

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Herausgeber: Schweizerischer Forstverein
Band: 159 (2008)
Heft: 9

Artikel: Nutzung des geernteten Holzes : Substitution und Senkenwirkung
Autor: Hofer, Peter / Taverna, Ruedi / Werner, Frank
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097898>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 02.05.2026

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

Nutzung des geernteten Holzes – Substitution und Senkenwirkung

Peter Hofer GEO Partner AG (CH)*
Ruedi Taverna GEO Partner AG (CH)
Frank Werner Werner Umwelt & Entwicklung (CH)

The use of harvested wood – substitution and sink effects

The greenhouse gas effect can be mitigated by using wood in wood products and as an energy source. The effects of different wood use scenarios over more than 100 years can be demonstrated simulating associated wood flows and changes in wood stocks. The following recommendations have been developed on the basis of such models in order to optimize the contribution of the forestry and timber sector to mitigate climate change: 1) the maximum possible sustainable increment should be generated in the forest; 2) this increment should be harvested continuously; 3) the harvested wood should be processed in accordance with the principle of cascade use; 4) waste wood that is not suitable for further use should be used to generate energy.

Keywords: forestry sector, timber sector, CO₂-emissions, wood products, models, life cycle assessment (LCA), climate change, substitution

doi: 10.3188/szf.2008.0288

* Baumackerstrasse 24, 8050 Zürich, E-Mail hofer@geopartner.ch

Wald- und Holzwirtschaft können auf verschiedene Weise zur Minderung des Treibhauseffektes beitragen: durch die Senkenfunktion des Waldes, die Lagerung von Kohlenstoff in Holzprodukten sowie mit der Substitution von fossilen Rohstoffen durch die Verwendung von Holz (Marland & Schlamadinger 1998, Werner et al 2006, Metz et al 2007, Eriksson et al 2007, Fischlin et al 2006). Im Rahmen einer im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt erarbeiteten Studie wurde der Frage nachgegangen, wie durch Waldbewirtschaftung, Holzverarbeitung und -verwendung in der Schweiz die Kohlenstoffbilanz im In- und Ausland optimiert werden kann (Taverna et al 2007). Diese Studie ist Basis des vorliegenden Artikels.

Mithilfe von Szenarien wurde nach den Elementen einer künftigen, kohlenstoffoptimierten Politik bezüglich Waldnutzung, Holzverarbeitung und Holzverwendung gesucht. Diese Szenarien basieren auf Modellen zur Waldbewirtschaftung, zur Holzwirtschaft und zur Substitution im In- und Ausland. Durch eine unterschiedliche Waldbewirtschaftung fallen unterschiedliche Mengen an Holz an, welche entweder im Bauwesen oder im Energiebereich eingesetzt werden können. Die untersuchten Szenarien unterscheiden sich einerseits bezüglich Erntemengen im Wald und andererseits bezüglich der Verwendung des Holzes. Betrachtet wurden die Aus-

wirkungen unterschiedlicher Strategien der Waldbewirtschaftung und Holzverwendung auf die Kohlenstoffspeicher im Wald und im Gebäudepark sowie auf die Kohlendioxidemissionen aus der Verwendung von Baumaterialien und der Energiebereitstellung.

Elemente der Modellierung

Die Thematik wurde in vier Bereiche gegliedert, welche mit Modellansätzen bearbeitet wurden (Abbildung 1). Das Wald- und das Holzflussmodell arbeiten unabhängig voneinander, während die Substitutionsrechnung und die Abgrenzung gegenüber dem Ausland jeweils die Resultate der vorangehenden Berechnungen aufnehmen.

Die Waldbewirtschaftung und die Waldentwicklung wurden mithilfe von Daten des Schweizerischen Landesforstinventars (LFI) modelliert. Es wurden unterschiedliche Intensitäten der Waldbewirtschaftung untersucht, und die Kohlenstoffdynamik im Boden wurde mitberücksichtigt (vgl. Thürig & Kaufmann 2008, in diesem Heft). Die Modellrechnungen umfassen einen Zeitraum von 100 Jahren (1996 bis 2096).

Die Holzflüsse und Lager in der schweizerischen Holzwirtschaft wurden dynamisch model-

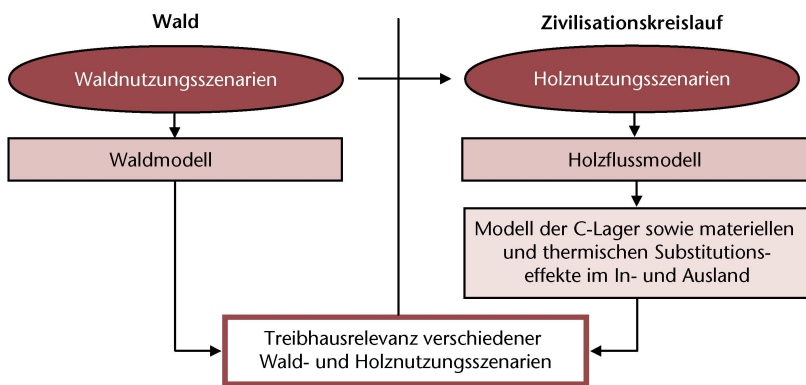


Abb 1 Zusammenspiel der verwendeten Modelle/Bereiche. Quelle: Taverna et al (2007).

liert. Das Modell wird durch den Verbrauch an Holzprodukten gesteuert. Die Berechnungen umfassen den Zeitraum von 1900 bis 2150.

Die Substitutionsrechnungen basieren auf dem Vergleich von Holz- und Nichtholzprodukten sowie deren Ökobilanzen bzw. auf den Ökoinventaren zur Bereitstellung und Verbrennung verschiedener Energieträger (Werner et al 2006, Werner & Richter 2007, Hofer et al 2002b). Um die Substitutionswirkung im In- und Ausland unterscheiden zu können, wurden die Treibhausgasemissionen der einzelnen Bauteile und der einzelnen Energieträger nach ihrem Entstehungsort aufgeschlüsselt.

