

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Herausgeber: Schweizerischer Forstverein
Band: 164 (2013)
Heft: 12

Artikel: Energieholzpotenziale im Schweizer Wald
Autor: Thees, Oliver / Kaufmann, Edgar / Lemm, Renato
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097636>

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>

Energieholzpotenziale im Schweizer Wald

Oliver Thees

Edgar Kaufmann

Renato Lemm

Anton Bürgi

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)*

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)

Energy wood potential of the Swiss forest

In this article the wood energy potential of the Swiss forest is estimated on the basis of the third Swiss forest inventory (elicitations from 2004 till 2006). The estimation is based on four scenarios of usage intensity and on two wood market situations. Furthermore, the wood energy potentials are analysed by production regions, forest ownership, strength classes, tree compartments, harvesting methods and costs. The minimum technical potential in Switzerland is 3.1 million m³ of solid wood and brushwood per year (usage scenario: "as before", not very energy-wood-friendly market), the maximum is 7.3 million m³ per year (usage scenario: "75% more usage", which is associated with a significant reduction in stocks; very energy-wood-friendly market). As a rough benchmark we can assume a technical potential of 4 million m³ of solid wood and brushwood, which can be used on average without any reduction in stocks. Actually about 60% of it is currently harvested. The article shows that while additional energy wood potentials can be tapped, the energy wood can only make a small contribution to the total Swiss energy production, which is moreover relatively expensive to implement. Therefore an efficient and value-added use of the resource is especially important.

Keywords: energy wood, energy wood potentials, energy wood market, harvesting costs

doi: 10.3188/szf.2013.0351

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

Nachdem die Bedeutung der energetischen Holznutzung angesichts der Energiewende und der Programme zu ihrer Umsetzung stark gestiegen ist, ein neues Landesforstinventar (LFI) vorliegt und sich der Holzmarkt in den letzten Jahren stark verändert hat, soll eine neue Schätzung der Waldenergieholzpotenziale für die Schweiz vorgenommen werden. Ziel der Untersuchung ist es, aktuelle, nachvollziehbare und belastbare Zahlen zu den Waldenergieholzpotenzialen und ihren Nutzungsmöglichkeiten auf der Ebene des ganzen Landes zu liefern. Dazu werden auf der Grundlage des LFI3 (Brändli 2010) vier verschiedene Szenarien der Nutzungsintensität und zwei Situationen des Holzmarktes im Hinblick auf die Entwicklung der Potenziale im Zeitablauf analysiert. Zusätzlich werden die Erntekosten zur Beurteilung der Verfügbarkeit der Ressourcen grob abgeschätzt. Es geht darum, einen Überblick über die technischen und wirtschaftlichen Potenziale in der Zukunft als Grundlage für nutzungsstrategische Überlegungen zu schaffen.

Im Folgenden werden die Waldenergieholzpotenziale der Schweiz nach verschiedenen Aspekten dargestellt und analysiert: Produktionsregionen,

Eigentumskategorien, Stärkeklassen, Baumkompartimenten, Ernteverfahren und -kosten. Die Ergebnisse der Potenzialanalyse werden in der Regel für den nahe liegenden Zeitraum 2017 bis 2026, für die zwei realistischeren Nutzungsszenarien sowie für die zwei Holzmarktsituationen dargestellt. In ausgewählten Fällen werden der gesamte Analysezeitraum von 2007 bis 2106 sowie alle vier Nutzungsszenarien behandelt. Bei den Mengenangaben handelt es sich in der Regel um technische Potenziale; bei einzelnen Betrachtungen werden aber auch wirtschaftliche Potenziale ausgewiesen. Es ist zu betonen, dass die Potenziale einerseits nicht zwingend auf dem Holzmarkt verfügbar sein müssen und andererseits bereits in erheblichem Ausmass in Anspruch genommen sein können.

Daten und Methoden

Schweizerisches Landesforstinventar

Datengrundlage für die Ermittlung der Waldenergieholzpotenziale bildet das dritte Schweizerische Landesforstinventar (LFI3), für welches die Er-

hebungen in den Jahren 2004 bis 2006 erfolgten. Dieses basiert auf einem systematischen Stichprobenetz über das ganze Land, welches 5500 terrestrische Probeflächen und 42000 Luftbildprobepunkte umfasst. Die vorliegenden Betrachtungen beziehen sich auf die nach LFI zugängliche Waldfläche. Zugänglich bedeutet, dass aufgrund der topografischen Lage eine Holznutzung möglich wäre. Das sind 92% der gesamten Waldfläche ohne Gebüschwald. Aufgrund der unterschiedlichen Wuchs- und Produktionsbedingungen wurden die Berechnungen für die fünf Produktionsregionen Jura, Mittelland, Voralpen, Alpen und Alpensüdseite durchgeführt.

Waldenergieholzpotenziale

Die Schätzung des Energieholzpotenzials gilt für Schweizer Waldholz. Aufgrund des deutlich unterschiedlichen Gewichtes und Energieinhaltes sowie aufgrund von ernte- und vermarktungsspezifischen Eigenschaften wurden Nadelholz und Laubholz getrennt betrachtet. Geschätzt wurde die zur energetischen Nutzung vorgesehene oberirdische Holzbiomasse in zwei Ausprägungen. Die Potenziale werden angegeben

- 1) in Form der jährlich nutzbaren Kubikmeter (m³) Schaft- und Astderbholz (Durchmesser ≥7 cm mit Rinde [m. R.]) und Reisig (Durchmesser <7 cm [m. R.]) sowie
- 2) als jährlich nutzbare Energiemengen in Petajoule (PJ) beziehungsweise in Gigawattstunden (GWh). Diese Angaben beinhalten neben dem Derbholz und dem Reisig auch die Nadeln und Blätter.

Mithilfe der Nutzungsszenarien, Holzmarktvarianten und Erntekostenschätzungen wird versucht, einerseits mögliche Obergrenzen der Potenziale auszuloten und andererseits eine Vorstellung von den wahrscheinlich realisierbaren Potenzialen zu entwickeln. Je nach Betrachtung handelt es sich um technische oder wirtschaftliche Potenziale. Von diesen Potenzialen sind die Ernteverluste und die Flächenrestriktionen nicht in Abzug gebracht. Die Ernteverluste beim Derbholz, welches energetisch genutzt wird, sind als gering anzunehmen (5–15%); die Ernteverluste in Form von Reisig sowie Nadeln/Blättern bei der Nutzung von Vollbäumen sind dagegen deutlich höher anzunehmen (30–50%). Diese Praxisangaben aus der Schweiz liegen im Bereich der in Wittkopf (2005) zitierten einschlägigen Untersuchungen. Waldreservate, in denen die Nutzung untersagt ist, nehmen derzeit etwa 2.5% der Waldfläche ein (Bolliger et al 2012); sie sind im Zunehmen begriffen.

Grundsätzlich sagen alle Mengenangaben nichts über deren tatsächliche Verfügbarkeit auf dem Holzmarkt aus.

Definition des Waldenergieholzes und der Holzmarktvarianten

Am Anfang der Herleitung des Potenzials steht die Frage, welche Holzsortimente sich als Energieholz eignen. Das für die energetische Nutzung infrage kommende Waldholz ergibt sich aus dem Vergleich der Wettbewerbspreise für die verschiedenen Verwendungen, vor allem:

- Energieerzeugung (Stückholz als Brennholz, Hackschnitzel für Holzheizsysteme etc.)
- Holzwerkstoffindustrie (Spanplatte, Faserplatte, OSB etc.)
- Zellstoffindustrie
- Verpackungsindustrie (Kisten, Paletten etc.)
- Schwellen

Der Vergleich ermöglicht eine erste Einschätzung bezüglich der Frage, ob Energieholz ein wettbewerbsfähiges Produkt sein kann.

Die Definition des Holzes, welches sich für die energetische Verwendung eignet, ist die Voraussetzung für eine Abfrage im Rahmen des LFI. Bei der Definition geht es in der Hauptsache darum, den Anteil des Holzes zu schätzen, welcher prinzipiell als Energieholz unter bestimmten Marktbedingungen maximal nutzbar ist. Dabei wurde zwischen Laub- und Nadelholz, verschiedenen Bestandteilen des Baumes, den Baumkompartimenten Schaft, Äste, Reisig, Nadeln und Blätter sowie den Stärkeklassen unterschieden. Zu beachten ist, dass das LFI keine Informationen bezüglich der Qualität des Holzes beinhaltet. Zusätzlich wurden die Einschätzungen der energieholztauglichen Anteile bei zwei unterschiedlichen Marktsituationen beziehungsweise Intensitäten der Energieholznutzung vorgenommen, nämlich bei einem

Baumkompartimente	Stärkeklasse	Energieholzanteil (%) nach Holzmarktsituation			
		Nadelholz		Laubholz	
		Variante 1 (Min)	Variante 2 (Max)	Variante 1 (Min)	Variante 2 (Max)
Schaftderbholz Ø >7 cm in Rinde, Sortimentslänge* erreichbar	0	100	100	100	100
	1a	80	100	100	100
	1b	20	40	100	100
	2a	10	30	50	90
	2b	10	20	40	80
	3a	10	20	40	80
	3b	20	40	40	80
	4	20	40	40	80
	5	20	40	50	80
6	20	50	50	80	
Astderbholz sowie restliches Derbholz Ø >7 cm in Rinde, keine Sortimentslänge* möglich	0–6	100			
Reisig		100			
Nadeln/Blätter/		100			

Tab 1 Definition des Waldenergieholzes bei den zwei Holzmarktsituationen (Variante 1: weniger energieholzfreundlich, Variante 2: ausgesprochen energieholzfreundlich).

* Unterstellt wird die Aushaltung der Längensklasse L1 (d.h. Kurzholz, Trämel, Mindestlänge Nadel- und Laubrundholz = 3.0 m).

Szenario	Nutzung	Bemerkungen
A: Nutzung wie bisher	2017–2106: Jahresnutzung 100%: ca. 6.1 Mio. m ³ /Jahr	Basisszenario, entspricht den Jahresnutzungen gemäss LFI3 (1997–2006) und LFI4a (2009–2011). Der Vorrat nimmt vom Jahr 2006 (360 m ³ /ha) bis ins Jahr 2106 (490 m ³ /ha) kontinuierlich zu. Überalterungen und grosse Bestandesdichten führen hier zu einer erhöhten Mortalität.
B: Mehrnutzung 25%	2017–2106: Jahresnutzung 125%: ca. 7.5 Mio. m ³ /Jahr	Der Vorrat bleibt bis ins Jahr 2106 nahezu konstant (Jahr 2106: 371 m ³ /ha). Dieses Szenario erscheint unter den aktuellen Bedingungen umsetzbar und realistisch.
C: Mehrnutzung 50%	2017–2106: Jahresnutzung 150%: ca. 9.0 Mio. m ³ /Jahr	Nach einem Anstieg auf 376 m ³ /ha bis ins Jahr 2016 sinkt der Vorrat danach bis ins Jahr 2076 auf ein ertragskundlich günstiges Niveau von 300 m ³ /ha ab. Danach nimmt er bis ins Jahr 2106 auf einen ertragskundlich zu tiefen Wert von 235 m ³ /ha ab.
D: zeitweise Mehrnutzung 75%	2017–2026: Jahresnutzung 175%: ca. 10.5 Mio. m ³ /Jahr 2027–2106: kontinuierliche Abnahme der Jahresnutzung auf 7.7 Mio. m ³ /Jahr	Eine Ernte von 10.5 Mio. m ³ /Jahr führt rasch zu sehr tiefen Vorräten, die längerfristig aus ertragskundlicher Sicht als nachteilig zu werten sind. Um den Vorrat nicht soweit abzusinken, dass der Wald substanziell geschädigt wird, wurde der Hektarvorrat im Modell auf minimal 200 m ³ /ha im Jahr 2106 begrenzt. Dementsprechend nimmt die Nutzungsmenge im Modell ab dem Jahr 2027 kontinuierlich ab.

