

# Optionen und Maßnahmen



UniNETZ –  
Universitäten und Nachhaltige  
Entwicklungsziele

Österreichs Handlungsoptionen  
zur Umsetzung  
der UN-Agenda 2030  
für eine lebenswerte Zukunft.



# Naturverträgliche Kohlenstoffspeicherung

## 13\_11

Target 13.2

### Autor\_innen:

Erb, Karlheinz (*Universität für Bodenkultur*); Gratzner, Georg (*Universität für Bodenkultur*); Horvath, Sophia-Marie (*Universität für Bodenkultur*); Kirchner, Mathias (*Universität für Bodenkultur*); Spittler, Nathalie (*Universität für Bodenkultur*); Wenzel, Walter (*Universität für Bodenkultur*); Gingrich, Simone (*Universität für Bodenkultur*).

### Reviewer:

Welle, Torsten (*Naturwald Akademie GmbH*)

## Inhalt

3		Abbildungsverzeichnis
4	13_11.1	Ziele der Option
4	13_11.2	Hintergrund der Option
8	13_11.2.1	Status quo in Österreich und Global - <i>production and consumption perspectives</i>
11	13_11.2.2	Generelle Prinzipien der Umsetzung von Maßnahmen zur Kohlenstoffspeicherung
13	13_11.3	Optionenbeschreibung
13	13_11.3.1	Beschreibung der Option bzw. der zugehörigen Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen
18	13_11.3.2	Beschreibung von potenziellen Konflikten und Systemwiderständen sowie Barrieren
19	13_11.3.3	Beschreibung des Transformationspotenzials
20	13_11.3.4	Umsetzungsanforderungen
21	13_11.3.5	Erwartete Wirkungsweise
21	13_11.3.6	Zeithorizont der Wirksamkeit
22	13_11.3.7	Vergleich mit anderen Optionen, mit denen das Ziel erreicht werden kann
23	13_11.3.8	Interaktionen mit anderen Optionen
24		Literatur

## Abbildungsverzeichnis

- 8 **Abb. O\_13-11\_01:** AFO-LU Treibhausgasbilanz 2020 der Komponenten Landwirtschaft (A) und Landnutzung und Forstwirtschaft (FOLU). N.B. Nicht-CO<sub>2</sub> Emissionen von FOLU sind nicht dargestellt und belaufen sich auf rund 150 ktCO<sub>2</sub>eq/a. Quelle: Anderl et al. (2022). Der Markierungspunkt in der linken (A) Säule bezieht sich auf das Saldo der gesamten AFOLU Emissionen, der der rechten (FOLU) Säule auf das Saldo der einzelnen FOLU Posten.
- // **Fig. O\_13-11\_01:** AFO-LU 2020 greenhouse gas balance of agriculture (A) and land use and forestry (FOLU) components. N.B. Non-CO<sub>2</sub> emissions from FOLU are not shown and amount to about 150 ktCO<sub>2</sub>eq/a. Source: Austria's National Inventory Report 2021 (Anderl et al., 2022). The marker in the left (A) column refers to the balance of total AFOLU emissions, that of the right (FOLU) column to the balance of individual FOLU items.

### 13\_11.1 Ziele der Option

Das zentrale Ziel dieser Option für SDG 13 ist der Erhalt und die Erhöhung von Kohlenstoffbeständen außerhalb der Atmosphäre. Diese betreffen die Stabilisierung oder Erhöhung der Kohlenstoffspeicher (C-Speicher) und die Erhöhung der Verweildauer von Kohlenstoff (C) in land- und forstwirtschaftlichen Böden, Wald-Biomasse und in Biomasseprodukten in Österreich, aber auch die jeweiligen Kohlenstoffbestände in Ländern, aus denen Österreich Biomasse (Materialien, Energieträger, Nahrungs- und Futtermittel) bezieht.

Beinahe alle Klimaszenarien gehen für das Erreichen von 1,5 oder 2,0 Grad-Zielen für die globale Erwärmung von negativen Emissionen aus, die einen Teil der weiteren Emissionen kompensieren (Roe et al., 2019). Erhöhung der Kohlenstoffbestände in Landökosystemen ist hier eine der wichtigsten Maßnahmen (*natural climate solutions* or *nature based solutions*) (Griscom et al., 2017; Rockström et al., 2021b). Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass diese Option sich zwar unmittelbar und auch in großem Umfang mindernd auf die Emissionsbilanz auswirkt, aber durch Sättigungseffekte der Bestände zeitlich beschränkt ist. Die Option kann gezielt genutzt werden, um Zeit für die Dekarbonisierung z. B. des Energiesystems zu *kaufen*, sie kann aber nicht als langfristige (im Sinne von mehreren Dekaden bis Jahrhunderten) Lösung der Klimakrise angesehen werden.