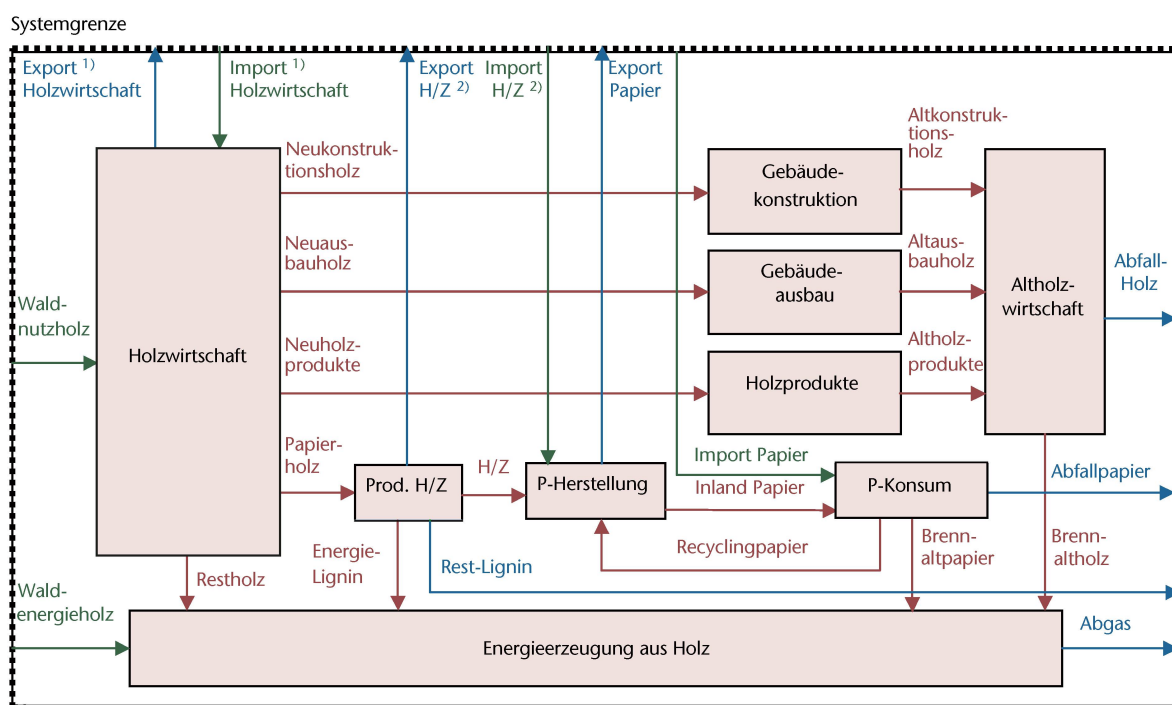
Lagerbildungen sowie Kohlenstoffeinsparungen aus der Substitution wurden zwischen dem In- und Ausland abgegrenzt. Entscheidend für den Klimaschutz sind die gesamten Effekte im In- und Ausland. Für politische Entscheidungen ist es aber auch von Bedeutung, welche Effekte im Inland und welche im Ausland entstehen.

Das Modell Holzwirtschaft Schweiz

In Zusammenarbeit mit der Eawag wurde ein einfaches Stoffflussmodell der Schweizer Holzwirtschaft mit 9 Prozessen und 26 Flüssen erarbeitet (Abbildung 2). Es wurde mit der Software Simbox implementiert, die an der Eawag für die dynamische Berechnung von Stoffflüssen entwickelt worden ist. Fünf Input- und sieben Outputgrößen überschreiten die Systemgrenzen «Schweizer Holzwirtschaft». Die Prozesse unterscheiden sich aufgrund der Verweilzeit der Produkte, also deren Lebensdauer. Diese reichen von 0 Jahren für die Papierherstellung bis 80 ± 20 Jahre für Bauteile der Gebäudekonstruktion. Das Modell wird durch die Vorgabe der Holzverbräuche und der Aussenhandlungsmengen gesteuert. Die restlichen Holzflüsse und die Holzlager werden in Abhängigkeit der Zeit berechnet (Hofer et al 2002a).

Die in den verschiedenen Verwendungsbereichen aktuell eingesetzten Verbrauchsmengen wurden vor allem aus dem Branchenprofil der Wald- und Holzwirtschaft (Buwal 2004) hergeleitet, die Werte der Vergangenheit aus der Reihe «Jahrbuch Wald und Holz» bzw. aus den Forststatistiken der Jahre 1910 und 1922 bis 1974. Lager von Produkten mit kurzer Verweildauer im System, wie Papier und Brennholz, weisen eine kurze Reaktionszeit auf, während das Konstruktionsholz und das Ausbauholzlager deutlich träger reagieren. Um die Auswirkungen des heutigen oder eines zukünftigen Holzverbrauches ausweisen zu können, müssen die Lagerentwicklungen während mindestens 100 Jahren über die letzte Verbrauchsänderung hinaus betrachtet werden. Um auch die heutigen Holzlager abbilden zu können, musste mit der Simulation im Jahr 1900 begonnen werden.

Abb 2 Das Modellsystem der Schweizer Holzwirtschaft (Quelle: Taverna et al 2007).