Tab 2 Charakterisierung der Szenarien der Nutzungsintensität. Die Jahresnutzung beträgt in der Periode 2007–2016 in allen Nutzungsszenarien 100% respektive 6.1 Mio. m³/Jahr.

- weniger energieholzfreundlichen Holzmarkt («Stammholzmarkt»; Variante 1) und einem
- ausgesprochen energieholzfreundlichen Holzmarkt («Energieholzmarkt»; Variante 2).

Bei der ausgesprochen energieholzfreundlichen Holzmarktsituation (Variante 2) würde im Falle von Laubholz praktisch sämtliches Holz der Güteklasse D und ein Grossteil der Güteklasse C der energetischen Nutzung zugeführt. Zu allen Abgrenzungen wurden Stellungnahmen von Waldwirtschaft Schweiz, Holzenergie Schweiz und dem Verband Schweizerischer Forstunternehmungen eingeholt. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 1.

Nutzungsszenarien

Die waldbaulichen Eingriffe im Modell beruhen auf klar definierten und ertragskundlich begründeten Kriterien. Datengrundlage sind die LFI3-Daten. Ausgangslage für Verjüngungshiebe bilden angenommene Umtriebszeiten. Diese betragen bei den Nadelholzbeständen auf sehr guten Standorten 90 Jahre, auf guten und mittleren Standorten 110 bis 130 Jahre. Bei den Laubholzbeständen sind sie jeweils circa 20 Jahre länger. Auf schlechteren Standorten, v.a. in Hochlagen, betragen die Umtriebszeiten rund 180 Jahre. Mit den unterschiedlichen Holzernntemengen in den einzelnen Szenarien verändern sich die jährlichen Schlagflächen und damit die Umtriebszeiten. Die Nadelholzanteile in den Verjüngungen entsprechen denjenigen des LFI3. Die Auswahl der zu entnehmenden Bäume in den Durchforstungen wurde so gut wie möglich den Auslesedurchforstungen angenähert, wie sie in der Schweiz praktiziert werden (Kaufmann 2001a). Näheres zum Berechnungsmodell findet sich in Kaufmann (2011).

Für die vorliegende Arbeit wurden vier Nutzungsszenarien (A–D) definiert, die sich lediglich hinsichtlich der Holzernntemengen (Derbholz) unterscheiden. Im Szenario A (Basisszenario) wird gleich viel Holz genutzt wie in den Jahren 1997 bis 2006 (LFI2–LFI3; diese Nutzungszahlen unterscheiden sich nur unwesentlich von den bisher vorliegenden LFI4a-Daten für die Zeitspanne 2009–2011). In den Szenarien B bis D werden die Holzernntemengen prozentual zum Szenario A erhöht. Aufgrund der Definition von Wahrscheinlichkeiten für die Entnahme von Bäumen und für das Eintreten und das Ausmass von Sturmereignissen können die resultierenden Holzernntemengen jeweils um ca. +/-0.3 Mio. m³/Jahr von den Vorgaben abweichen. In den Szenarien wurden die Erntemengen an verwertbarem Derbholz als Zielgrösse für die gesamte Schweiz gemäss Tabelle 2 vorgegeben.

Entwicklung von Vorrat, Zuwachs und Abgang in den Nutzungsszenarien

Die Abbildung 1 zeigt für die der Untersuchung zugrunde gelegten Szenarien, wie sich Vorrat, Zuwachs und Abgang (Summe von Nutzung und Mortalität) im betrachteten Zeitraum entwickeln. Bei den Szenarien A und B nehmen die Vorräte zunächst auf rund 500 respektive 400 m³/ha zu, um dann auf hohem Niveau zu verbleiben (Szenario A) oder wieder auf den Ausgangszustand zurückzugehen (Szenario B). Bei den Szenarien C und D sinken die Vorräte von Beginn an und erreichen am Ende der Periode ein Niveau von 235 respektive 200 m³/ha.

Der Vergleich zeigt, dass beim Szenario A der Zuwachs fast während der gesamten Periode den Abgang (Nutzung und Mortalität) übersteigt. Dies gilt auch für die erste Hälfte der Betrachtungsperiode

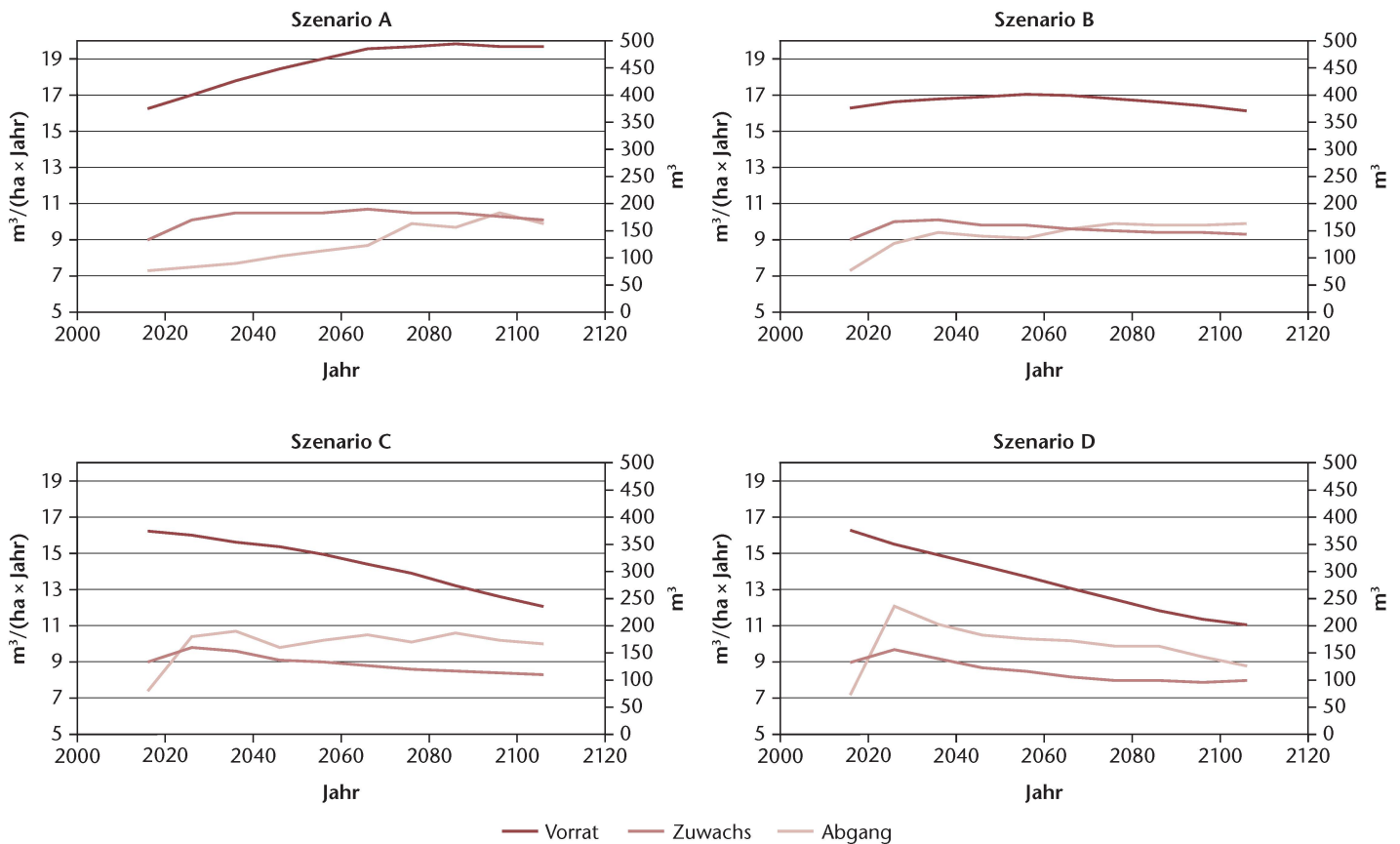


Abb 1 Entwicklung des Vorrats (Schaftholz in Rinde; m^3), des Zuwachses ($m^3/[ha \times Jahr]$) und des Abgangs (Nutzung und Mortalität; $m^3/[ha \times Jahr]$) in der Schweiz für die vier Nutzungsszenarien A: Nutzung wie bisher, B: Mehrnutzung 25%, C: Mehrnutzung 50% und D: zeitweise Mehrnutzung 75%.

beim Szenario B; danach ist der Abgang höher als der Zuwachs (weniger als $1 m^3/ha$ und Jahr). Bei den Szenarien C und D hingegen ist der Abgang stets deutlich höher als der Zuwachs, d.h., es findet eindeutig ein Vorratsabbau statt.

Im Mittelland zeigen die ertragskundlichen Kennziffern eine vom Schweizer Durchschnitt abweichende Entwicklung (Abbildung 2). Im Gegensatz zur Betrachtung auf der Ebene Schweiz findet hier bereits beim Szenario A ein Vorratsabbau statt.

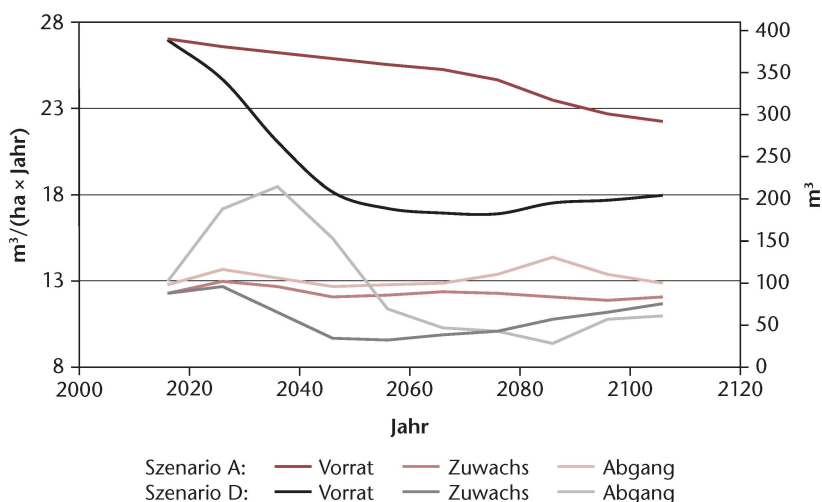


Abb 2 Entwicklung des Vorrats (Schaftholz in Rinde; m^3), des Zuwachses ($m^3/[ha \times Jahr]$) und des Abgangs (Nutzung und Mortalität; $m^3/[ha \times Jahr]$) im Schweizer Mittelland für die zwei Nutzungsszenarien A: Nutzung wie bisher und D: zeitweise Mehrnutzung 75%.