Diese Option baut auf den Ausführungen/Maßnahmen des Referenzplan als Grundlage für einen wissenschaftlich fundierten und mit den Pariser Klimazielen in Einklang stehenden Nationalen Energie- und Klimaplan für Österreich (Ref-NEKP; Kirchengast, et al., 2019) auf und erweitert bzw. ergänzt diese. Während im Referenz-Nationalen Energie- und Klimaplan (Ref-NEKP) die enge Verflechtung mit anderen Themenfeldern und Sektoren im Zentrum stehen, werden hier die Möglichkeiten und Maßnahmen in der Tiefe beleuchtet.

### 13\_11.2 Hintergrund der Option

Terrestrische Ökosysteme spielen eine wichtige Rolle in der Regulation des Weltklimas, insbesondere weil sie in Vegetation und Boden große Mengen Kohlenstoff binden, der sonst in der Atmosphäre akkumulieren und das Klima weiter anheizen würde. Während die Pflanzen global einen Bestand von 450 (380–536) GtC ausmachen, rund die Hälfte des Kohlenstoffbestandes der Atmosphäre (860 GtC), bilden Böden mit 1500-2400 GtC das größte Reservoir, und in Permafrost-Böden sind weitere 1700 GtC gebunden (Friedlingstein et al., 2020). Diese großen Bestände stehen im Austausch mit der Atmosphäre, indem sie Kohlenstoff, z. B. in Form von CO<sub>2</sub>, an die Atmosphäre abgeben und aus dieser aufnehmen. Diese Flüsse sind, einzeln betrachtet, die größten des globalen Kohlenstoffkreislaufes, Ein- und Austräge sind jedoch beinahe gleich groß. Obwohl gesellschaftliche Eingriffe zu deutlichen Emissionen durch Landnutzung führen (1,6 GtC/a), wirken terrestrische Ökosysteme in Summe heute als Netto-C-Senke, weil sie 3,4 GtC/a aufnehmen. Dieser *residual sink* oder *SinkLand* genannte Kohlenstofffluss ist eine berechnete Größe (das Saldo aus bekannten Emissionen und Senken), und die dahinterliegenden Mechanismen sind bis dato nur teilweise geklärt. Diese Senke wird in den Wäldern vermutet und kann auf natürliche Veränderungen, aber auch auf langfristige Effekte vergangener Landnutzung, besonders in den Regionen mit langer Landnutzungsgeschichte (zumeist in den gemäßigten und borealen Klimazonen gelegen), zurückzuführen sein (Arneeth et al., 2017; Erb et al., 2013). Wie sich die Aufnahmefähigkeit globaler Ökosysteme unter dem sich

ändernden Klima in Zukunft verändern wird, ist schwer abzusehen (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019). Durch Prozesse wie das Auftauen des Permafrostes wird befürchtet, dass die derzeit beobachtete C-Senke bei fortschreitendem Klimawandel und gleichbleibender Landnutzung nicht aufrecht bleiben wird (IPCC, 2018).

Innerhalb der terrestrischen Ökosysteme ist die Aktivität, die derzeit für die meisten C-Emissionen aus der Landnutzung verantwortlich ist, die Entwaldung in tropischen Ländern des Globalen Südens. Allerdings ist ein wesentlicher Anteil der tropischen Entwaldung auf landwirtschaftliche Expansion für die Exportproduktion für den Globalen Norden zurückzuführen (Pendrill et al., 2019). Darüber hinaus wird durch den Import von Futter- und Nahrungsmitteln der Kohlenstoffbestand von bereits existierenden agrarischen Ökosystemen (Grünland und Acker) in anderen Regionen verringert, und entlang der Produktions- und Transportkette werden weitere Treibhausgase ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ) freigesetzt. Ein wesentlicher Teil des internationalen Handels mit Biomasse sind Futtermittel für die tierische Produktion, die wiederum im importierenden Land zu weiteren Treibhausgasemissionen aus der Tierhaltung führt (Billen et al., 2021; Gavrilova, Jonas, Erb & Haberl, 2010; Roux, Kastner, Erb & Haberl, 2020; Theurl et al., 2020) (siehe auch Optionen 08\_04: Ausstieg aus transatlantischen Sojaimporten, Reduktion von Schweinefleischproduktion, -konsum und -abfall und 02\_01: Protein Transition: Deutliche Reduktion des Fleischkonsums, gleichzeitig gesteigerter Konsum von pflanzlichen Proteinen).

In vielen Ländern des globalen Nordens hingegen, auch in Österreich (siehe unten), nehmen die C-Bestände in Ökosystemen zu, insbesondere weil die Waldflächen sich ausweiten und/oder immer mehr Biomasse pro Fläche im Wald steht. Neben Veränderungen der Waldfläche hat also auch die Art, wie Wälder genutzt werden, einen wichtigen Einfluss auf ihre Kohlenstoffbestände. Je nach Bewirtschaftungsweise und -intensität etabliert sich ein bestimmter C-Bestand auf einer Waldfläche, der im Normalfall niedriger ist, würde gar keine Bewirtschaftung erfolgen, selbst wenn nur so viel entnommen wird wie im selben Jahr nachwächst (Erb et al., 2018). Im globalen Mittel liegen die C-Bestände der beobachteten Wälder um rund 20-30 % unter jenen der potentiellen Wälder, also der Wälder, die ohne Nutzung unter heutigem Klima existieren würden. Waldmanagement und Aufforstung spielen also eine wichtige Rolle beim Schutz von Kohlenstoffsinken in Waldökosystemen (Mackey et al., 2013; Rockström et al., 2021a).