1) Zusammengefasst aus 4 einzelnen Flüssen

2) Zusammengefasst aus 2 einzelnen Flüssen

■ Prozesse

Anwendung	Holzprodukt	Konkurrenzprodukt
Konstruktion		
(Aussen-)Wände	Blockholzplatte	Backsteinzweischalenmauerwerk
Stützen	Brettschichtholzstütze	Stahlstütze
Geschossdecken	Holzbalkendecke	Stahlbetondecke
Dämmung	Holzfaserdämmplatte ¹	Steinwolle ²
Dächer	Sichtbalkenkonstruktion	Porenbeton-Steildach
Tiefbau	Holzpalisade	Betonpalisade
Ausbau		
Wand- und Deckenverkleidung	Fichtentäfer	Verputz innen
Treppen	Holztreppe Eiche	Betonfertigtreppe
Bodenbeläge	3-Schicht-Parkett	Keramikfliesen glasiert
Fassaden	Holzschalung sägerau inkl. Lattung ¹	Verputz aussen ²
Ausstattung	Holzwerkstoffzarge	Stahlzarge
Möbel	Holzmöbel	Stahlmöbel
Holzwaren		
Verpackungen	Holzschalung sägerau inkl. Lattung	Plastik (Polypropylen) gleichen Volumens
Holzprodukte	dito Verpackungen	dito Verpackungen
Bauhilfsstoffe	Schalttafeln (3-Schicht-Fichtenplatte)	Aluminiumschalung
Do-it-yourself	Fichtentäfer	Verputz innen

Tab 1 Übersicht über die für den Vergleich gewählten Holzprodukte und ihre Substitute. ¹ in Blockholzplatten-Konstruktion, ² in/auf Backsteinzweischalenmauerwerk. Quelle: Taverna et al (2007).

Die vom Modell der Schweizer Holzwirtschaft generierten Holzflüsse dienten als Eingabedaten für ein umfassendes Excel-basiertes Modell der Kohlenstofflager und Substitutionseffekte. Die Lager wurden aufgeteilt in solche von Schweizer Holzprodukten im Ausland sowie solche von ausländischem Holz im Inland.

Substitutionswirkungen

Bei einer Verwendung von Holzprodukten können in der Regel Produkte mit höherer Energieintensität, beispielsweise Stahl oder Beton, ersetzt werden. Die Verwendung von Holz führt zu einem Minderverbrauch an fossilen Energieträgern bei Produktion und Entsorgung (Koch 1992, Marcea & Lau 1992, Skog & Nicholson 1998, Buchanan & Levine 1999, Pingoud & Lehtilä 2002, Sedjo 2002, Werner et al 2006, Sathre 2007, Werner & Richter 2007). Dieser Effekt wird als Materialsubstitution bezeichnet. Holz kann aber auch direkt als CO₂-neutraler Brennstoff verwendet werden und dabei den Verbrauch fossiler Energieträger reduzieren (z.B. Jungmeier et al 1998, Marland & Schlamadinger 1998, de Jong et al 2007). Dieser Effekt wird als energetische Substitution bezeichnet.

Bei der Verwendung von Holz werden Produkte aus konkurrierenden Materialien substituiert. Bei der Festlegung der Substitutionsprodukte zu denjenigen aus Holz wurden Resultate einer umfangreichen Befragung von Bauherren, Architekten und In-

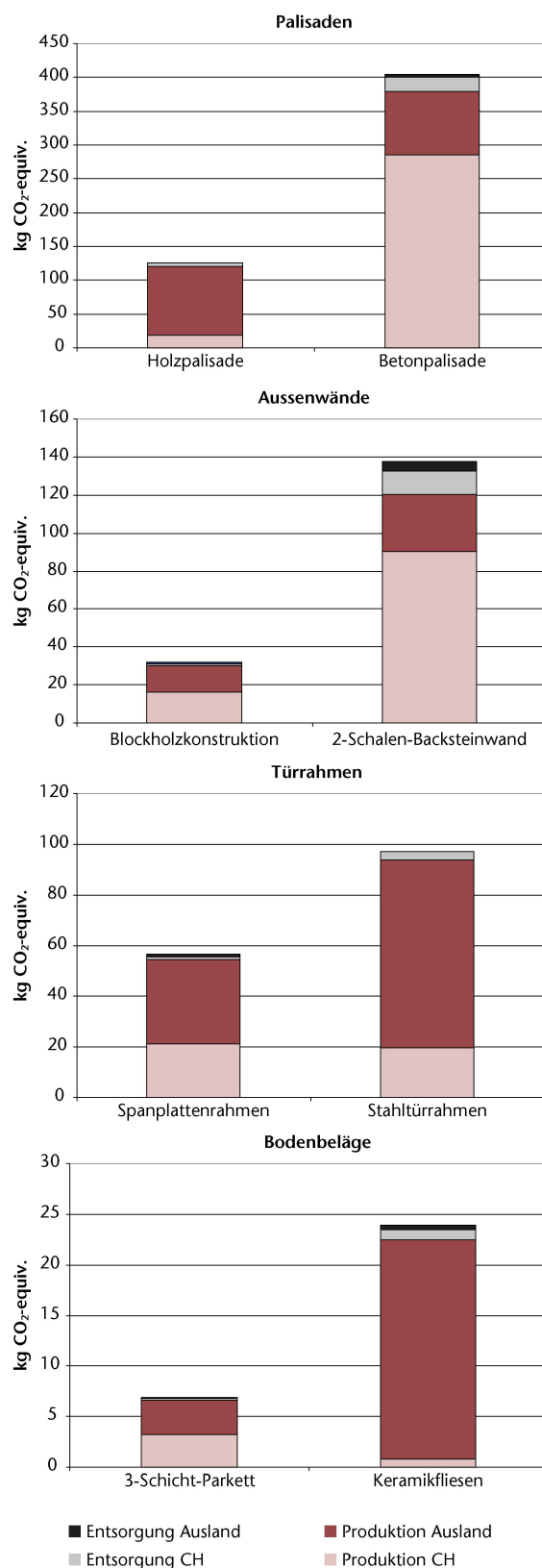


Abb 3 Treibhausgasprofile verschiedener funktional gleichwertiger Produkte. Quelle: Werner et al (2006).

genieuren beigezogen (Buwal 2004) und absehbare Entwicklungen der Gesetzgebung berücksichtigt. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die miteinander verglichenen Produkte jeweils gleicher Funktionalität in den Bereichen Bau und übrige Holzprodukte.