Der Abgang liegt bei diesem Szenario während der gesamten Periode gleichmässig leicht über dem Zuwachs. Beim Szenario D hingegen übersteigt der Abgang den Zuwachs zu Beginn der Periode sehr deutlich, womit der Vorrat zwischenzeitlich gar unter $200 m^3/ha$ fällt. Folglich sind im Mittelland Mehrnutzungen von Waldenergieholz weitgehend ausgeschlossen und auf Sortimentsverschiebungen bei der Aushaltung beschränkt. Diese Ergebnisse erklären sich dadurch, dass für das Szenario A (Basisszenario) das Verhalten in der Vergangenheit, konkret dasjenige der Periode 1997 bis 2006 (LFI3), zugrunde gelegt wird. Damit wird eine für das Mittelland ungewöhnliche Periode der Übernutzung bedingt durch den Sturm Lothar fortgeschrieben. Hinzu kommt die hierdurch veranlasste Einschlagszurückhaltung in anderen Landesteilen.

Analysezeitraum

Es wurden Berechnungen für den Zeitraum von 2007 bis 2106 durchgeführt und Resultate für 10-Jahres-Perioden ausgewiesen. Das Berechnungsmodell ermöglicht relativ zuverlässige Vorhersagen der Entwicklungen des Vorrates, des Zuwachses und des Abgangs für die ersten 20 Jahre. Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse nimmt mit zunehmendem Simulationszeitraum ab, da sich unsichere Modellannahmen fortpflanzen. Gleichwohl wurde mit einem Simulationszeitraum von 50 und 100 Jahren gerech-

net. Wir wollten wissen, wie sich der Wald bis in 50 Jahren voraussichtlich entwickeln würde, wenn die Nutzungsszenarien konsequent eingehalten würden. Die Resultate in 100 Jahren dienen vor allem der Überprüfung der Nachhaltigkeit der Szenarien. Die Vorratsäufnung bis 490 m³/ha im Jahr 2106 im Szenario A führt beispielsweise zu einer merklichen Zunahme der natürlichen Mortalität. Wenn man die Nutzung stark erhöht, die Hektarvorräte aber nicht unter 200 m³/ha absenkt (Szenario D), kann man gesamtschweizerisch etwa zehn Jahre lang (2017 bis 2026) 10.5 Mio. m³ Derbholz pro Jahr nutzen. Danach muss die Nutzung aber kontinuierlich reduziert werden. Im Szenario C führt eine konstante Nutzung von 9.5 Mio. m³ Derbholz pro Jahr erst nach 60 bis 70 Jahren zu Hektarvorräten, die ertragskundlich gesehen zu tief sind. Die Szenarien C und D sind somit aus rein ertragskundlicher Sicht nicht nachhaltig.

Berechnung der Energiemengen

Die Umrechnung von Holzmengen in Petajoule basiert auf folgenden Grössen:

$$HPJ = Hm^3 \times \rho_0 \times \text{Energieinhalt} \times 3600000 \quad (1)$$

Wobei:

HPJ: Energieinhalt der Holzmenge in PJ
1 PJ = 10¹⁵ J = 277.8 GWh

Hm³: Holzmenge waldfrisch in m³

ρ_0 : Raumdichte verschiedener Baumarten bei Holzfeuchte 0% (atro) nach Assmann (1961) in kg/m³
Fichte 390, Buche 560 kg atro pro m³ waldfrisches Holz

Energieinhalt: verschiedener Baumarten in kWh/kg atro (Schweizer 2012)

3 600 000: Umrechnungsfaktor (kWh in J) in J/kWh

Der Energieinhalt von Holz wird oft durch den unteren Heizwert in Kilowattstunden (kWh) dargestellt. Er gibt die Wärmemenge an, die bei einer vollständigen Verbrennung abgegeben wird. Nicht berücksichtigt wird hierbei die Energiemenge, die für die Verdampfung des im Holz vorhandenen Wassers aufgewendet werden muss und nicht zur Wärmeerzeugung zur Verfügung steht. Der Heizwert ist daher umso geringer, je höher der Wassergehalt des Holzes ist.

Holzfeuchte 0% = absolut trockenes Holz (atro Gewicht). Bei unseren Betrachtungen wird die mittlere Raumdichte in Masse (kg) absolut trockenen Holzes pro Volumen (m³) waldfrischen Holzes angegeben.

Baumkompartimente

Die hier zur Nutzung vorgesehene oberirdische Biomasse setzt sich zusammen aus den Baumkompartimenten Derbholz (Schaft- und Astderbholz), Reisig sowie Nadeln und Blätter (Tabelle 1). Die Volumina und Massen der einzelnen Baumkomparti-

mente wurden mit allometrischen Einzelbaumfunktionen ermittelt (Astderbholz und Reisigvolumina: Kaufmann 2001b; Nadel-/Blattmassen: Perruchoud et al 1999). Während das Schaft- und Astderbholz sowie das Reisig als Volumina berechnet wurden, liegen die Angaben zu Nadeln und Blättern nur auf der Basis von Massen vor.

Ermittlung der Bereitstellungskosten

Zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verfügbarkeit der Holzpotenziale werden die Bereitstellungskosten für Waldhackschnitzel ermittelt. Kalkuliert wurden Ernte-, Hack- und Transportkosten.

Die Erntekosten basieren auf Kalkulationen im Rahmen des LFI3, die mit dem Holzernteproduktivitätsmodell HeProMo (Frutig et al 2009) für jeden Stichprobenpunkt durchgeführt wurden. Die so mit Erntekosten bewerteten Nadel- und Laubholzmen-gen wurden folgenden Holzernteaufwandsklassen zugeordnet (in CHF/m³): bis 50, 51–100, 101–150, über 150.

Die Kosten für das Hacken und für den Transport basieren auf Praxisangaben. Nach Angaben von Forstunternehmern ist bezogen auf den Schüttraum-meter (Srm) mit Kosten von ungefähr 9 bis 13 CHF (im Mittel 11 CHF) für das Hacken und 5 bis 10 CHF (im Mittel 7 CHF) für den Transport frei Verbrennungsstelle zu rechnen. Dies entspricht im Mittel 18 CHF pro Srm oder etwa 45 CHF pro m³ (Umrechnungsfaktor 2.5) für Hacken und Transportieren. Diese Kosten wurden den Erntekosten zugeschlagen, und entsprechend den oben aufgeführten Holzernteaufwandsklassen wurden neue Bereitstellungskostenklassen für das Waldenergieholz pro Kilowattstunde, getrennt nach Nadel- und Laubholz, gebildet. Für diese Berechnung wurde für Nadelholz (Fichte/Tanne) von 4.41 kWh/kg lutro und für Laubholz (Buche) von 4.00 kWh/kg lutro ausgegangen (Schweizer 2012).

Genauigkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus den Szenarien sind mit Unsicherheiten behaftet. Die statistischen Schätzfehler der betrachteten Grössen enthalten die Modellfehler der Tarifvolumen und der Wachstumsfunktionen (bzw. deren Reststreuungen), die Stichprobenfehler und die Streuung der Resultate, welche zwischen mehreren Wiederholungen einer Szenarioberechnung auftreten und mit zunehmendem Simulationszeitraum grösser werden. Die jeweiligen Schätzfehler werden nur in Tabelle 3 ausgewiesen.

Ergebnisse

Produktionsregionen

Die Tabellen 3 und 4 zeigen die nutzbaren Waldenergieholzpotenziale in den fünf Produktionsregionen und in der ganzen Schweiz für den Zeit-

Sze- na- rio	Arten- gruppe	Jura				Mittelland				Voralpen				Alpen				Alpensüdseite				Schweiz			
		Variante 1		Variante 2		Variante 1		Variante 2		Variante 1		Variante 2		Variante 1		Variante 2		Variante 1		Variante 2		Variante 1		Variante 2	
		Tausend m ³ /Jahr	SE	Tausend m ³ /Jahr	SE	Tausend m ³ /Jahr	SE	Tausend m ³ /Jahr	SE	Tausend m ³ /Jahr	SE	Tausend m ³ /Jahr	SE	Tausend m ³ /Jahr	SE	Tausend m ³ /Jahr	SE	Tausend m ³ /Jahr	SE	Tausend m ³ /Jahr	SE	Tausend m ³ /Jahr	SE	Tausend m ³ /Jahr	SE
A	Nadelholz	230	12	330	12	711	7	1024	7	487	10	698	10	306	41	448	42	51	77	76	77	1812	7	2616	7
	Laubholz	256	9	353	10	731	8	935	8	165	14	227	14	80	24	109	25	68	59	94	60	1317	5	1742	5
	Total	486	8	683	8	1442	6	1960	6	652	8	924	8	385	37	557	37	118	66	170	67	3128	5	4357	5
B	Nadelholz	231	10	332	10	689	6	993	6	549	8	788	8	566	9	826	9	109	16	161	16	2168	5	3135	5
	Laubholz	247	8	341	8	698	8	892	8	179	12	246	12	133	21	183	21	234	15	331	14	1492	6	1994	6
	Total	478	6	673	7	1387	5	1886	5	729	7	1035	7	698	11	1008	11	342	13	492	12	3660	4	5129	4
C	Nadelholz	308	15	446	15	791	6	1142	6	689	7	993	7	689	8	1007	8	126	13	187	13	2633	4	3819	4
	Laubholz	327	10	452	10	806	7	1033	7	217	14	298	14	160	11	218	11	265	11	376	11	1779	5	2380	5
	Total	634	11	897	11	1598	5	2175	5	905	6	1291	6	849	7	1226	7	391	9	562	8	4411	4	6198	4
D	Nadelholz	372	7	540	8	872	5	1260	5	814	6	1176	6	842	7	1236	7	151	14	225	14	3087	4	4488	4
	Laubholz	373	7	517	8	926	8	1189	8	295	10	406	10	190	15	262	14	304	10	432	9	2094	5	2809	4
	Total	744	5	1055	6	1800	5	2451	5	1110	6	1583	6	1032	7	1497	7	454	7	656	7	5180	3	7297	3

Tab 3 Waldenergieholzpotenziale (Derbholz und Reisig mit Rinde) nach Produktionsregionen im Zeitraum 2017 bis 2026 bei den vier Nutzungsszenarien (A: Nutzung wie bisher, B: Mehrnutzung 25%, C: Mehrnutzung 50%, D: zeitweise Mehrnutzung 75%) und den zwei Marktsituationen (Variante 1: weniger energieholzfremdlich, Variante 2: ausgesprochen energieholzfremdlich). SE: Schätzfehler in %.

raum 2017 bis 2026. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Potenziale sämtliches Derbholz und das Reisig beinhalten, nicht aber die Nadeln und die Blätter.