Drei Fälle von Dynamiken in C-Beständen können unterschieden werden: (i) Bestandserhalt; dieser führt zu keinen netto-Aufnahmen von Kohlenstoff in Ökosystemen oder Produkten, verhindert aber auch netto-Emissionen und ist daher eine wesentliche Klimaschutzmaßnahme; (ii) der Erhalt von Kohlenstoffsinken; dieser führt zu einer gleichmäßigen Bestandszunahme (in Ökosystemen und/oder Produkten) und kompensiert in der Emissionsberichterstattung Emissionen aus anderen Quellen. Wenn die Senkenleistung reduziert wird, führt das unmittelbar zu einem erhöhten Emissionsminderungsdruck in anderen Sektoren. (iii) eine Erhöhung der Kohlenstoffsinke; diese führt zu einer verstärkten Zunahme der Kohlenstoffbestände und kann in steigendem Ausmaß Emissionen aus anderen Sektoren kompensieren. Eine Senkenerhöhung kann unmittelbar (z. B. im Wald bei reduzierter Waldernte, weil das Waldwachstum unbeeinträchtigt von der Ernte fortschreitet) oder zeitverzögert (wenn sich auf freigewordenen landwirtschaftlichen Flächen z. B. durch die natürliche Sukzession Wald etabliert) wirksam sein.

Die Maßnahmen zum Erhalt und Ausbau von Kohlenstoffbeständen zeigen hohe Synergieeffekte mit anderen Nachhaltigkeitszielen. So können positive Effekte auf die Biodiversität erzielt werden, wenn angepasste

Baumarten und Baumartenmischungen verwendet werden und die Landschaftskonnektivität verbessert wird (Getzner et al., 2020). Wenn dies nicht der Fall ist, können solche Aufforstungen negative Biodiversitätseffekte zeigen (Gómez-González, Ochoa-Hueso & Pausas, 2020; Veldman et al., 2015). Auch wenn extensiv genutzte Weideflächen in großem Maß aufgeforstet werden, können negative Biodiversitätseffekte eintreten (Zimmermann, Tasser, Leitinger & Tappeiner, 2010). Zudem gilt es, Interessenskonflikte mit der lokalen Bevölkerung zu lösen und Problemverlagerungen in andere Sektoren oder Länder zu verhindern (Scheidel, 2019; Scheidel & Gingrich, 2020).

Wenn Holz geerntet wird, ist es nicht mehr Teil des C-Bestandes im Wald und reduziert damit den C-Bestand des Waldes im Vergleich zu einem Nicht-Nutzungs-Szenario. Wenn das Holz aber beispielsweise nicht sofort verbrannt wird, verursacht es nicht notwendigerweise sofort Emissionen an die Atmosphäre: Gesellschaften bauen durch Verwendung von langlebigen Holzprodukten (*Harvested Wood Products*) C-Bestände auf. Erst nach dem Ende des jeweiligen Produktlebenszyklus werden diese Produkte zu Abfall und somit meist zu Emissionen. Holzprodukte nehmen also selbst keinen Kohlenstoff aus der Atmosphäre auf, sondern stellen eine Verlagerung von Kohlenstoff von einem Pool (Wald) in einen anderen (Gesellschaftliche C-Bestände) dar. Sie wirken nur dann als zusätzlicher Speicher, wenn die Verweildauer von Kohlenstoff in der Gesellschaft bis zu seiner Freisetzung an die Atmosphäre länger ist als die Zeitspanne, die er sonst im Wald verbleiben würde (siehe unten). Eine Verlängerung der Verweildauer in gesellschaftlichen Beständen wirkt insofern emissionsmindernd, als der Zeitpunkt von C-Emissionen um Jahre oder Jahrzehnte in die Zukunft verlagert wird.

Die Entwicklung von Maßnahmen zur Minimierung ökosystemarer Treibhausgasemissionen und zur Stabilisierung existierender Senken steht vor der Herausforderung, dass nationale Treibhausgasinventuren, die wichtigsten Treibhausgas-Monitoring-Instrumente von Nationalstaaten, nur teilweise relevante Informationen dafür liefern. Dort werden nämlich nur *Netto-Flüsse* zwischen Atmosphäre und Kohlenstoffbeständen in Ökosystemen und Holzprodukten berichtet, also die Summe aus Senken und Emissionen, die in einem Jahr beobachtet werden. Treibhausgasinventuren haben also gar nicht den Anspruch, alle Treibhausgas-relevanten Flüsse zwischen Atmosphäre und terrestrischen Beständen zu dokumentieren, ihr Ziel ist es die Klimawirksamkeit gesellschaftlicher Aktivitäten zu quantifizieren. Daher geben Treibhausgasinventuren in der Regel weder Aufschluss darüber, wie sich Brutto-Flüsse verändert haben, noch informieren sie darüber, welche Senke sich in Ökosystemen ohne gesellschaftliche Nutzung etabliert hätte, also welchen Effekt die Nutzung gegenüber einem *Nicht-Nutzungs-Szenario* hat.