	Zuwachs optimiert		Kyoto optimiert	Reduzierte Waldpflege	Baseline
Holznutzung Schweiz					
Waldholz, alle Sortimente	9.2 Mio. m ³		8.5 Mio. m ³	3.0 Mio. m ³	5.9 Mio. m ³
Differenz zur Nutzung 2000	+ 90%		+ 75%	- 40%	+ 20%
Holzverbrauch Schweiz	Bau	Energie			
Konstruktion, Ausbau, Holzprodukte	+ 80%	+ 0%	+ 80%	- 24%	+ 20%
Waldenergieholz	+ 122%	+ 344%	+ 67%	- 81%	+ 20%
Aussenhandel					
Holzwarenexporte	konstant	konstant	konstant	konstant	konstant
Holzwarenimporte	konstant	konstant	konstant	konstant	konstant

Tab 2 Übersicht über die Szenarien zur Holznutzung im Wald sowie zur Holzverwendung im Bauwesen und Energiesektor. Die Holznutzung im Jahr 2000 wurde um den Lothareinfluss korrigiert und daher auf 5 Mio. m³ festgelegt. Die Holznutzung in Szenario «Kyoto optimiert» entspricht dem durchschnittlichen, jährlich nutzbaren Zuwachs der Jahre 2036–2096 und ist dementsprechend kleiner als der von Thürig & Kaufmann (2008) ausgewiesene Wert für den Abgang aus Nutzung und Mortalität.

Die Treibhausgasbilanz der betrachteten Produkte wurde mittels Ökobilanzen berechnet. Dabei wurden von der Gewinnung der Rohstoffe für die Produktion über die Herstellung und Nutzung, bis zu Transporten und Entsorgung alle Lebensphasen mit einbezogen. Der Substitutionseffekt berechnet sich als Differenz der Treibhausgasemissionen des Holzproduktes und derjenigen seines Konkurrenzproduktes. Dabei wurden die Substitutionseffekte bei der Produktion im In- und Ausland zeitlich unterschieden von jenen bei der Entsorgung. Alle Prozesse einer Ökobilanz wurden entweder dem Inland oder dem Ausland zugeordnet. Der Effekt der Substitution wurde in CO₂-Äquivalenten angegeben.

Wie Abbildung 3 aufzeigt, erweisen sich die Substitutionseffekte von Holzprodukten als sehr vielfältig. Die Treibhausgasemissionen aus Holzprodukten sind oft geringer als von funktionsäquivalenten Produkten aus anderen Baustoffen. Weiter ist es möglich, dass die Herstellung eines Holzproduktes im Inland mehr fossile Energieträger verbraucht als sein Substitut, obwohl das Holzprodukt global betrachtet deutlich weniger Treibhausgase freisetzt.

Bei der thermischen Nutzung von Holz wurden verschiedene Substitutionseffekte unterschieden.

- Die inländische Nutzung von Waldenergie-, Rest- und Altholz aus der Schweiz.
- Die inländische Nutzung von Restholz aus der Produktion, welches aus der Weiterverarbeitung von importierten Halbfabrikaten entsteht.
- Die ausländische Nutzung von exportiertem Schweizer Holz, wobei der Substitutionseffekt nur im Ausland entsteht.
- Die ausländische Nutzung von im Ausland anfallendem Restholz aus der Vorverarbeitung von zu importierenden Holzprodukten.

Für die Abschätzung der energetischen Holzverwertung wurde von einer CO₂-Einsparung von 600 kg CO₂-eq./m³ Holz ausgegangen. Davon werden mindestens 480 kg CO₂-eq./m³ im Inland eingespart.

Ausgehend von diesen Zahlen wurden für jede energetisch genutzte Holzfraktion spezifische Substitutionsfaktoren hergeleitet.

Szenarien

Ziel der Szenarienbildung war es, die Auswirkungen unterschiedlicher politischer Entscheidungen auf die Kohlenstoffbilanz im In- und Ausland aufzeigen zu können. Die Szenarien bauen einerseits auf verschiedenen Waldbewirtschaftungskonzepten mit ihren anfallenden Holzmengen und andererseits auf den heutigen Verbrauchszahlen von Holzprodukten und den möglichen Steigerungspotenzialen der Holzverwendung im Bauwesen auf.

In einem ersten Schritt wurden vier verschiedene Waldbewirtschaftungskonzepte definiert, bei welchen unterschiedliche Mengen an nutzbarem Holz anfallen. In einem zweiten Schritt wurde diese Holzmenge so auf die Anwendungsgebiete im Bau- und Energiewesen verteilt, dass realistische Verwendungsprofile entstanden. Die Verteilung im Bauwesen erfolgte bis zum Detaillierungsgrad Bauteile (beispielsweise Geschossdecken oder Aussenwände). Der Aussenhandel wurde als konstant angenommen. Letzteres war ein Kunstgriff, um den ausländischen Wald aus der Betrachtung ausschliessen zu können, da zum Zeitpunkt der Untersuchung noch keine anwendungsreifen Berechnungsgrundlagen zum Einbezug desselben zur Verfügung standen.

Aufgrund des beschriebenen Vorgehens entstanden die in Tabelle 2 aufgezeigten Szenarien zu Waldnutzung, Holzverbrauch und Aussenhandel. Diesen Szenarien liegen die folgenden Überlegungen zugrunde:

«Zuwachs optimiert» geht von einem im Schweizer Wald auf Dauer maximierten Zuwachs aus, dessen verwertbare Holzmenge laufend abgeschöpft und in Bauprodukte und in Energie umge-