Das jährlich je nach Marktsituation nutzbare Waldenergieholzpotenzial der Schweiz beträgt minimal 3.1 beziehungsweise 4.4 Mio. m³ beim Szenario A («Wie bisher») und maximal 5.2 respektive 7.3 Mio. m³ beim Szenario D (zeitweise Mehrnutzung 75%). Dabei scheint Szenario B (Mehrnutzung 25%) durchaus realistisch zu sein; es würde zu einer Steigerung der Schweizer Holznutzung gegenüber dem Status quo auf 7 bis 8 Mio. m³ führen. Hier ergibt sich ein Waldenergieholzpotenzial von 3.7 Mio. m³ bei einem weniger energieholzfremdlichen Holzmarkt beziehungsweise von 5.1 Mio. m³ bei einem energieholzfremdlichen Holzmarkt. Als grobe Richtgrösse kann von einem Waldenergieholzpotenzial von 4.0 Mio. m³ Derbholz und Reisig für die Schweiz ausgegangen werden. Wenn man einen Vorratsabbau aus übergeordneten Gründen für angezeigt hält, kann man sagen, dass diese Potenzialgrössenordnung auch auf diesem Weg (Szenario C) auch bei weniger energieholzfremdlichem Holzmarkt zu erreichen ist. Der Anteil des Nadelholzes beläuft sich in allen Fällen auf circa 60%.

Der Übergang von einem weniger energieholzfremdlichen zu einem ausgesprochen energieholzfremdlichen Holzmarkt führt zu beträchtlichen Potenzialsteigerungen, welche diejenigen übertreffen, welche sich beim Übergang von einem Nutzungsszenario zum nächstintensiveren ergeben. Die marktbedingten Potenzialsteigerungen betragen jeweils rund 40% gegenüber der Ausgangssituation der

Variante 1 und bewegen sich mengenmässig zwischen 1.2 und 2.1 Mio. m³. Die nutzungsstrategisch bedingten Potenzialsteigerungen von einem Szenario zum nächsthöheren betragen dagegen jeweils etwa 20% und bewegen sich mengenmässig zwischen 0.5 und 1.1 Mio. m³.

Das grösste Waldenergieholzpotenzial befindet sich im Mittelland: Je nach Marktlage befindet sich hier die Hälfte oder ein Drittel des gesamten Energieholzpotenzials. Die Potenziale liegen bei weniger energieholzfremdlicher Marktlage zwischen 1.4 und 1.8 Mio. m³ und bei ausgesprochen energieholzfremdlicher Marktlage zwischen 2.0 und 2.5 Mio. m³. Die Anteile von Nadel- und Laubholz sind immer annähernd gleich gross. Die bezüglich der Waldenergieholzpotenziale nächstwichtigsten Produktionsregionen sind Voralpen und Alpen.

Bezüglich möglicher Mehrnutzungen stellt das Mittelland allerdings das Schlusslicht dar – dies zusammen mit dem Jura und dicht gefolgt von den Voralpen: Mehrnutzungen (von maximal 30 bzw. 50 bzw. 70%) sind hier nur in den mit einem Vorratsabbau verbundenen Szenarien C und D möglich. Beträchtliche Mehrnutzungen sind dagegen in den Alpen und auf der Alpensüdseite möglich; bereits bei einem Übergang von Szenario A zu B ergibt sich eine Verdoppelung beziehungsweise eine Verdreifachung der Potenziale.

Abbildung 3 zeigt, wie sich die Waldenergieholzpotenziale aller vier Szenarien über den gesamten betrachteten Zeitraum entwickeln. Die Nadelholzpotenziale nehmen ab und die Laubholzpotenziale zu.

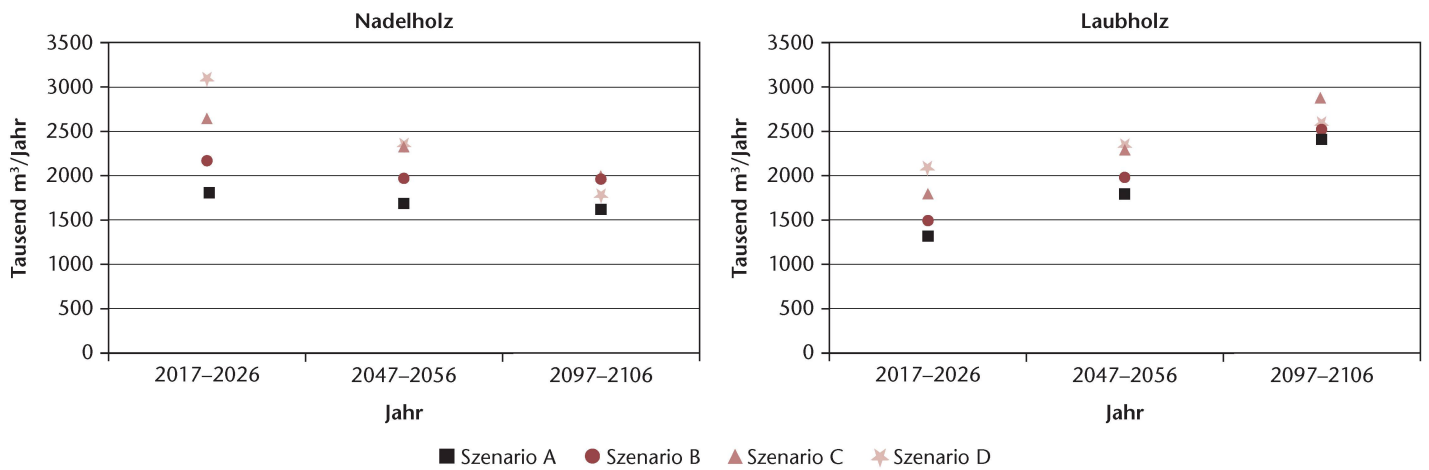


Abb 3 Langfristige Entwicklung der Waldenergieholzpotenziale (Derbholz und Reisig mit Rinde) für Nadel- und Laubholz bei den vier Nutzungsszenarien (A: Nutzung wie bisher, B: Mehrnutzung 25%, C: Mehrnutzung 50%, D: zeitweise Mehrnutzung 75%) und der weniger energieholzfreundlichen Marktsituation (Variante 1).

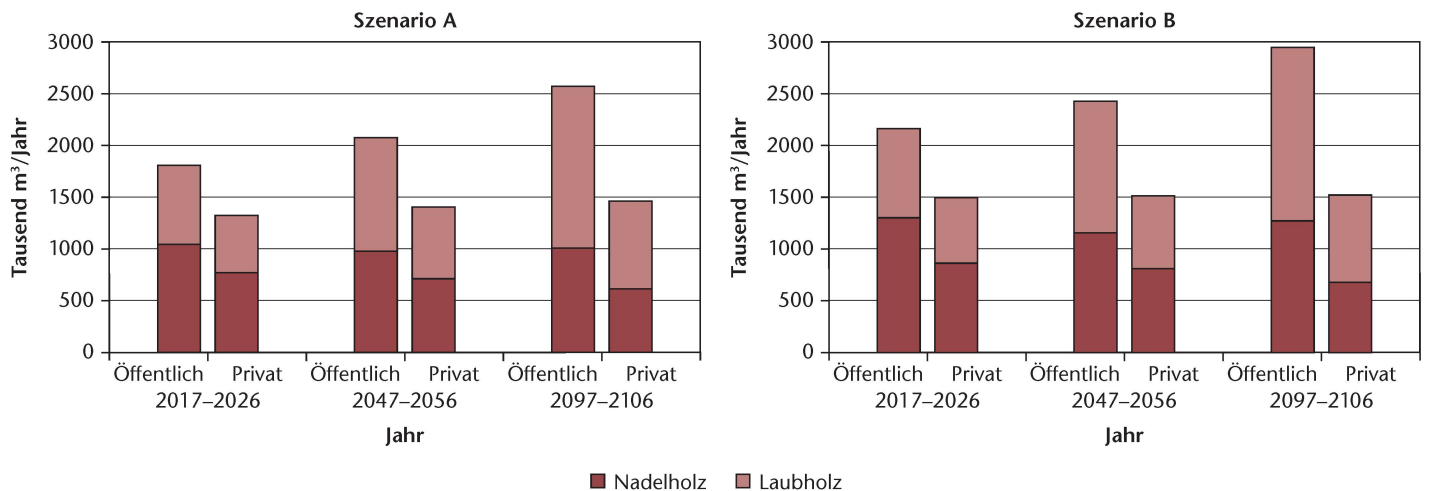


Abb 4 Waldenergieholzpotenziale (Derbholz und Reisig mit Rinde) im öffentlichen und privaten Wald zu verschiedenen Zeitpunkten bei den Nutzungsszenarien A: Nutzung wie bisher (links) und B: Mehrnutzung 25% (rechts) sowie der weniger energieholzfreundlichen Marktsituation (Variante 1).

Waldeigentum

Der öffentliche Wald verfügt im Zeitraum 2017 bis 2026 bei der weniger energieholzfreundlichen Holzmarktsituation (Variante 1) bei den Szenarien A und B über einen Anteil am Energieholzpotenzial von rund 58% (Abbildung 4). Längerfristig, d.h. für den Zeitraum 2017 bis 2106, nimmt dieser Anteil auf 64% zu. Entsprechend betragen die Potenzialanteile im Privatwald 42 beziehungsweise 36%. Im Vergleich zu seinem flächenmässigen Anteil von 25% ist das Energieholzpotenzial im Privatwald – wie zu erwarten war – überproportional gross. Hier ist im Vergleich zum öffentlichen Wald von einer erschwerten Verfügbarkeit der Potenziale – zumindest für Dritte – auszugehen. Die mögliche Mehrnutzung gemäss Szenario B ist gegenüber Szenario A im öffentlichen Wald (19%) etwas grösser als im Privatwald mit (13%).

Abbildung 4 zeigt, dass in den Szenarien A und B im öffentlichen Wald die Energiepotenziale im Laubholz mit zunehmender Prognosedauer deut-

lich zunehmen. Im Privatwald fällt diese Zunahme geringer aus. Die Nadelenergieholzpotenziale zeigen ein anderes Bild: Im öffentlichen Wald ist mit zunehmender Prognosedauer ein leichter und im Privatwald ein deutlicher Rückgang zu verzeichnen.

