewirtschaftung sowie zur Kalkulation von Erntekosten und -erlösen.

Unsere Ergebnisse zeigen, dass ökologische und ökonomische Restriktionen das Nutzungspotenzial von Waldenergieholz stark einschränken, sodass, ceteris paribus, langfristig nur 20 bis 30% des jährlichen Holzzuwachses für energetische Zwecke zur Verfügung stehen. Die Intensität der Waldbewirtschaftung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Grösse der Potenziale. Während eine moderate Vorratsreduktion kurzfristig auch ohne extreme waldbauliche Massnahmen eine erhebliche Rohstoffmobilisierung ermöglicht, könnte ein starker Vorratsabbau die Versorgung mit Energieholz langfristig gefährden. Dennoch ist es möglich, dass die derzeitige forcierte Holzernte aufgrund von Trockenheit, Borkenkäferbefall und Windwurf als Folge des Klimawandels letztlich zu einer Vorratsreduktion in der gleichen Grössenordnung wie die extreme Variante führt. Da Waldenergieholz in der Schweiz in vielen Fällen ein Kuppelprodukt ist, hängt die Realisierung des Vorratsabbaus abgesehen von Zwangsnutzungen stark von der Marktfähigkeit des Stammholzes ab.

Holz- und Energiepreise haben entscheidenden Einfluss auf die Verfügbarkeit der Waldenergieholzpotenziale, die durch Subventionen für die Bewirtschaftung des Schutzwaldes in den alpinen Regionen erheblich erhöht werden können. Das grösste ökologisch und ökonomisch nachhaltige Zusatzpotenzial würde sich bei heutigen Marktpreisen jedoch im Mittelland und im Jura ergeben. Attraktiver für die Energiemärkte werden könnte Holz infolge grösserer Effizienz in der Erntetechnologie beziehungsweise -logistik, höherer Energiepreise, CO₂-Besteuerung fossiler Brennstoffe sowie Subventionen oder strengeren politischen Auflagen, die einen Mindestanteil von Holzbrennstoff im erneuerbaren Energiemix vorschreiben.

Auch wenn das nachhaltige Waldenergieholzpotenzial vergleichsweise gering ist und alternative stoffliche, insbesondere kaskadische Nutzungen von Waldholz unter dem Gesichtspunkt der langfristigen CO₂-Speicherung und als C-Quelle für Chemikalien vorteilhafter sind, kann seine energetische Nutzung einen wichtigen Beitrag zur Energiewende leisten: Es kann (i) fossile Energieträger ersetzen, (ii) zeitlich flexibel Wärme, Elektrizität und Treibstoff bereitstellen und (iii) durch seine Speicherbarkeit zum Ausgleich des Energienetzes eingesetzt werden und eine zentrale Rolle bei der Kopplung verschiedener Energiesektoren spielen. Wie andere Biomassen ist Waldenergieholz ein «Joker» für die Bewältigung der Energiewende.

Weitere Forschung sollte sich auf die Sensitivität und Unsicherheit von Potenzialen – besonders mit Blick auf die Folgen durch den Klimawandel –

sowie auf Managementszenarien konzentrieren, die auf lokale Bedingungen zugeschnitten sind und ortsspezifische Nutzungskaskaden von Holz berücksichtigen. Zu diesem Zweck sollten Potenzialstudien durch Lebenszyklusanalysen (LCA) ergänzt werden, die wichtige Ressourcennutzungspfade ganzheitlich untersuchen. ■

Eingereicht: 26. März 2021, akzeptiert (mit Rewiew): 17. November 2021

Dank

An Innosuisse, die Schweizerische Agentur für Innovationsförderung, welche die Studie über das Schweizer Kompetenzzentrum für Bioenergieforschung «Biomasse für die Schweizer Energiezukunft», SCCER BIOSWEET, finanzierte. An das USDA National Institute of Food and Agriculture Hatch Appropriations under Project #PEN04639 and Accession #1015105 für die Unterstützung von Eric K. Zenner.