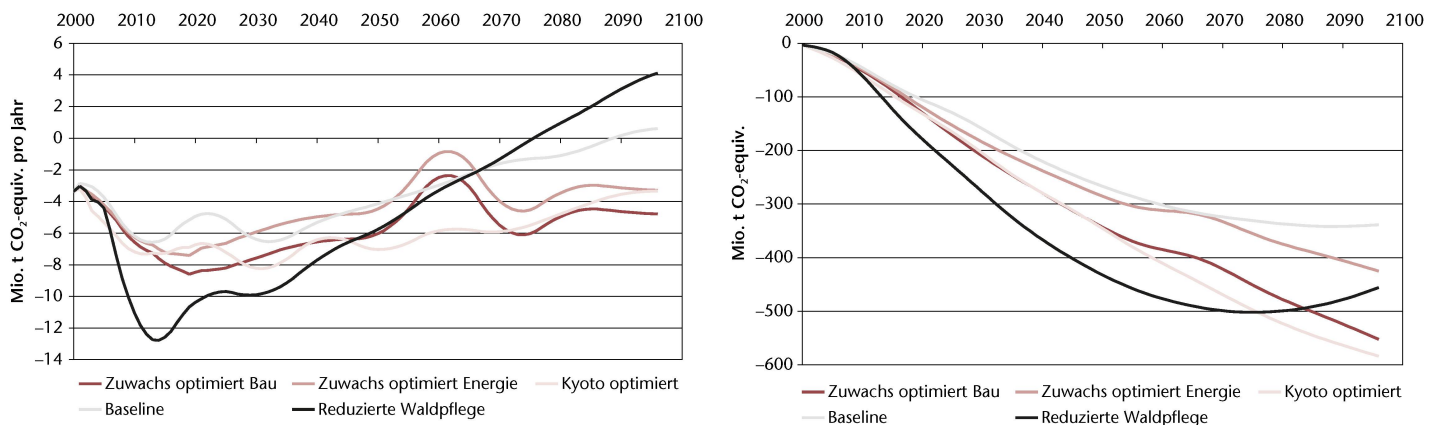


Abb 4 Totale CO₂-Effekte in der Schweiz nach Szenarien, Ergebnisse pro Jahr (links) und kumuliert (rechts). Negative Werte bezeichnen eine Reduktion des CO₂-Ausstosses, positive Werte eine Erhöhung. Quelle: Taverna et al (2007).

setzt wird. Im Unterszenario «Bau» werden die Möglichkeiten der stofflichen Holzverwendung maximal ausgeschöpft und die überschüssige Menge in die energetische Verwendung gesteckt. Im Unterszenario «Energie» geht alles zusätzlich genutzte Holz in die energetische Verwendung.

«Kyoto optimiert» liegt eine Waldentwicklung zugrunde, welche möglichst lange die Anrechnungsmöglichkeiten von Waldholzlagern im Rahmen der Kyoto-Verpflichtungen ausschöpft, im Übrigen aber den Zuwachs an verwertbarem Holz abschöpft. Im Bauwesen wird hier dieselbe Verbrauchsmenge angenommen wie im Szenario «Zuwachs optimiert, Bau».

Der «reduzierten Waldpflege» liegt die Annahme zugrunde, dass nur noch die Gebirgsschutzwaldungen gepflegt werden. Die resultierenden 3 Mio. m³ Holznutzung führen aufgrund der Restriktion «unveränderter Holz aussenhandel» zu einer reduzierten Holzverwendung im Inland.

Baseline setzt den Trend der vor 2000 und nach Lothar beobachteten langsamen Erhöhung von Holznutzung und Verbrauch fort.

Ergebnisse

Summe der Kohlendioxideinsparungen in der Schweiz

Die Ergebnisse der Szenarienberechnungen (Abbildung 4) zeigen, dass eine optimierte Nutzung des nachwachsenden Holzes den nachhaltigsten Effekt für die Verbesserung der Kohlenstoffbilanz ergibt. Langfristig sind die Szenarien, welche eine Steigerung der Holzanwendung vor allem im Bauwesen vorsehen («Zuwachs optimiert, Bau» und «Kyoto optimiert») denjenigen überlegen, welche ein Schwergewicht auf die energetische Verwendung des Holzes legen. In der Schweiz liessen sich so um das Jahr 2025 jährlich insgesamt gut 8 Mio. t CO₂-Emissionen vermeiden. Gegenüber 1990 ergibt das einen

zusätzlichen Effekt von rund 6.5 Mio. t CO₂. Das bedeutet, dass gut 12% der heutigen jährlichen Treibhausgasemissionen vermieden werden könnten. Der Vorteil der materiellen gegenüber der energetischen Verwendung des Holzes liegt darin, dass die Einsparung doppelt erfolgt: bei der Herstellung der Holzprodukte und anschliessend bei der Entsorgung, wenn nicht mehr gebrauchte Holzprodukte noch energetisch genutzt werden können.

Demgegenüber kann mit dem Szenario «Reduzierte Waldpflege» kurz- bis mittelfristig eine relativ grosse Waldsenkenwirkung von knapp 13 Mio. t CO₂ um das Jahr 2015 erzeugt werden. Allerdings kann diese Menge nach den geltenden Kyoto-Regeln nicht vollständig angerechnet werden, sind doch für die Schweiz maximal 1.83 Mio. t CO₂ zugelassen. Ab etwa dem Jahr 2075 bewirkt dieses Szenario zudem in der Summe der Effekte eine CO₂-Emission. Rechnet man das erhöhte Risiko von Waldzusammenbrüchen infolge des ungünstigen Altersaufbaus und der grossen Vorräte dazu, könnte es auch schon viel früher zu einer Emission aus dem Wald kommen. Weiter muss berücksichtigt werden, dass bei diesem Szenario der zukünftige Verbrauch an Holz im Bau- und Energiewesen stark zurückgefahren oder durch den Import von Holz und Holzprodukten ersetzt werden muss. Wird das fehlende Holz durch Nichtholzprodukte und fossile Energieträger kompensiert, so wird die Vermeidung von CO₂-Emissionen aus der Verwendung von Holz und damit auch der Nettoeffekt dieses Szenarios stark reduziert. Weitere Hinweise zur Beurteilung der Effekte des Szenarios «Reduzierte Waldpflege» finden sich bei Thürig & Kaufmann (2008, in diesem Heft).