Stärkeklassen

Abbildung 5 gibt Aufschluss über die zu erwartenden Dimensionen des Waldenergie-Derbholzes. Definitionsgemäss ist das Reisig in diesen stärkeklassebezogenen Angaben nicht enthalten. Die Verteilung korrespondiert mit der zugrunde gelegten Definition des Waldenergieholzes (Tabelle 1). Waldenergieholzpotenziale finden sich im Zeitraum 2017 bis 2026 sowohl beim Nadel- als auch beim Laubholz vor allem im Schwachholz und im Starkholz. Die grössten Potenziale sind beim Nadelholz unter «nicht klassiert» sowie in der Stärkeklasse 1a, aber auch in den Stärkeklassen 4 bis 6 angesiedelt. Beim Laubholz stellt das Sortiment «nicht klassiert» mit

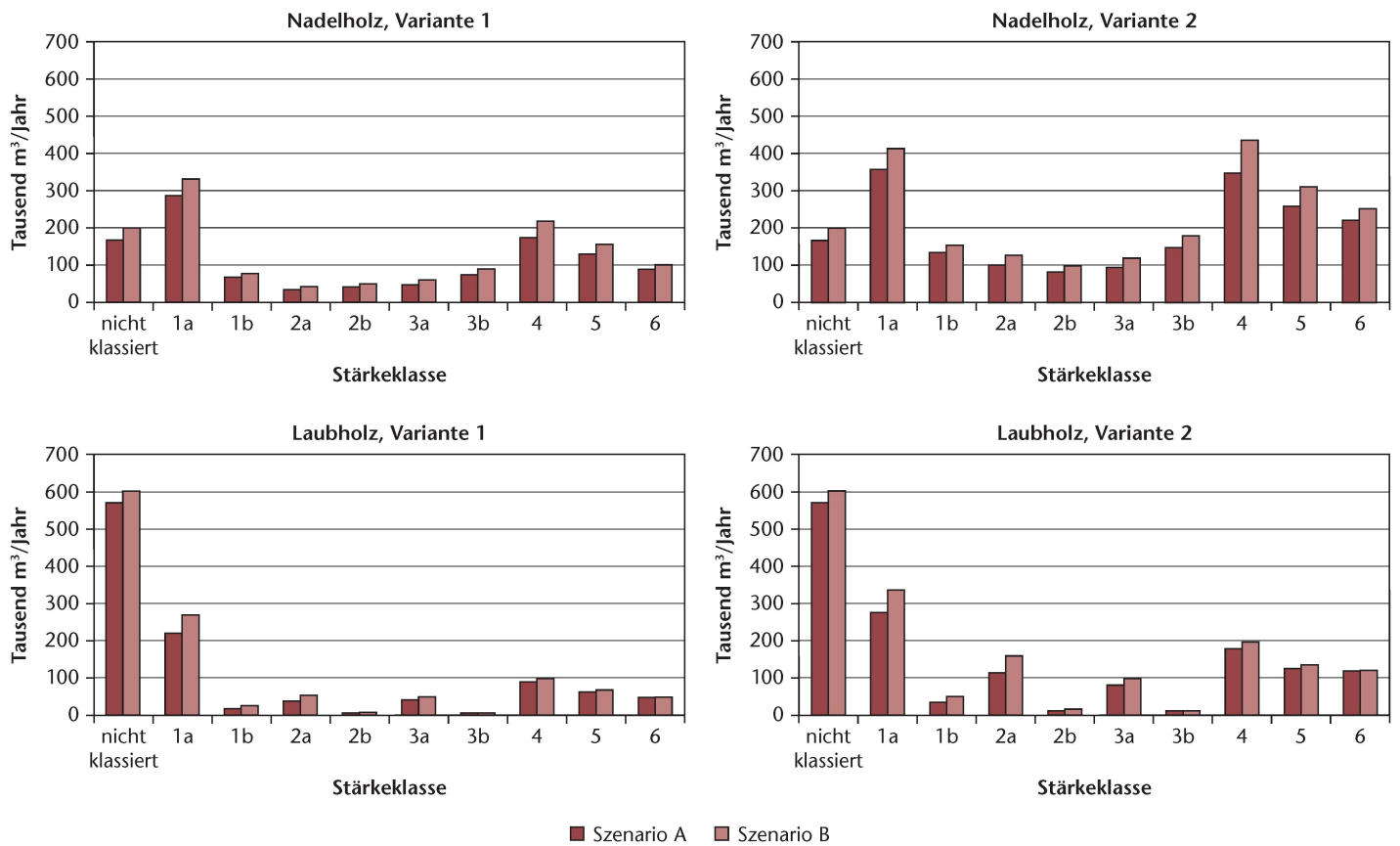


Abb 5 Waldenergieholzpotenziale (Derbholz mit Rinde) nach Stärkeklassen für Nadel- und Laubholz bei den Nutzungsszenarien A (Nutzung wie bisher) und B (Mehrnutzung 25%) sowie den zwei Marktsituationen (Variante 1: weniger energieholzfreundlich; 2: ausgesprochen energieholzfreundlich) in der Periode 2017 bis 2026.

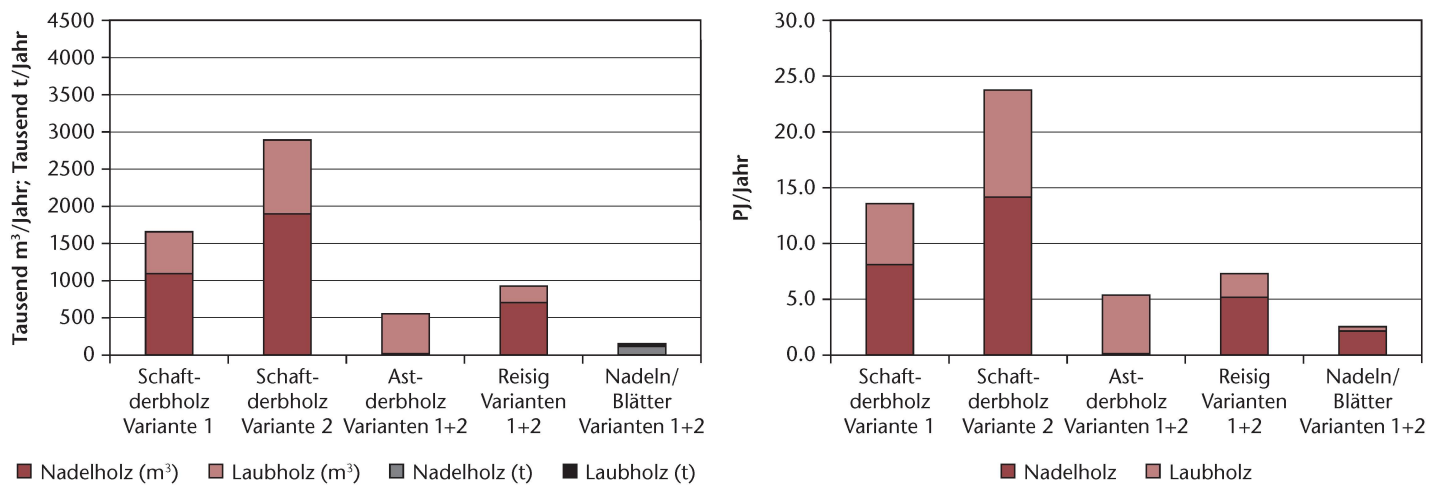


Abb 6 Energieholzpotenziale (Derbholz und Reisig mit Rinde sowie Nadeln/Blätter) nach Holzmenge (links) und Energiemenge (rechts), aufgeschlüsselt nach Baumkompartimenten, für die Periode 2017 bis 2026. Zugrunde gelegt sind das Nutzungsszenario A (Nutzung wie bisher) und die beiden Marktsituationen (Variante 1: weniger energieholzfreundlich, Variante 2: ausgesprochen energieholzfreundlich).

Abstand das grösste Potenzial dar. Es beinhaltet dasjenige Derbholz (≥ 7 cm mit Rinde), welches die Mindestsortimentslänge nicht erreicht, und das Astderbholz (restliches Derbholz). Beim Nadelholz fällt dessen Anteil deutlich geringer aus. Dagegen fallen hier die hohen Potenziale in der Stärkeklasse 1a und im starken Holz in der energieholzfreundlichen Marktsituation auf.

Baumkompartimente

Abbildung 6 zeigt die zu erwartenden Holz- und Energiemengen für die energetische Nutzung, wie sie sich nach Baumkompartimenten zusammensetzen. Gegenüber den bisherigen Darstellungen ist nun der gesamte oberirdische Teil des Baums inklusive der Nadeln und Blätter erfasst. Astderbholz gibt es fast nur beim Laubholz; die Menge entspricht im

Szenario A sogar der des Schaftderbholzes. Astderbholz, Reisig sowie Nadeln und Blätter sind in beiden Holzmarktvarianten gleich, weil sich die Marktsituation nur auf die Aushaltung des Schaftderbholzes auswirkt.

Bei einer weniger energieholzfreundlichen Marktsituation (Variante 1) ergeben sich bei Szenario A Waldenergieholzpotenziale mit einem Energieinhalt von insgesamt 28.4 PJ (7889 GWh), beim Szenario B von 33.4 PJ (9278 GWh) pro Jahr. Bei einer energieholzfreundlichen Marktsituation (Variante 2) nehmen die Potenziale um 36% zu, beim Szenario A ergeben sich 38.5 PJ (10694 GWh) und beim Szenario B (nicht dargestellt) sogar 45.4 PJ (12611 GWh) pro Jahr. Der Anteil des Schaftderbholzes an der Gesamtenergiemenge beläuft sich in beiden Szenarien bei weniger energieholzfreundlichem Holzmarkt auf 48% und bei energieholzfreundlichem Markt auf 61%, der des Astderbholzes beträgt entsprechend 18% beziehungsweise 13% und der des Reisigs 26% beziehungsweise 19%. Das Reisig stellt mit 7.2 PJ (2000 GWh) beziehungsweise 8.7 PJ (2417 GWh) ein relevantes Potenzial dar. Dabei entfallen in beiden Fällen 71% auf das Nadelholz. Nadeln und Blätter haben einen Anteil von 9% beziehungsweise 7% an der Energiemenge, was 2.5 PJ (694 GWh, Szenario A) respektive 3.1 PJ (861 GWh, Szenario B) entspricht. Dabei entfallen in beiden Fällen 84% auf die Nadeln.

Bezüglich des Volumens zeigt sich folgendes Bild: Das Volumen des Schaftderbholzes beläuft sich unter Szenario A (Abbildung 6 links) für den weniger energieholzfreundlichen Holzmarkt auf 1.65 Mio. m³, für den energieholzfreundlichen Markt auf 2.88 Mio. m³; der des Astderbholzes kommt auf 0.55 Mio. m³, der des Reisigs auf 0.92 Mio. m³, und die Nadeln/Blätter kommen auf 136000 Tonnen.

Beim Szenario B (nicht abgebildet) beläuft sich das Volumen des Schaftderbholzes bei we-

niger energieholzfreundlichem Holzmarkt auf 1.95 Mio. m³ und bei energieholzfreundlichem Markt auf 3.42 Mio. m³; das Astderbholz umfasst ein Volumen von 0.60 Mio. m³ und das Reisig ein solches von 1.11 Mio. m³. Die Nadeln und Blätter haben eine Masse von 167000 Tonnen.

Befahrbarkeit des Geländes

Zur erntetechnischen Charakterisierung der Waldenergieholzpotenziale, zum Beispiel im Hinblick auf die Vollbaumnutzung, ist es aufschlussreich, zu wissen, wie sich diese auf das befahrbare und das nicht befahrbare Gelände verteilen (Abbildung 7). Bezogen auf die Holzmenge lässt sich im Fall des weniger energieholzfreundlichen Holzmarktes (Variante 1) feststellen, dass sich beim Szenario A (Szenario B) im befahrbaren Gelände die jährlichen Potenziale auf 1.8 Mio. m³ (2.3 Mio. m³) und im nicht befahrbaren Gelände in beiden Fällen auf 1.4 Mio. m³ Derbholz und Reisig belaufen. Im befahrbaren Gelände erbringt die Nutzungssteigerung gemäss Szenario B zusätzliche Waldenergiepotenziale vor allem im Nadelholz; im nicht befahrbaren Gelände gibt es keine nennenswerten Unterschiede zwischen Szenario A und B.