Im Wald wirken sich durch die systemischen Zusammenhänge von Kohlenstoffbeständen und Biomasse-Ernte (hohe Ernte bedingt geringere Senke; Harmon, Ferrell & Franklin, 1990; Holtmark, 2012; Keith, Lindenmayer, Macintosh & Mackey, 2015; Marland & Schlamadinger, 1997) Maßnahmen der Emissionsminderung durch Erhalt oder Erhöhung der natürlichen Kohlenstoffbestände auf die Verfügbarkeit von Waldbiomasse für sozioökonomische Prozesse aus. Das Ziel der Option ist in diesem Sinne, zu der größtmöglichen Netto-Verminderung an Emissionen beizutragen. Da aber Kohlenstoffbestände dem ökologischen Prinzip *slow-in/rapid-out* (Körner, 2003) folgen, ist die Zeitdimension von netto-Emissionsminderungen zentral, und hier insbesondere die kurzfristigen Potenziale (diese sind im Wald wenige Jahrzehnte).

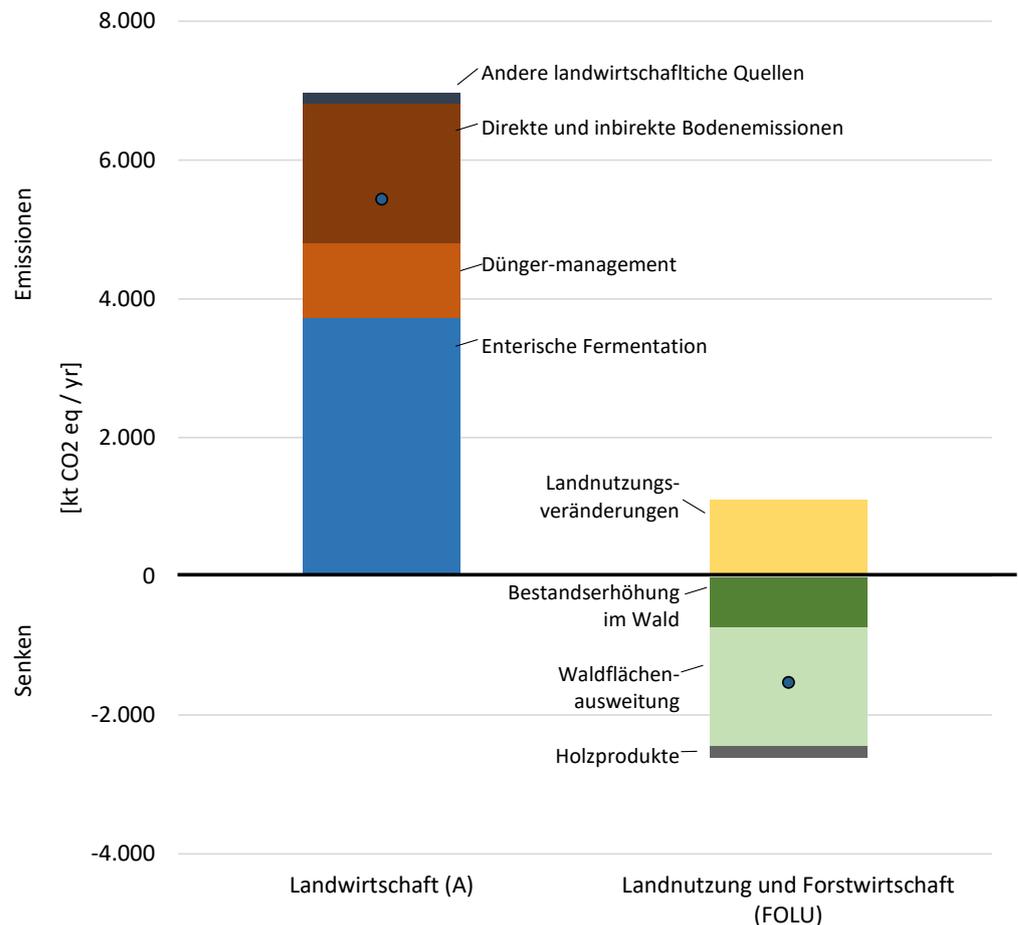
Auf landwirtschaftlich genutzten Flächen kann die Ernte z. B. durch Düngung erhöht werden. Dies kann gleichzeitig zu höheren Ernterückständen führen, die, wenn diese auf dem Feld bleiben, den Bodenkohlenstoffbestand erhöhen können. Zudem kann, wenn die Produktionsmenge unverändert bleibt, freie Fläche durch die natürliche Sukzession mittel- bis langfristig große Kohlenstoffbestände aufbauen (Wälder). Allerdings wird sowohl die höhere Ernte als auch mehr Ernterückstand durch erhöhte THG-Emissionen und andere negative Umweltwirkungen (N-Kreislauf, P-Kreislauf, Wasserkreislauf inklusive Wasserbelastung, Biodiversitätsverluste etc.) erkauft. Zudem bleiben freie Flächen häufig durch den *Rebound-Effekt* nicht frei, sondern werden wiederum kultiviert.