Die Effekte des Szenarios

«Zuwachs optimiert, Bau» im Einzelnen

Im Vergleich der vier verschiedenen Effekte im Szenario «Zuwachs optimiert, Bau» (Abbildung 5) wird ersichtlich, dass das Maximum der Effekte bereits um das Jahr 2020 auftritt. Bei der Optimierung

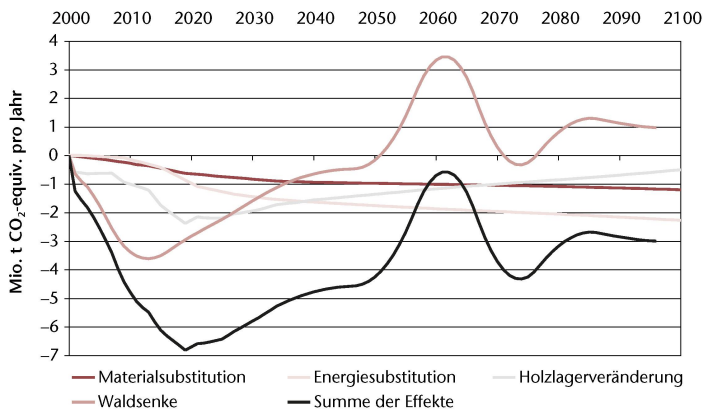


Abb 5 Die verschiedenen Effekte im Szenario «Zuwachs optimiert, Bau» im Vergleich. Negative Werte bezeichnen eine Reduktion des CO₂-Ausstosses, positive Werte eine Erhöhung. Quelle: Taverna et al (2007).

des Zuwachses nehmen die Vorräte im Wald zunächst zu, ab dem Jahr 2050 stagnieren sie aufgrund der konsequenten Nutzung des gesamten Zuwachses. Durch die im Wald verbleibenden Baumteile entstehen Nettoemissionen. Der starke Ausschlag der Waldkurve um das Jahr 2060 ist auf eine modellbedingt hohe Waldnutzung in diesem Zeitraum zurückzuführen.

Durch die vermehrte Holzverwendung (hauptsächlich im Bauwesen) wachsen auch die Holzvorräte im Zivilisationskreislauf. Bis ins Jahr 2020 werden die Lager stark, bis ins Jahr 2130 dann nur noch wenig aufgebaut. Die Effekte aus der energetischen Substitution sind über die gesamte Periode grösser als diejenigen aus der materiellen Substitution. Ab 2035 fällt die Summe der Lagereffekte (Wald und Zivilisationskreislauf) geringer aus als die Summe der Substitutionseffekte (Energie und Material). Die Holzlagereffekte tendieren entsprechend der Lebensdauer der Holzbauteile nach 100 Jahren gegen Null.

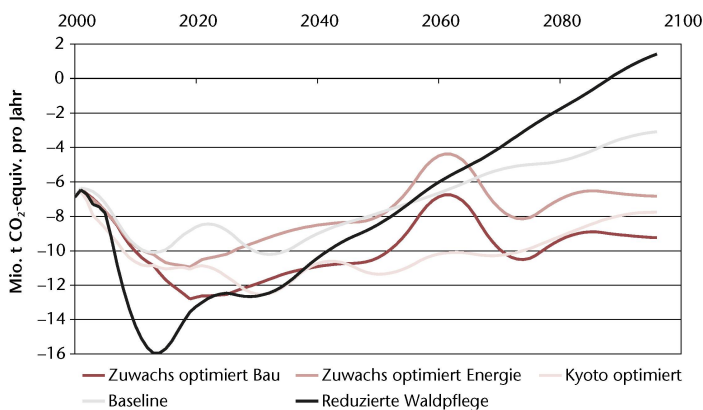


Abb 6 Summe der in- und ausländischen CO₂-Effekte nach Szenarien, Ergebnisse pro Jahr (links) und kumuliert (rechts). Negative Werte bezeichnen eine Reduktion des CO₂-Ausstosses, positive Werte eine Erhöhung. Quelle: Taverna et al (2007).

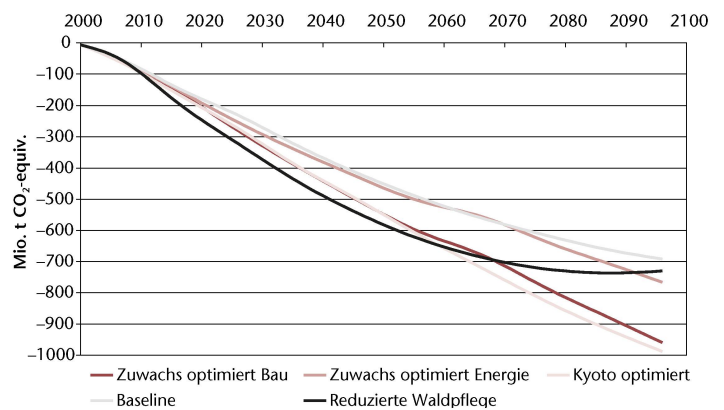
Summe der in- und ausländischen Effekte

Auch in der Summe der in- und ausländischen Effekte (Abbildung 6) weisen die Bau-Szenarien («Zuwachs optimiert, Bau» und «Kyoto optimiert») mittel- bis langfristig die beste Kohlenstoffbilanz auf. Um das Jahr 2030 werden die grössten Effekte erzielt. Es können rund 12 bis 13 Mio. t CO₂-Emissionen vermieden werden. Gegenüber 1990 ergibt das einen zusätzlichen Effekt von 8.2 Mio. t CO₂, was rund 15% der heutigen Treibhausgasemissionen der Schweiz entspricht.

Diskussion

Die hier dargestellte Untersuchung zeigt Resultate, die für die Schweiz insgesamt gelten. Räumliche Unterschiede und spezifische Verhältnisse konnten nicht berücksichtigt werden. Im Einzelnen – etwa für einen bestimmten Wald oder eine Waldregion – können die Ergebnisse daher anders aussehen. Trotzdem geben sie Hinweise hinsichtlich der Auswirkungen unterschiedlicher politischer Entscheidungen. In welchem Ausmass sich diese Entscheidungen direkt umsetzen liessen, muss aber offen bleiben. Dies gilt namentlich deshalb, weil die Interessen einzelner Akteure von denjenigen der gesamten Branche bzw. der für die Politik verantwortlichen Personen abweichen können. Zudem kann der Markt völlig andere Signale setzen, als sich die Politik wünscht. So führen die heute hohen Energiepreise in der Tendenz nicht zur primär stofflichen Verwendung aller Sortimente. Will die Politik den ökonomischen Trend übersteuern, muss sie geeignete Massnahmen treffen.