Bezogen auf die Energiemenge lässt sich feststellen, dass sich im befahrbaren Gelände die jährlichen Potenziale im Szenario A auf 12.7 PJ (3528 GWh) und im Szenario B auf 16.6 PJ (4611 GWh) belaufen. Im nicht befahrbaren Gelände betragen die jährlichen Potenziale in beiden Szenarien ca. 10 PJ (2778 GWh), was einem Anteil am Gesamtpotenzial von 44% (Szenario A) und 38% (Szenario B) entspricht. Auffällig sind das hohe Nadelholzpotenzial im befahrbaren Gelände im Szenario B und die gleich hohen Potenziale von Nadel- und Laubholz bei beiden Szenarien im nicht befahrbaren Gelände.

Bei der auf Energiemengen bezogenen Betrachtung werden die holzmengenmässigen Unter-

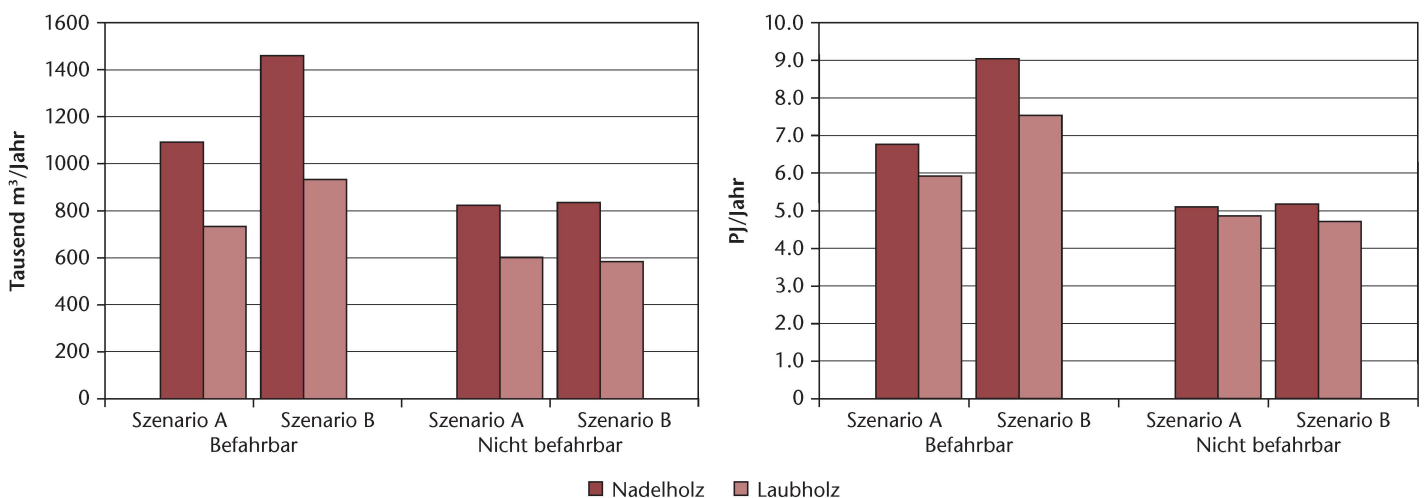


Abb 7 Waldenergieholzpotenziale (Derbholz und Reisig mit Rinde) nach Befahrbarkeit des Geländes, ausgedrückt als Holzmenge (links) und Energiemenge (rechts) und aufgeschlüsselt für Nadel- und Laubholz für die Periode 2017 bis 2026 für die Nutzungsszenarien A (Nutzung wie bisher) und B (Mehrnutzung 25%) unter Annahme der weniger energieholzfreundlichen Holzmarktsituation (Variante 1).

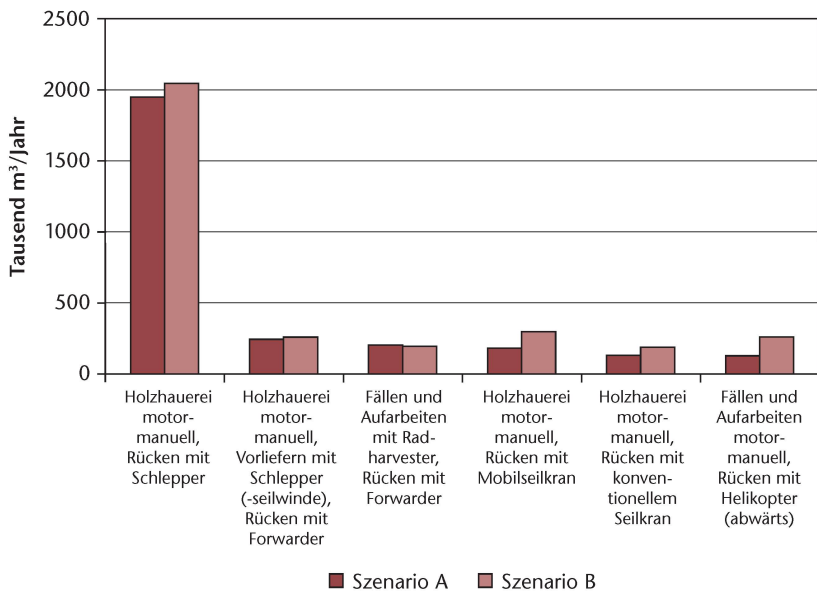


Abb 8 Waldenergieholz (Derbholz und Reisig mit Rinde) nach Ernteverfahren für die Nutzungsszenarien A (Nutzung wie bisher) und B (Mehrnutzung 25%) und bei einem weniger energieholzfreundlichen Holzmarkt (Variante 1) in der Periode 2017 bis 2026. Anmerkung: Beim LFI werden 18 Holzernnteverfahren unterschieden; hier sind jedoch nur diejenigen dargestellt, die zusammen 90% ausmachen.

schiede zwischen Nadel- und Laubholz ausgeglichen. Laubholz ist zwar schwerer als Nadelholz, weist dafür aber eine etwas geringere Energiedichte auf.

Ernteverfahren

Ordnet man die Waldenergieholzpotenziale den Ernteverfahren zu (Abbildung 8), zeigt sich deutlich, dass der Grossteil (mehr als 50%) dieser Holz-mengen auf die motormanuelle Fällung und Aufarbeitung mit anschliessender Schlepperrückung entfällt. Die anderen Verfahren spielen eine untergeordnete Rolle. Weiter wird deutlich, dass die zusätzlichen Potenziale im Szenario B zu einem grossen Teil nur mit teureren Verfahren, die auf Seilkran-

und Helikoptereinsatz basieren, genutzt werden können.

Bereitstellungskosten

Für die weitere Beurteilung der Verfügbarkeit der Waldenergieholzpotenziale ist es wichtig, zu wissen, welche Holz-mengen zu welchen Kosten bereitgestellt werden können. Abbildung 9 gibt differenziert nach Nadel- und Laubholz sowie nach Produktionsregionen Aufschluss über die Bereitstellungskosten, bezogen auf die in den Potenzialen enthaltenen Energiemengen. Die Bereitstellungskosten beinhalten die Kosten für das Fällen, Aufarbeiten und Rücken sowie für das Hacken und Transportieren des Energieholzes bis an den Verarbeitungsort. Die Darstellung lässt folgende wesentliche Feststellungen zu: 1) Der grösste Teil der kostengünstigen Waldenergieholzpotenziale liegt im Mittelland. 2) Die Realisierung zusätzlicher Waldenergieholzpotenziale im Szenario B ist nur zu höheren Kosten möglich. 3) Dabei gibt es grosse zusätzliche Potenziale vor allem in den Alpen im Nadelholz und auf der Alpensüdseite im Laubholz.

Diskussion

Grössenordnung der Potenziale und mögliche Mehrnutzungen

Die Ergebnisse erlauben einen differenzierten Überblick über die Waldenergieholzpotenziale in der Schweiz. Betrachtet werden relevante Faktoren, welche die Potenziale beeinflussen können; diese reichen von der Änderung der Nutzungsstrategie inklusive Vorratsabbau, der Abschöpfung ungenutzter Potenziale im steilen Gelände, der zusätzlichen Nutzung von Reisig und Nadeln/Blättern bis hin zu marktbedingten Änderungen der Holzsortimente.

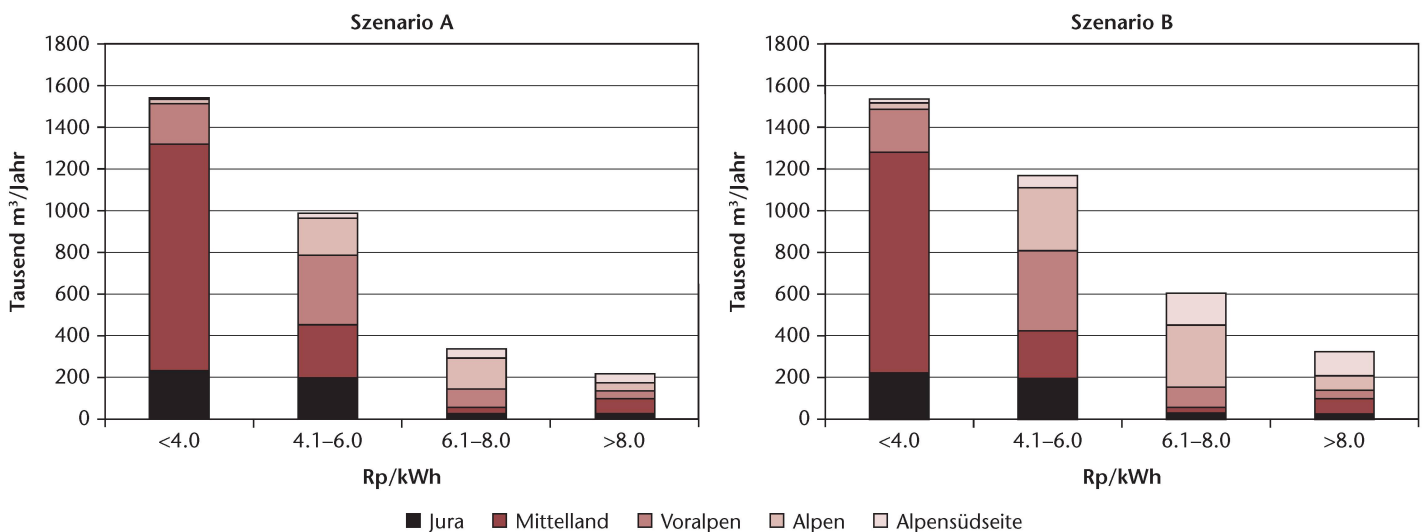


Abb 9 Bereitstellungskosten (Ernte-, Hack- und Transportkosten) für Waldenergieholz (Derbholz und Reisig mit Rinde) für die Nutzungsszenarien A (Nutzung wie bisher; links) und B (Mehrnutzung 25%; rechts) bei der weniger energieholzfreundlichen Marktsituation (Variante 1) in der Periode 2017 bis 2026.

Ernteverluste und Flächenrestriktionen sind in den technischen Potenzialen nicht berücksichtigt.