Es sollte klar zwischen Kohlenstoffspeicherung (bzw. Akkumulation) in spezifischen Kompartimenten (z. B. Boden, Produkte) einerseits, und netto-Sequestrierung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre im Sinne der Mitigation des Klimawandels andererseits unterschieden werden. Ein erheblicher Teil beispielsweise jener Boden-bezogenen Maßnahmen, die üblicherweise als Sequestrierung bezeichnet werden, kann sich zwar positiv auf den Humusgehalt und davon bestimmte Bodenfunktionen landwirtschaftlicher Böden auswirken, entnimmt der Atmosphäre jedoch kein  $\text{CO}_2$ , da es sich in der Regel nur um räumliche Verlagerung von Kohlenstoffbeständen handelt. Ein Beispiel dafür ist die reduzierte bzw. minimale Bodenbearbeitung. Dabei handelt es sich zumeist nur um eine vertikale Umverteilung von Kohlenstoff im Bodenprofil (Zunahme im Oberboden, Abnahme im darunterliegenden Horizont). Allerdings hat diese Maßnahme in der Regel eine positive Wirkung für die Bodenfruchtbarkeit, oder eine Reduktion der Bodenerosion zur Folge, die dennoch ihre Umsetzung trotz der geringen Bedeutung für die Mitigation durch Kohlenstoffsequestrierung sprechen. Anders verhält es sich bei Biokohle (*biochar*), also die Einbringung von Biokohle in den Boden, um damit die chemisch-physikalischen Eigenschaften, die Speicherfähigkeit für Kohlenstoff, Wasser und Nährstoffe zu erhöhen und eine langfristige Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit zu erreichen. Die meist hohe Stabilität und die Verringerung von  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen erscheint zwar vorteilhaft, die tatsächliche Wirkung auf die THG-Bilanz ist jedoch vom gesamten Lebenszyklus unter Berücksichtigung von Produktion, Transport und Opportunitätskosten gegenüber alternativen Nutzungsoptionen (z. B. energetische Nutzung) als relativ gering einzuschätzen (Paustian, Larson, Kent, Marx & Swan, 2019). Die Einbringung von Biokohle in den Böden mit dem vorrangigen Ziel der Kohlenstoffsequestrierung ist daher keine allgemein anwendbare, ökonomisch vertretbare und prioritäre Option. Positive Auswirkungen auf den Kohlenstoffaufbau können nur bei Verwendung von Biokohle aus Reststoffen ohne alternative Nutzung (z. B. Gülle, organische Abfälle, borhaltige Dämmmaterialien am Ende ihres Lebenszyklus) erzielt werden (Duboc et al., 2019).

Es wird im Folgenden daher zwischen Maßnahmen unterschieden, die Kohlenstoffspeicher erhöhen, ohne dabei eine Nettosequestrierung zu leisten (also beispielsweise Humusaufbau in der Landwirtschaft, der Erhalt von Kohlenstoffbeständen in Ökosystemen, oder der Aufbau von Kohlenstoffbeständen aus Holzprodukten), und solchen, die durch Photosynthese zu einer netto-Kohlenstoffsequestrierung aus der Atmosphäre führen.

### 13\_11.2.1 Status quo in Österreich und Global - production and consumption perspectives

In Österreich dokumentiert für das Jahr 2020 die nationale Treibhausgasinventur (Anderl et al., 2022), dass Senken in Wald und Holzprodukten 2623 ktCO<sub>2</sub>eq/a gebunden haben, also rund 4 % der nationalen Treibhausgasemissionen. Dem gegenüber stehen landwirtschaftliche Emissionen (Abb. O\_13-11\_01, linker Balken Landwirtschaft) in der Höhe von 6964 ktCO<sub>2</sub>eq/a und Emissionen aus Landnutzungsveränderungen von 1096 ktCO<sub>2</sub>eq/a (Abb. O\_13-11\_01, rechter Balken, positive Werte). Damit wirkt die Landnutzung inklusive Land- und Forstwirtschaft (AFOLU) als Kohlenstoffquelle im Ausmaß von 5437 ktCO<sub>2</sub>eq/a (Abb. O\_13-11\_01; NB nicht-CO<sub>2</sub> Emissionen aus FOLU sind hier nicht dargestellt). Die Kohlenstoffsенке im Jahr 2020 aus dem Bestandsaufbau in Wäldern machte -2450 ktCO<sub>2</sub>eq/a aus (existierende Wälder -733 ktCO<sub>2</sub>eq/a und neue Waldflächen -1717 ktCO<sub>2</sub>eq/a). Der Aufbau von Holzproduktbeständen stellte eine Senke von -173 ktCO<sub>2</sub>eq/a dar. Die Bedeutung der Holzprodukte hat zwischen den Vorjahren (2018: 1969 ktCO<sub>2</sub>eq/a; 2019: 1462 ktCO<sub>2</sub>eq/a) und 2020 aus unterschiedlichsten Gründen extrem abgenommen und der weitere Verlauf bleibt unklar.