Die Untersuchung zeigt Trends auf. Auch liefert sie keine Unsicherheitsbereiche für die errechneten Resultate, eine Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse müsste daher separat erstellt werden. So müssten etwa für die unterschiedlichen Eingriffs-



konzepte im Wald die Risiken bewertet werden. Klar ist auch, dass die Ergebnisse der gewählten Bewirtschaftungskonzepte umso unsicherer werden, je weiter sie in der Zukunft liegen. Ausserdem könnten Produkte mit einer heute unvorteilhaften Ökobilanz über Prozessoptimierungen verbessert werden. Alle diese Effekte sind aber nicht Gegenstand der vorliegenden Betrachtungen.

Höhere Beiträge zur Verbesserung der Kohlenstoffbilanz im In- und Ausland könnten allenfalls durch eine Kombination verschiedener Strategien im zeitlichen Ablauf erzielt werden. Aufgrund der Kurvenverläufe liegt der Schluss nahe, zunächst einen weiteren massvollen Vorratsaufbau im Walde vorzunehmen und dann zu einer intensivierten Holznutzung überzugehen. Ob die Wälder damit ausreichend stabil bleiben bzw. inwiefern anschliessend auch die gewünschten und brauchbaren Holzsortimente zur Verfügung stehen würden, müsste näher untersucht werden.

Der Aussenhandel wurde in der Untersuchung als konstant angenommen. Damit wurde, weil methodisch noch nicht aufbereitet, die Berücksichtigung des ausländischen Waldes in der Berechnung umgangen. Diese Annahme ist natürlich nicht realistisch. Es kann aber abgeschätzt werden, dass der Mehrexport von Holzprodukten für den Bau im Ausland durchaus positive Effekte in der Kohlenstoffbilanz erzielt, dies dann vor allem im Ausland.

Schlussfolgerungen

Die möglichst weitgehende Nutzung eines hohen Zuwachses, die Verarbeitung zu langlebigen Produkten in einer Kaskadennutzung und die energetische Endnutzung nach Gebrauch führen auf Dauer zur deutlichsten Verbesserung der Kohlenstoffbilanz. Unter Kaskadennutzung wird hier verstanden, dass geerntetes Waldholz immer möglichst hochwertig verwendet wird, in erster Priorität stofflich, wenn nicht (mehr) möglich energetisch.

Verbesserungen der Kohlenstoffbilanz durch Lagerbildungen sind zeitlich limitiert. Jedes Lager – im Wald wie im Zivilisationskreislauf – erreicht über kurz oder lang seine Kapazitätsgrenzen. Zwar lassen sich im Wald trotz bereits heute hohen Vorräten immer noch erhebliche Vorratssteigerungen erreichen. Ob allerdings noch vorratsreichere Waldungen auch stabil sind, ist fraglich. Diese Frage war aber nicht Gegenstand der Untersuchung.

Die Lager im Zivilisationskreislauf sind zwar weniger bedeutend als jene im Wald, sie sind aber durch Katastrophen (z.B. Feuer) nicht im selben Ausmass gefährdet wie der stehende Holzvorrat (z.B. Stürme). Wird ein bestimmter Verbrauch an Holzprodukten aufrechterhalten, verändern sich die La-

ger im Zivilisationskreislauf mit der Zeit nicht mehr wesentlich.

Solange der Verbrauch an Holzprodukten anhält, ist der Substitutionseffekt durch die materielle und energetische Nutzung von Holz im Vergleich zu den Lagereffekten bedeutend und anhaltender. Da niemand ein Holzlager im Zivilisationskreislauf allein zur Kohlenstoffbindung anlegen würde, ist der Lager-effekt hier eine willkommene Nebenerscheinung.

Ergebnisse der Modellierung führen zu einem nachhaltig nutzbaren Zuwachs an Nutz- und Energieholz von 9.2 Mio m³/Jahr (Szenario «Zuwachs optimiert»). Dieser Zuwachs wird bei einem leicht höheren Vorrat als dem heutigen erreicht. Das bedeutet, dass aus Sicht eines möglichst hohen Zuwachses eine Reduktion des Holzvorrates im Wald nicht opportun erscheint.

Die Nachfragesituation und die steigenden Holzpreise im Winter 2006/2007 haben deutlich aufgezeigt, dass der Aufbau von Vorräten im Wald zwecks Anrechnung im Rahmen der Kyoto-Verpflichtungen keine Selbstverständlichkeit ist. Die lange Jahre beobachtete Unternutzung der Schweizer Wälder kann ausserordentlich rasch in eine Übernutzung kippen.

Liegen bleibender Schlagabraum, der energetisch genutzt werden könnte, bedeutet ein ungenutztes Potenzial. Steigende Holzpreise bieten Anreiz, diesen vermehrt zu verwenden. Zur besseren Ausnutzung der Biomasse sind geeignete Techniken teilweise noch zu entwickeln. Die vollständige Nutzung der Biomasse steht jedoch in einem gewissen Gegensatz zu Anforderungen der Biodiversität, welche eine ausreichende Menge an Totholz verlangt.

Wegen der hohen Substitutionseffekte der energetischen Holznutzung erweist sich die möglichst vollständige und effektive energetische Restholz- und Altholznutzung als eine Schlüsselstrategie zur Minderung der inländischen Treibhausgasbilanz.