Literatur

- ABEGG M, BRÄNDLI U-B, CIOLDI F, FISCHER C, HEROLD-BONARDIA, HUBER M ET AL. (2014)** Fourth national forest inventory – result tables and maps on the Internet for the NFI 2009–2013 (NFI4b). Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt WSL.
- ALTWEGG J, SCHOOP A, HOFER P (2010)** Klären von Differenzen zwischen Holznutzungsmengen nach Forststatistik und nach LFI. Technischer Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wald-holz/externe-studien-berichte/klaeren_von_differenzzwischenholznutzungsmengennachforststatis.pdf.
- BAFU (2018)** Jahrbuch Wald und Holz 2018. Bern: Bundesamt für Umwelt. 106 p.
- BAFU (2014)** Waldreservate in der Schweiz. Bericht über den Stand Ende 2012. Bern: Bundesamt für Umwelt. 26 p.
- BAFU (2015)** Jahrbuch Wald und Holz 2014. Bern: Bundesamt für Umwelt. 162 p.
- BFE (2020)** Energieperspektiven 2050+. Kurzbericht. Bern: Bundesamt für Energie. 98 p.
- BFE (2006)** Masse, Einheiten, Zahlen: Umrechnungsfaktoren, Masseneinheiten und Energieinhalte. Bern: Bundesamt für Energie. 1 p. <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/1010>.
- BURG V, BOWMANN G, ERNI M, LEMM R, THEES O (2018)** Analyzing the potential of domestic biomass resources for the energy transition in Switzerland. *Biomass and Bioenergy* 111: 60–69.
- BURKARD R, FELDER D, GUGGISBERG B, HARTMANN D (2009)** Biomassestrategie Schweiz, Strategie für Produktion, Verarbeitung und Nutzung von Biomasse in der Schweiz. Bundesamt für Energie (BFE), Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Bundesamt für Umwelt (BAFU). 9 p.
- EUROPEAN COMMISSION (2013)** Report from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Renewable energy progress report. 15 p.
- EUROPEAN COMMISSION (2020)** Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, Den Rat, Den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Investitionsplan für ein zukunftsfähiges Europa, Investitionsplan für den europäischen Grünen Deal. 27 p.
- EEA (2013)** EU bioenergy potential from a resource-efficiency perspective. European Environment Agency. 60 p.
- FREHNER M, WASSER B, SCHWITTER R (2005)** Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. 30 p. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wald-holz/uv-umwelt-vollzug/nachhaltigkeit_undefolgskontrolleimschutz-wald2005.pdf.
- GIRONES V, PEDUZZI C, VUILLE E, MARÉCHAL F (2018)** On the Assessment of the CO₂ Mitigation Potential of Woody Biomass. *Frontiers in Energy Research* 5: 19.
- HEPPERLE F (2010)** Prognosemodell zur Abschätzung des Regionalen Waldenergieholzpotenzials auf der Grundlage Forstlicher Inventur- und Planungsdaten unter Berücksichtigung ökologischer, technischer und wirtschaftlicher Nutzungseinschränkungen. Freiburg i.B.: Albert-Ludwigs-Universität. PhD Thesis. 165 p.
- HOLM S, FRUTIG F, LEMM R, THEES O, SCHWEIER J. (2020)** HeProMo: A Decision Support Tool to Estimate Wood Harvesting Productivities. *PLoS ONE* 15 (12): e0244289:19.
- HUBER M, BRANG P, SANDRIA A (2015)** Schutz vor Naturgefahren. In: A. Rigling, H. P. Schaffer, Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL (Eds.), *Waldbericht 2015. Zustand und Nutzung des Schweizer Waldes*, Bern, Birmensdorf. pp. 94-97.
- FRITSCHKE UR, IRIARTE L, FITZGERALD J, BIRD N (2014)** Sustainability Assurance for Energy from Forestry. Final Report. International Institute for Sustainability Analysis and Strategy II-NAS, European Forest Institute EFI, Joanneum Research JR. 57 p.
- KANTON THURGAU (2017)** Nutzung Energieholz, Aktueller Stand. Departement für Inneres und Volkswirtschaft. 23 p.
- LOSEY S, WEHRLI A (2013)** Schutzwald in der Schweiz. Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald. Bundesamt für Umwelt. 29 p. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/naturgefahren/fachinfo-daten/schutzwald_in_derschweiz-vomprojektsilvaprotect-chzumharmonisier.pdf.
- LWF (2014)** Der Energieinhalt von Holz. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Merkblatt 12. 4 p.
- MANTAU U, SAAL U, PRINS K, STEIERER F, LINDNER M ET AL. (2010)** EUwood - Real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report. 160 p.
- PAULI B, BÜRGI P, BRÜHLHARD S, THEES O, LEMM R, ROSSET C (2010)** Holz als Rohstoff und Energieträger. Dynamisches Holzmarktmodell und Zukunftsszenarien. Schlussbericht des Forschungsprogramms «Energiewirtschaftliche Grundlagen» des Bundesamts für Energie BFE. 207 p.
- SEARLE S, MALINS C (2015)** A reassessment of global bioenergy potential in 2050. *Global Change Biol Bioenergy* 7: 328–336.
- SOLBERG B, HETEMÄKI L, KALIO A, MOISEYEV A, SJOLIE H (2014)** Impacts of forest bioenergy and policies on the forest sector markets in Europe – what do we know? EFI Technical Report 89: 35–51.
- STADELMANN G (2020)** Quantifizierung der Waldbiomasse und des Holznutzungspotenzials in der Schweiz. *Schweiz Z Forstwes* 171: 124–132. doi: 10.3188/szf.2020.0124.
- STADELMANN G, HEROLD A, DIDION M, VIDONDO B, GÓMEZ A, THÜRIG E (2016)** Holzerntepotenzial im Schweizer Wald: Simulation von Bewirtschaftungsszenarien. *Schweiz Z Forstwes* 167 (3): 152–161. doi: 10.3188/szf.2016.0152.
- TAVERNA R, GAUTSCHI M, HOFER P (2016)** Das nachhaltig verfügbare Holznutzungspotenzial im Schweizer Wald. *Schweiz Z Forstwes* 167 (3): 162–171.
- TEMPERLI C, STADELMANN G, THÜRIG E, BRANG P (2017)** Timber mobilization and habitat tree retention in low-elevation mixed forests in Switzerland: An inventory-based scenario analysis of opportunities and constraints. *Europ J Forest Res* 136 (4): 711–725.