**Abb. O\_13-11\_01:** AFOLU Treibhausgasbilanz 2020 der Komponenten Landwirtschaft (A) und Landnutzung und Forstwirtschaft (FOLU). N.B. Nicht-CO<sub>2</sub> Emissionen von FOLU sind nicht dargestellt und belaufen sich auf rund 150 ktCO<sub>2</sub>eq/a. Quelle: Anderl et al. (2022). Der Markierungspunkt in der linken (A) Säule bezieht sich auf das Saldo der gesamten AFOLU Emissionen, der der rechten (FOLU) Säule auf das Saldo der einzelnen FOLU Posten.

**// Fig. O\_13-11\_01:** AFOLU 2020 greenhouse gas balance of agriculture (A) and land use and forestry (FOLU) components. N.B. Non-CO<sub>2</sub> emissions from FOLU are not shown and amount to about 150 ktCO<sub>2</sub>eq/a. Source: Austria's National Inventory Report 2021 (Anderl et al., 2022). The marker in the left (A) column refers to the balance of total AFOLU emissions, that of the right (FOLU) column to the balance of individual FOLU items.

Die jährliche Bestandszunahme in Wäldern ist allerdings in den letzten Jahrzehnten deutlich zurückgegangen, in den 1990er Jahren schwankte sie noch zwischen 9000 und 19000 ktCO<sub>2</sub>/a, und auch die Zunahme in Holzprodukten war damals höher als heute. Die Tatsache, dass der Holzeinschlag in Österreich seit 2007 im Mittel bei 88 % des jährlichen Zuwachses liegt, in Betrieben über 200 ha seit 2000 bei über 100 % (Gschwandtner, 2019), weist darauf hin, dass die Nutzungsintensität in österreichischen Wäldern in den letzten Jahren schon an oder über der Grenze dessen war, was langfristig noch eine Kohlenstoffsenke ermöglicht (European Environment Agency (EEA), 2017).

Ein Vergleich zwischen den derzeit beobachteten C-Beständen in Österreichs Ökosystemen und den biophysikalisch möglichen C-Speicherpotentialen gibt Aufschluss darüber, wie groß die maximalen Mengen an C sind, die aus der Atmosphäre in Österreich aufgenommen werden können, wobei Zielkonflikte mit anderen Ökosystemleistungen (Lebensmittelproduktion, Biodiversität, Landschaftsästhetik, etc.) berücksichtigt werden müssen. Im Vergleich zur potentiellen Vegetation liegt der C-Bestand österreichischer Ökosysteme bei weniger als 50 %, wobei die größte Differenz durch landwirtschaftliche Nutzung potenzieller Waldflächen zustande kommt (Gingrich, Erb, Krausmann, Gaube & Haberl, 2007). Innerhalb derselben Landnutzungskategorie ist die Differenz auf Waldflächen (und hier in der Vegetation) am größten. Auf nicht mit Bäumen bestockten Ackerflächen, wo C dauerhaft nur im Boden gespeichert wird, wurden die Speicherpotentiale vermutlich in den letzten Jahrzehnten bereits weitgehend ausgeschöpft.