Um die Substitutionseffekte aus der materiellen Verwendung von Holz aus Schweizer Sicht zu optimieren, muss Holz vorwiegend in der Konstruktion eingesetzt werden. Dadurch werden energieintensive, im Inland hergestellte Produkte aus anderen Materialien substituiert. Im Gegensatz dazu tritt der Substitutionseffekt bei Produkten des Ausbaus vorwiegend im Ausland auf, da die Substitute bzw. ihre Vorstufen in der Regel importiert werden. ■

Eingereicht: 21. Dezember 2007, akzeptiert (mit Review): 5. Mai 2008

Dank

Die Studie wurde in enger Zusammenarbeit erarbeitet mit Klaus Richter, Abt. Holz, Empa, sowie Hans-Peter Bader und Ruth Scheidegger, Abteilung Systemanalyse und Modellierung, Eawag, Dübendorf.

Literatur

- BUCHANAN AH, LEVINE SB (1999) Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions. *Environ Sci Policy* 2: 427–437.
- BUWAL (2004) Branchenprofil der Wald- und Holzwirtschaft. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Umwelt-Materialien 187. 192 p.
- DE JONG BH, MASERA O, OLGUÍN M, MARTÍNEZ R (2007) Greenhouse gas mitigation potential of combining forest management and bioenergy substitution: A case study from Central Highlands of Michoacan, Mexico. *For Ecol Manage* 242: 398–411.
- ERIKSSON E ET AL (2007) Integrated carbon analysis of forest management practices and wood substitution. *Can J For Res* 37: 671–681.
- FISCHLIN A ET AL (2006) CO₂-Senken und -Quellen in der Holzwirtschaft. Anrechnung im Rahmen des Kyoto-Protokolls. Bern: Bundesamt Umwelt, Umwelt-Wissen 0602. 45 p.
- HOFER P, TAVERNA R, RICHTER K, WERNER F (2002A) Gebäudepark als Holzlager. Zürich: Geo Partner. 57 p.
- HOFER P, TAVERNA R, RICHTER K, WERNER F (2002B) Senkenleistung und Materialsubstitution beim Schweizer Gebäudepark im Hinblick auf die nationale Treibhausgasbilanz. Zürich: Geo Partner. 54 p.
- JUNGMEIER G, RESCH G, SPITZER J (1998) Environmental burdens over the entire life cycle of a biomass CHP plant. *Biomass Bioenergy* 15: 311–323.
- KOCH P (1992) Wood versus nonwood materials in U.S. residential construction: some energy related global implications. *For Prod J* 42 (5): 31–42.
- MARCERA RI, LAU KK (1992) Carbon dioxide implication of building materials. *J For Eng* 3: 37–43.
- MARLAND G, SCHLAMADINGER B (1998) Forests for carbon sequestration or fossil fuel substitution? A sensitivity analysis. *Biomass Bioenergy* 13: 389–397.
- METZ B, DAVIDSON OR, BOSCH PR, DAVE R, MEYER LA, EDITORS (2007) *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge Univ Press. 851 p.
- PINGOUD K, LEHTILÄ A (2002) Fossil carbon emissions associated with carbon flows of wood products. *Mitigation Adaptation Strategies Global Change* 7: 63–83.
- SATHRE R (2007) Life-cycle energy and carbon implications of wood-based products and construction. Östersund: Mid Sweden Univ, PhD Thesis. 115 p.
- SEDJO RA (2002) Wood materials used as a means to reduce greenhouse gases (GHGS): an examination of wooden utility poles. *Mitigation Adaptation Strategies Global Change* 7: 191–200.
- SKOG KE, NICHOLSON GA (1998) Carbon cycling through wood products: the role of wood and paper products in carbon sequestration. *For Prod J* 48 (7/8): 75–83.
- TAVERNA R, HOFER P, WERNER F, KAUFMANN E, THÜRIG E (2007) CO₂-Effekte der Schweizer Wald- und Holzwirtschaft. Bern: Bundesamt Umwelt, Umwelt-Wissen 0739. 102 p.
- THÜRIG E, KAUFMANN E (2008) Waldbewirtschaftung zur Senkenerhöhung? Mögliche Konfliktfelder und Synergien. *Schweiz Z Forstwes* 159: 281–287. doi: 10.3188/szf.2008.0281
- WERNER F, RICHTER K (2007) Wooden building products in comparative LCA; a literature review. *Int J Life Cycle Ass* 12: 470–479.
- WERNER F, TAVERNA R, HOFER P, RICHTER K (2006) Greenhouse gas dynamics of an increased use of wood in buildings in Switzerland. *Clim Chang* 71: 319–347.

Nutzung des geernteten Holzes – Substitution und Senkenwirkung

Der Treibhausgaseneffekt kann durch die Verwendung von Holz für Produkte und als Energieträger gemindert werden. Die Auswirkungen verschiedener Holzverwendungen über mehr als 100 Jahre lassen sich mittels Simulationen der Holzflüsse, der Substitutionseffekte und der Holzlager aufzeigen. Daraus lassen sich folgende klimapolitisch optimierte Handlungsempfehlungen für die Wald- und Holzwirtschaft ableiten: 1) Erzeugung eines möglichst grossen, aber nachhaltigen Zuwachses im Wald. 2) Abschöpfung dieses Zuwachses durch Holzernte. 3) Verarbeitung des geernteten Holzes in einer Kaskadennutzung. 4) Energetische Endnutzung des nicht mehr weiterverwendbaren Abfall- und Altholzes.

Utilisation du bois récolté – effets de substitution et de puits de carbone

Il est possible de réduire l'effet de serre en utilisant le bois sous toutes ses formes et aussi comme source énergétique. Les effets des différentes utilisations du bois se démontrent par simulations: employant le flux de bois, les effets de substitution, les stocks de bois en forêt et en forme de produits sur une période de plus de 100 ans. Pour une politique optimale de l'économie de la forêt et du bois, afin de créer un bilan CO₂ plus équilibré, ces recherches permettent les recommandations suivantes: 1) créer un accroissement maximal mais durable de la forêt, 2) récolter continuellement cet accroissement, 3) transformer la récolte du bois en produits de longue durée autant que possible, 4) utiliser les résidus de bois et les produits en fin de cycle de vie comme source d'énergie.