Bei einer konservativen Schätzung basierend auf Szenario A («Wie bisher») und Szenario B (Mehrnutzung 25%) ergeben sich Waldenergieholzpotenziale von 3.1 bis 5.1 Mio. m³ (Derbholz und Reisig mit Rinde) beziehungsweise 28 PJ (7778 GWh) bis 45 PJ (12500 GWh) inklusive Nadeln und Blätter. Dabei beinhaltet das Reisig im Durchschnitt beider Szenarien eine Energiemenge von etwa 8 PJ und Nadeln/Blätter etwa 2.5 bis 3.1 PJ (694 bzw. 861 GWh).

Als grobe Richtgrösse kann von einem technischen Potenzial von 4.0 Mio. m³ Derbholz und Reisig beziehungsweise 36 PJ (10000 GWh) inklusive Nadeln und Blätter für den Schweizer Wald ausgegangen werden, welches ohne zusätzliche Energieholzplantagen und im Durchschnitt ohne Vorratsabbau erreicht wird. Diese 4 Mio. m³ ergeben sich als Durchschnitt der Schätzwerte für beide Holzmarktvarianten der Szenarien A und B (Tabelle 2). Bei einem weniger energieholzfreundlichen Holzmarkt ist jährlich mit 3 bis 4 Mio., bei einem energieholzfreundlichen mit 4 bis 5 Mio. m³ (Derbholz und Reisig) zu rechnen. Bei einer weniger energieholzfreundlichen Marktlage lässt sich das Potenzial vermutlich aber nur realisieren, wenn Massnahmen zur Senkung der Erntekosten erfolgen.

Grundsätzlich sind zwar kurzfristig beträchtliche Mehrnutzungen bis zu 7.3 Mio. m³ (Derbholz und Reisig) möglich, aber ertragskundlich nachteilig. Bei den Nutzungsstrategien B bis D ergeben sich im Zuge der Erhöhung der gesamtschweizerischen Jahresnutzungen im Wald zudem auch höhere Industrierestholzmengen beziehungsweise zusätzliche Energieholzpotenziale auf der Stufe der Be- und Verarbeitung.

Mehrnutzungen wären in den Alpen und auf der Alpensüdseite in beträchtlichem Umfang möglich. Ihre Realisierung bedingt jedoch aus Gründen der Wirtschaftlichkeit kostensenkende Massnahmen bei Holzernte und -transport sowie auch Investitionen in die Walderschliessung. Es stellt sich dabei aber auch die Frage nach den Verwertungsmöglichkeiten vor Ort, um weite Transporte zu vermeiden und so den dezentral anfallenden Brennstoff auch dezentral zu nutzen.

Die Modellierung der Potenziale in Abhängigkeit von verschiedenen Marktlagen beim Energieholz vermittelt einen quantifizierten Eindruck der marktbedingten Variabilität der Potenziale. Dies schützt vor Überraschungen in der Realität. Die Modellierung zeigt beispielsweise eindrücklich, wie sich der hohe energetisch genutzte Stammholzanteil beim Laubholz im Falle eines energieholzfreundlichen Marktes auswirkt und in diesem Bereich die angestrebte Kaskadennutzung verhindert. In dieser Situation ist das Energieholz im Laubholzbereich immer weniger ein Kuppelprodukt, also nicht mehr in

so hohem Masse vom Stammholzeinschlag abhängig und insofern leichter verfügbar.

Gegenüber der ersten Waldenergieholzpotenzialschätzung der WSL vor zehn Jahren (Thees et al 2003) ergeben sich teilweise höhere Potenziale und auch strukturelle Verschiebungen zwischen Laub- und Nadelholz zugunsten des Letzteren. Dies vor allem weil die Szenarien höhere Nutzungen vorsehen und energieholzfreundlichere Marktsituationen unterstellt wurden. Die Ergebnisse widerspiegeln insofern natürlich zu einem grossen Teil die veränderten Annahmen der neuen Untersuchung. Aber auch die real zunehmenden Vorräte in den Alpen und auf der Alpensüdseite dürften hierfür eine Rolle spielen.

Trotz der hier ermittelten höheren Potenziale gilt es festzustellen, dass das gesamte Waldenergieholzpotenzial hinsichtlich seiner nutzbaren Gesamtmenge und seines mengenmässigen Beitrages zur Energieproduktion limitiert ist.

Bereitstellungskosten des Waldenergieholzes

Die Erntekostenermittlung basiert auf dem LFI und dem Holzernteproduktivitätsmodell HeProMo (Frutig et al 2009). Das LFI berechnet mit HeProMo die Erntekosten für jeden Stichprobenpunkt. Diese sind in der Regel nicht sortimentsbezogen, sondern gelten als Durchschnittswerte für alle gernteten Kubikmeter Holz eines Baumes beziehungsweise eines Holzschlags. Der Bearbeitungsgrad der Bäume ist im Durchschnitt höher als bei der groben Herrichtung des Energieholzes für die anschliessende Hackung, was tendenziell zu einer Überschätzung seiner Kosten führt. Die Stückvolumen der Bäume, die der Kalkulation von Bearbeitung und Geländetransport zugrunde gelegt werden, sind höher als die des Energieholzes, was tendenziell zu einer Unterschätzung seiner Kosten führt. Teilweise werden sich diese Effekte kompensieren, was hier aber nicht näher spezifiziert werden kann. Es kommt hinzu, dass die Kuppelproduktion eine sortimentsbezogene Kostenverteilung sowieso erschwert. Gleichwohl ist davon auszugehen, dass die für jeden Stichprobenpunkt kalkulierten Erntekosten des Waldenergieholzes mehrheitlich in einer realitätsnahen Grössenordnung liegen.

Die Bereitstellungskosten für das Holz sind ein Schlüsselfaktor für die Wirtschaftlichkeit der gesamten Holzenergiesysteme und damit für die Nutzung der vorhandenen Waldenergieholzpotenziale. Will man die Verfügbarkeit verbessern, kommt der Kostensenkung in der gesamten Lieferkette eine zentrale Bedeutung zu. Angesichts des hohen Anteils matormanueller beziehungsweise gering mechanisierter Erntemethoden sind Kostensenkungspotenziale zu vermuten. Der Kostensenkung kommt vor allem dort eine besondere Bedeutung zu, wo sie die Nut-

zung zusätzlicher Potenziale im steilen Gelände ermöglicht. Ein Ansatz hierzu liegt in der Vollbaumnutzung mit Kombiseilgeräten und ähnlichen Methoden.

Die ausgewiesenen Bereitstellungskosten stellen grobe Schätzungen dar, um einen Überblick über die ganze Schweiz zu erhalten. Sie streuen in hohem Mass; es ergibt sich eine Bandbreite in der Grössenordnung von circa 2 bis 10 Rp./kWh. Es ist zu beachten, dass sie keine Verwaltungs- und Investitionskosten beinhalten. Für den Waldeigentümer rechnet sich die Bereitstellung von Energieholz oft nicht oder nur knapp. Sein Vorteil beschränkt sich auf eine Absatzmöglichkeit für Kuppelprodukte oder minderwertige Holzsortimente, in der Folge auf die Vermeidung von Forstschutzproblemen im Nadelholz und von Folgekosten bei späteren Holzerntemassnahmen durch liegen gelassenes Holz.

Angesicht dieser Ergebnisse sei daran erinnert, dass bezogen auf den Energieinhalt Holzbrennstoffe meist deutlich weniger kosten als Heizöl. Dies trifft besonders für Hackschnitzel zu. Für Heizöl liegen die Preise bei 12 bis 14 Rp./kWh (Schweizer 2012). Allerdings erfordert eine Hackschnitzelheizung höhere Investitionen, und im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien sind Holz und andere Biomassen teurer.

Nährstoffentzug durch Nutzung von Waldenergieholz

Schaft- und Astderbholz sowie Reisig und Nadeln/Blätter unterscheiden sich hinsichtlich der Energieinhalte, des Nährstoffentzugs und der Erntekosten. Besonderes Interesse erfährt der Aspekt des Nährstoffentzuges. Der Anteil von Reisig und Nadeln/Blättern beträgt je nach Marktsituation und bezogen auf Energiemengen ein Viertel (Variante 2) bis ein Drittel (Variante 1) der gesamten Potenzials und stellt somit eine relevante Mehrnutzungsmöglichkeit dar. Diese Option bietet sich im Nadelholzbereich, wo es noch ungenutzte Potenziale im steilen Gelände gibt und wo die Vollbaumnutzung eine sehr effiziente Methode darstellt, die Erntekosten zu senken und zugleich zusätzliche Energieholzpotenziale zu nutzen. Die Vollbaumnutzung kommt derzeit auf 12% der Waldfläche zur Anwendung, in den Alpen und Voralpen sogar etwas häufiger (Duc et al 2010). Hier stellt diese Erntemethode vor allem auch für die Bewirtschaftung des Schutzwaldes eine wirtschaftlich sehr effiziente Methode dar und hilft so, diese zu gewährleisten.

Durch die Vollbaumnutzung erhöht sich der Nährstoffentzug, und es kann je nach Ausgangssituation des Waldstandortes und je nach Intensität der Nutzung zu Beeinträchtigungen der Nährstoffversorgung kommen. Der Ernteverlust führt dazu, dass ein relevanter Teil der Nadeln und Blätter im Wald verbleibt. Negative Auswirkungen lassen sich ver-

mindern, indem die Zahl der Eingriffe mit Vollbaumnutzung im Leben eines Waldbestandes reduziert wird und bei der Nutzung eines Baumes ein grosser Teil der Krone im Bestand verbleibt. Da hohe Nährstoffgehalte eine thermische Nutzung erschweren (Nussbaumer 2013, dieses Heft), ist es in der Regel sinnvoll, dieses nährstoffreiche Material mit zudem hohem Wassergehalt grösstenteils im Wald zu belassen. Das Nährstoffentzugsrisiko sollte situationsbezogen beurteilt werden. Hierfür liegen mit dem Nährstoffbilanzierungsmodell (Lemm et al 2010) erste Grundlagen vor.

Aktuelle und zukünftige Verwendung der Waldenergieholzpotenziale

Im Zuge der Umstellung des Energiesystems auf erneuerbare Energien stellt sich die Frage, welche Rolle die Biomasse und speziell das Waldholz im Mix der Erneuerbaren zukünftig spielen soll. Daraus ergeben sich Ansprüche an die Menge, Qualität und Bereitstellung des Waldenergieholzes, welche direkten Einfluss auf die Potenziale und ihre Nutzung haben.

Von 2004 bis 2012 stieg die energetische Nutzung von Waldholz in der Schweiz nach der Forststatistik 2012 (Bafu 2013)¹ von 1.15 Mio. m³ auf 1.67 Mio. m³ (der Anteil an Hackschnitzeln stieg in diesem Zeitraum von 0.28 Mio. m³ auf 0.80 Mio. m³), also von einem Anteil von 22% an der gesamten Nutzung im Jahr 2004 auf einen Anteil von 36% im Jahr 2012. Mit den in der Forststatistik nicht erfassten Nutzungen für den Eigenbedarf im Privatwald dürfte sich die gesamte Waldenergieholznutzung in der Schweiz derzeit auf gegen 2.5 Mio. m³ belaufen. Diesen Holz mengen steht das neu ermittelte technische Potenzial von rund 4 Mio. m³ Waldenergieholz gegenüber. Das heisst, rund 60% des Potenzials werden bereits beansprucht. Nach der Holzenergiestatistik 2011, welche auch das «Nichtwaldholz» berücksichtigt, betrug der witterungsbedingte Holzumsatz ohne Einbezug der Kehrlichtverbrennung 39.7 PJ (11 028 GWh), wobei 61% davon beziehungsweise 24.2 PJ (6722 GWh) aus der Verwertung von Waldholz stammen. Nach der Holzenergiestatistik werden derzeit somit etwa 67% des in der vorliegenden Untersuchung als realistisch angesehenen geschätzten Waldenergieholzpotenzials von rund 36 PJ (12 500 GWh) genutzt. Beide Statistiken kommen also zu einem ähnlichen Ergebnis.