Zugleich ist Österreich stark in den internationalen Handel mit land- und forstwirtschaftlichen Produkten eingebunden (Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database (FAOSTAT), 2021; Kalt & Amtmann, 2014) und übt damit Einfluss auf Kohlenstoffbestände außerhalb des österreichischen Territoriums aus. Österreich ist ein Netto-Importeur von land- und forstwirtschaftlicher Biomasse. Besonders im Handel mit Holz und Holzprodukten unterscheiden sich Importe und Exporte: Während vorwiegend Sägeholz und Rundholz importiert wird, werden Schnittholz und verarbeitete Holzprodukte wieder exportiert. Laut FAOSTAT war Österreich im Zeitraum zwischen 1993 und 2020 hinter China, Japan, Finnland und Schweden der weltweit fünftstärkste Importeur von Industrieholz (Industrial Roundwood), seit 2016 der zweitgrößte Importeur von Rundholz (Summe aller Rohstoffkategorien), nach China. Darüber hinaus führt der weltweite Handel mit landwirtschaftlichen Produkten in Österreich zu einem jährlichen *Ackerland-Nettoimport* von ca. 405 m<sup>2</sup> pro Kopf, dem ein *Grünland-Nettoexport* von ca. 455 m<sup>2</sup> pro Jahr und Kopf gegenübersteht (Zessner et al., 2011). Ein wesentlicher Teil der Beanspruchung von Ackerland außerhalb der Staatsgrenzen geht auf den Import von Futtermitteln für die heimische Tierproduktion zurück (u. a. ungefähr 500000 t Sojakuchen pro Jahr). Trotz der hohen Exportquoten von Holz- und tierischen Produkten ist das Konsumniveau in Österreich im globalen Durchschnitt, wie in allen Industriestaaten, vergleichsweise hoch. Sowohl das hohe Konsum- wie auch Importniveau sind wichtig im Hinblick auf die Verantwortungsfrage und Frage der Klimagerechtigkeit (Steininger et al., 2014; Steininger, Lininger, Meyer, Muñoz & Schinko, 2016) und legen es daher nahe, Optionen des Kohlenstoffbestand- oder Senken-Schutzes sowohl innerhalb als auch außerhalb des österreichischen Territoriums zu berücksichtigen.

Der Landflächenbedarf eines Landes ist eng an die Produktion und an die Nachfrage nach tierischen Produkten geknüpft (Haberl, Kastner, Schaffartzik, Ludwiczek & Erb, 2012; Havlik et al., 2014; Krausmann, Erb,

Gingrich, Lauk & Haberl, 2008), daher stellt die Reduktion der Nachfrage nach tierischen Produkten eine zentrale Klimaschutzmaßnahme dar (Bajželj et al., 2014; Billen et al., 2021; Erb, Lauk, et al., 2016; Rööß et al., 2017; Theurl et al., 2020). Siehe dazu auch die Optionen des SDG 3 (z. B. Option 03\_02) und SDG 2 (z. B. Optionen 02\_01 und 02\_07), die durch diesen Zusammenhang eng mit der Option Kohlenstoffspeicherung verbunden sind. Würde die Ernährung im Inland hinsichtlich Gesamtkonsum und dessen Verteilung auf pflanzliche und tierische Lebensmittel den Gesundheitsempfehlungen (United States Department of Agriculture (USDA) & United States Department of Health and Human Services (HHS), 2010; Willett et al., 2019) entsprechen, könnten beträchtliche landwirtschaftliche Flächen freigesetzt werden und beispielsweise zum Kohlenstoffvorratsaufbau eingesetzt werden. Zessner et al. (2011) berechnet beispielsweise für Österreich, dass bei Gewährleistung der Selbstversorgung durch eine Reduktion des Konsums tierischer Produkte rund ein Viertel der Landwirtschaftsfläche freigesetzt werden kann. Diese Flächenfreisetzung könnte, unter weitgehender Beibehaltung der derzeit extensiven Grünlandbewirtschaftung, oder durch mäßige Extensivierung der aktuell intensiv bewirtschafteten Flächen (u. a. geringerer Entzug durch Verringerung der Schnitte auf 2-3 pro Jahr) sowohl ein Beitrag zum Erhalt des Kohlenstoffbestandes als auch eine zusätzliche Sequestrierung von CO<sub>2</sub> erlauben. Solche freie Flächen können auch zur Bioenergiegewinnung verwendet werden, allerdings ist der Treibhausgasereffekt eines etwaigen Vorratsaufbaus durch natürliche Sukzession (d. h. ohne gezielte Aufforstung) dem der Energiesubstitution durch Kurzumtriebswälder (mit gezielter Pflanzung) ebenbürtig – ausschlaggebend ist der Grad der Substitution von Fossilenergie (Kalt et al., 2019), der nicht zwangsläufig hoch sein muss (Harmon, 2019; Leturcq, 2020). Maßnahmen der natürlichen Sukzession sind im Allgemeinen mit weiteren Umweltverbesserungen (Verringerung von THG aus intensiver Tierhaltung, geringere Stickstoffauswaschung, geringerer Input an Betriebsmitteln, höhere Biodiversität) verbunden (Chazdon & Brancalion, 2019; Strassburg et al., 2020).

Eine Reduktion von eigentlich nicht benötigten Futter- und Nahrungsmittelimporten auf die Kohlenstoffspeicherung würde sich insbesondere auf ökosystemare C-Speicher im Globalen Süden auswirken. Dort wirkt die Landnutzung derzeit als THG-Quelle, hauptsächlich durch die Konvertierung tropischer Waldökosysteme in Ackerland (Arneth et al., 2019; Le Noë et al., 2021; West et al., 2010). Die Reduktion der Abholzung, etwa durch eine Reduktion von tierischen Produkten in der Ernährung (siehe Optionen 02\_01, 02\_06, 02\_07, und 08\_04) für die Verringerung der Umweltbelastungen als Klimaschutzmaßnahme ist ein anerkanntes, wichtiges Ziel (IPCC, 2018; Rockström et al., 2021a) und wird auch durch Modellierungen für Europa gestützt (Westhoek et al., 2014).