- THEES O (2016)** «Migros-Wald» oder Märchenwald? Schweiz Z Forstwes 167 (4): 200–204.
- THEES O, BURG V, ERNI M, BOWMAN G, LEMM R (2017)** Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung: Abschätzung der Schweizer Biomassenressourcen. Schlussbericht SCCER Biosweet. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch. anstalt WSL, Ber. 57. 299 p.
- THEES O, ERNI M, LEMM R, STADELMANN G, ZENNER EK (2020)** Future potentials of sustainable wood fuel from forests in Switzerland. Biomass and Bioenergy 141: 105647
- THEES O, KAUFMANN E, LEMM R, BÜRGI A (2013)** Energieholzpotenziale im Schweizer Wald. Schweiz Z Forstwes 164 (12): 351–363.
- WALD UND HOLZ (2017)** Energieholzpreise 2017/2018, Richtpreise für Hackschnitzel, Gemeinsame Empfehlung von Wald-Schweiz, Holzenergie Schweiz, Holzindustrie Schweiz, Forstunternehmer Schweiz. Wald und Holz 12 (17): 38.

Potentiel futur de l'approvisionnement durable en bois-énergie forestier en Suisse

Grâce au développement d'un cadre conceptuel, nous sommes en mesure de quantifier les effets des restrictions écologiques et économiques sur les disponibilités spatiotemporelles du bois-énergie forestier en Suisse. Ces restrictions ont été simulées sur une période de 40 ans pour trois scénarios de gestion forestière et deux situations de marché du bois (avec et sans subventions) pour la gestion des forêts de protection. Les restrictions écologiques et économiques ont fortement limité la disponibilité du bois-énergie, réduisant le potentiel théorique, qui correspond à la production annuelle de bois de 9–16 millions de m³/an, soit 67–118 PJ/an, à environ la moitié ou un tiers en raison des restrictions écologiques, à un tiers ou un cinquième (14–41 PJ/an) en raison des restrictions économiques supplémentaires et à un dixième ou moins en déduisant l'exploitation actuelle. Par rapport à la gestion forestière actuelle, les scénarios d'épuisement des réserves multiplient par trois ou quatre les quantités de bois-énergie disponibles sur 40 ans, particulièrement à court terme. Des marchés favorables au bois-énergie augmentent les disponibilités de 20%–25%, tandis que les subventions les augmentent de 30%, surtout dans les régions alpines. Avec les prix actuels du marché, le Plateau central et le Jura sont des régions prometteuses pour le développement du bois-énergie, avec les plus grands potentiels inexploités et la plus faible dépendance aux subventions. La réduction des réserves constitue une opportunité pour mobiliser davantage de bois-énergie forestier dans les premières phases de la transition énergétique, afin de compenser les fluctuations d'approvisionnement des autres énergies renouvelables.

Future potentials of sustainable wood fuel from forests in Switzerland

A conceptual framework was developed to quantify the effects of ecological and economic constraints on the spatio-temporal availabilities of forest energy wood in Switzerland. Forest energy wood availabilities were simulated over a 40-year period for three forest management scenarios and two timber market situations and with and without subsidies for managing protection forests. Ecological and economic constraints greatly limited forest energy wood availabilities, reducing the theoretical potential equal to the annual wood production of 9–16 million m³/y or 67–118 PJ/y to about one half to one third due to ecological constraints, to one third to one fifth due to additional economic constraints (14–41 PJ/y), and to one tenth or less if subtracting current use. Compared to the current forest management approach, growing stock reduction scenarios increased available amounts of energy wood three to four times over 40 years, particularly in the short term. Favorable energy wood markets increased availabilities by 20%–25%, which subsidies increased by another 30%, particularly in the alpine regions. Under current market prices, the Central Plateau and Jura are promising regions for expanding energy wood mobilization, with greatest untapped potentials and lowest dependence on subsidies. To increase Switzerland's limited potentials, reducing growing stocks is a reasonable strategy to mobilize more wood fuel from forests during the early energy transition period to make up for possible provisioning gaps of other renewables.