Das freie Potenzial von rund 2 Mio. m³ beziehungsweise 20 PJ (5556 GWh) ist tendenziell nur zu einem höheren Preis zu haben und steht nicht nur der energetischen, sondern auch einer allfälligen stofflichen Verwertung zur Verfügung. Ein beträchtlicher Teil der aktuell für die energetische Verwen-

¹ www.bafu.admin.ch/wald/01256/12717/index.html?lang=de&msg-id=49703 (26.10.2013)

dung infrage kommenden Holzsortimente eignet sich auch als Industrieholz, insbesondere für die Produktion von Zellstoff und Spanplatten. Biomasse als einzige erneuerbare Ressource organischen Kohlenstoffs ist zunehmend auch für die chemische Industrie von grosser Bedeutung. Überdies kann in Holzprodukten wie in Holzhäusern und Möbeln langfristig CO₂ gebunden werden. Aus diesen Überlegungen heraus hat die stoffliche Nutzung von Holz Vorrang vor der energetischen Nutzung. Grundsätzlich drängt sich die sogenannte Kaskadennutzung auf, welche zuerst eine stoffliche und anschliessend eine energetische Holznutzung vorsieht. Das bedeutet, dass das Holz generell mehrfach genutzt und das Altholz für die energetische Nutzung bedeutsamer wird.

Weil das Waldenergieholz 1) bezüglich seines Potenzials weitgehend begrenzt und damit knapp ist und 2) hinsichtlich seiner absoluten Menge auch nur in vergleichsweise geringem Umfang zur benötigten Energieerzeugung beitragen kann und weil 3) seine Produktion im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien teuer und gegebenenfalls mit Umwelt Risiken (vgl. z.B. Baltensperger 2013, dieses Heft) belastet ist, muss sein Einsatz möglichst effizient und wertschöpfend sein. Holz ist aufgrund seiner guten Speichereigenschaften zwar grundsätzlich geeignet, um in der Grundlast von Wärme und Strom eingesetzt zu werden. Sein wertschöpfender Einsatz liegt aber vor allem in der Lückenfüllung bei umfassender prioritärer Nutzung der volatilen, vom Potenzial her wesentlich umfangreicher vorhandenen erneuerbaren Energien wie vor allem Sonne und Wind (vgl. z.B. Nussbaumer 2013, dieses Heft, und Keilen 2013, mündliche Mitteilung).

Folgerungen

Vor dem Hintergrund der wachsenden Bedeutung erneuerbarer Energien wurden die Waldenergieholzpotenziale in der Schweiz geschätzt. Dabei wurde der Frage nachgegangen, wie viel Waldenergieholz «maximal» und realistischerweise nutzbar ist, wie nachhaltig die möglichen Mehrnutzungen sein können und zu welchen Kosten welche Mengen genutzt werden können.

Ein jährlich nutzbares Energieholzpotenzial im Schweizer Wald von ca. 4 Mio. m³ Derbholz und Reisig beziehungsweise 36 PJ (10 000 GWh) inklusive Nadeln und Blätter wird als realistisch angesehen. Mehrnutzungen gegenüber dem Status quo sind nachhaltig möglich. Zusätzlich nutzbare Potenziale bestehen in nicht genutztem Waldholz (strategisches Mehrnutzungspotenzial) und in Sortimentsverschiebungen (operatives Mehrnutzungspotenzial). Letzteres ist als konjunkturabhängige Grösse weniger stabil und zuverlässig.

Die grössten zusätzlich nutzbaren Potenziale befinden sich im steilen Gelände der Alpen und der Alpensüdseite. Ihre Realisierung bedingt flankierende technische und organisatorische Massnahmen, um die Bereitstellungskosten zu senken. Die Möglichkeiten hierfür liegen insbesondere in der weiteren Mechanisierung der Holzernte (Vollbaumnutzung mit Kombiseilgerät) und in grossen Holzschlägen. Die Nährstoffnachhaltigkeit ist dabei im Einzelfall abzuklären.

Trotz dem hier ausgewiesenen hohen Waldenergieholzpotenzial wird der Beitrag von Holz (und anderer Biomasse) zur Energieproduktion gering bleiben und vergleichsweise teuer zu realisieren sein. Daher ist die effiziente und wertschöpfende Verwendung des Rohstoffes besonders wichtig und anzustreben. Hierzu gilt es abzuklären, welche Rolle die Biomasse und speziell das Waldholz in dem Mix der Erneuerbaren zukünftig spielen soll. ■

Eingereicht: 2. August 2013, akzeptiert (mit Review): 30. Oktober 2013

Literatur

- ASSMANN E (1961) Waldertragskunde. München: BLV. 490 p.
- BALTENSPERGER U ET AL (2013) Holzfeuerungen: eine bedeutende Quelle von Feinstaub in der Schweiz. Schweiz Z Forstwes 164: 420–427. doi: 10.3188/szf.2013.0420
- BOLLIGER M, IMESCH N, SCHNIDRIG R (2012) Waldreservatspolitik der Schweiz: Zwischenbilanz und Perspektiven aus Sicht des Bundes (Essay). Schweiz Z Forstwes 163: 199–209. doi: 10.3188/szf.2012.0199
- BRÄNDLI UB, EDITOR (2010) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL. 312 p.
- DUC P ET AL (2010) Holzproduktion. In: Brändli UB, editor. Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL. pp. 143–180.
- FRÜTIG F, THEES O, LEMM R, KOSTADINOV F (2009) Holzernteproduktivitätsmodelle HeProMo – Konzeption, Realisierung, Nutzung und Weiterentwicklung. In: Thees O, Lemm R, editors. Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente. Zürich: VDF. pp. 441–466.
- KAUFMANN E (2001A) Prognosis and management scenarios. In: Brassel P, Lischke H, editors. Swiss National Forest Inventory: Methods and models of the second assessment. pp. 197–206.
- KAUFMANN E (2001B) Estimation of standing timber, growth and cut. In: Brassel P, Lischke H, editors. Swiss National Forest Inventory: Methods and models of the second assessment. pp. 162–196.
- KAUFMANN E (2011) Nachhaltiges Holzproduktionspotenzial im Schweizer Wald. Schweiz Z Forstwes 162: 300–311. doi: 10.3188/szf.2011.0300
- LEMM R ET AL (2010) Ein Modell zur Bilanzierung des holzerntebedingten Nährstoffentzugs auf Schweizer Waldböden. Schweiz Z Forstwes 161: 401–412. doi: 10.3188/szf.2010.0401
- NUSSBAUMER T (2013) Entwicklungstrends der Holzenergie und ihre Rolle in der Energiestrategie 2050. Schweiz Z Forstwes 164: 389–397. doi: 10.3188/szf.2013.0389
- PERRUCHOUD D, KIENAST F, KAUFMANN E, BRÄKER OU (1999) 20th century carbon budget of forest soils in the Alps. Ecosystems 2: 320–337.

SCHWEIZER S, EDITOR (2012) Schweizerischer Forstkalender 2013. Frauenfeld: Huber. 480 p.
THEES O ET AL (2003) Schätzung des Potenzials an Energieholz im Schweizer Wald und Kalkulation der Bereitstellungspreise. Teilprojekt im Rahmen des Forschungsprojektes ECOGAS. Birnensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL. 53 p.

WITTKOPF S (2005) Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern. Weihenstephan: Techn Univ München, Dissertation. 209 p.

Energieholzpotenziale im Schweizer Wald

Auf der Basis des 3. Schweizerischen Landesforstinventars (Erhebungen in den Jahren 2004 bis 2006) werden in vorliegendem Artikel die Energieholzpotenziale im Schweizer Wald abgeschätzt. Zugrunde gelegt werden hierfür vier Szenarien der Nutzungsintensität und zwei Holzmarktsituationen. Die Waldenergieholzpotenziale werden zudem analysiert nach Produktionsregionen, Eigentumskategorien, Stärkeklassen, Baumkompartimenten, Ernteverfahren und -kosten. Das technische Potenzial beträgt für die Schweiz minimal 3.1 Mio. m³ (Szenario «Nutzung wie bisher» und wenig energieholzfreundlicher Markt) und maximal 7.3 Mio. m³ pro Jahr (Nutzungsszenario «zeitweise Mehrnutzung 75%» [welches mit einem deutlichen Vorratsabbau verbunden ist], ausgesprochen energieholzfreundlicher Markt) an Derbholz und Reisig. Als grobe Richtgrösse darf von einem technischen Potenzial von 4 Mio. m³ Derbholz und Reisig ausgegangen werden, welches im Durchschnitt ohne Vorratsabbau genutzt werden kann. Dieses wird derzeit bereits zu etwa 60% geerntet. Der Artikel zeigt, dass zwar zusätzliche Waldenergieholzpotenziale erschlossen werden können, dass das Waldenergieholz aber nur einen geringen Beitrag zur gesamten Energieproduktion zu leisten vermag, welcher zudem vergleichsweise teuer zu realisieren ist. Daher ist eine effiziente und wertschöpfende Verwendung des Rohstoffes besonders wichtig.

Potentiels d'exploitation de bois-énergie dans les forêts suisses

Cet article présente les potentiels d'exploitation de bois-énergie dans les forêts suisses sur la base du 3^e Inventaire forestier national (relevés de terrain de 2004 à 2006). A cet effet, quatre scénarios d'intensité d'exploitation et deux situations du marché du bois sont pris en considération. En outre, les potentiels en bois-énergie sont analysés en fonction des régions de production, des conditions de propriété, des classes de diamètres, des parties de l'arbre, des méthodes de récoltes et des coûts. Sur le plan technique, le potentiel annuel de récolte de bois fort et de ramilles se monte en Suisse au minimum à 3.1 mio de m³ (scénario d'exploitation «inchangé» et marché peu demandeur de bois-énergie) et au maximum à 7.3 mio de m³ (scénario d'exploitation «accroissement de l'exploitation 75%» [qui implique une nette diminution du volume sur pied] et marché particulièrement demandeur en bois-énergie). Le potentiel technique possible sans réduction du volume sur pied est estimé à 4 mio de m³ de bois fort et de ramilles en moyenne. Actuellement, environ 60% de ce potentiel sont déjà exploités. L'article démontre que l'on pourrait récolter davantage de bois-énergie, mais que cet assortiment ne couvre qu'une faible part de la production énergétique globale et qu'en outre, un tel accroissement de la récolte serait relativement onéreux. Il est donc particulièrement indiqué de se concentrer sur l'efficacité et sur la valeur ajoutée lors de l'utilisation de la matière première bois.