In Österreichs Klimaschutzplänen kommen Ökosysteme als Kohlenstoffspeicher nur am Rand vor: Der nationale Klima- und Energieplan (NEKP) sieht in der Landwirtschaft neben einer Vermeidung von Emissionen auch eine Steigerung des Bodenkohlenstoffs vor und in der Forstwirtschaft eine Erhaltung des Kohlenstoffpools bei kontinuierlicher Steigerung des Holzzuwachses und der Holzernte, wobei nach Möglichkeit die Senke aufrechterhalten werden

soll<sup>1</sup>. Dort werden die Herausforderungen der gleichzeitigen Bestands- und Ernteerhöhung zwar angesprochen, aber keine Möglichkeiten zur Auflösung des Widerspruchs vorgeschlagen. Auch in der Fachliteratur finden sich dazu keine Lösungsansätze. Umgekehrt wird im NEKP aber sowohl in der Energieverwendung (Holzpellets) als auch in der stofflichen Nutzung vermehrt auf Holz gesetzt, um damit die Verwendung von fossilen Energieträgern zu substituieren. Dies wirkt sich, wenn es sich dabei auf eine Ausweitung der Primärholzernte stützt, nicht nur negativ auf den Erhalt der gegenwärtigen Senken oder die Biodiversität aus (Camia et al., 2021; Eyvindson, Repo & Mönkkönen, 2018; Harmon et al., 1990). Durch die rapid-out/slow-in Mechanismen und auch durch die geringere Energiedichte von Biomasse (Booth, 2018; Searchinger, Beringer, et al., 2018) führt eine solche Strategie zu initialen Erhöhungen der THG-Emissionen (im Vergleich zu *Business-as-usual*-Szenarien ohne Ernteausschüttung), die erst nach mehreren Jahrzehnten kompensiert werden können (Knauf, Köhl, Mues, Olschofsky & Frühwald, 2015; Mitchell, Harmon & O'Connell, 2012; Nabuurs, Arets & Schelhaas, 2017; Ter-Mikaelian, Colombo & Chen, 2015). Dies ist im Lichte der Dringlichkeit der Klimakrise und der Etablierung von *Net-Zero*-Emissionen bis 2040-2050 keine zielführende Strategie (Norton et al., 2019; Searchinger, Beringer, et al., 2018).

Angesichts der hohen Emissionen, die Österreich als industrialisiertes Land durch Konsum und Wertschöpfung (Produktion) verursacht, und der großen Waldflächen im Land, ist daher eine aktive Förderung der Kohlenstoffsenken in Ökosystemen eine wichtige Möglichkeit, Emissionsreduktionen in anderen Sektoren zu ergänzen.

### **13\_11.2.2 Generelle Prinzipien der Umsetzung von Maßnahmen zur Kohlenstoffspeicherung**

Die zentrale Größe der Klimawirksamkeit jeglicher Maßnahmen der Emissionsminderung ist der Kohlenstoffbestand der Atmosphäre. Kohlenstoffbestände in Landökosystemen und in Artefakten halten Kohlenstoff von der Atmosphäre fern bzw. entziehen der Atmosphäre Kohlenstoff. Das fundamentale Prinzip der Option *natürliche Kohlenstoffspeicher* ist die Erhöhung der Verweildauer von Kohlenstoff und damit der Aufbau von Kohlenstoffbeständen durch Landmanagement oder durch das Verschieben von Kohlenstoff von kurz- in langlebige Kompartimente.

Von zentraler Bedeutung ist dabei die Wahl eines geeigneten Betrachtungshorizonts und einer Systemgrenze, die sicherstellt, dass alle Veränderungen von Beständen und Flüssen, die mit der Option einhergehen, auch Berücksichtigung finden. Bei dem derzeitig vorherrschenden Grad der internationalen Verflechtung der Biomasseproduktion und Versorgung ist daher eine ausschließliche Betrachtung der Kohlenstoffbestände in Österreich nicht zielführend.

Grundlegende Prinzipien zur Erreichung eines positiven Klimaschutzeffekts sind Permanenz (*permanence*), Zusätzlichkeit (*additionality*) und die Vermeidung von Auslagerungseffekten (*leakage*), wobei diesen Prinzipien – implizit oder explizit – die Betrachtung einer *Baseline* oder eines

---

<sup>1</sup> Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan für Österreich Periode – gemäß Verordnung (EU)/des Europäischen Parlaments und des Rates über das Governance-System für die Energieunion und den Klimaschutz ([https://www.bmk.gv.at/themen/klima\\_umwelt/klimaschutz/nat\\_klimapolitik/energie\\_klimaplan.html](https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/klimaschutz/nat_klimapolitik/energie_klimaplan.html)) S. 77: „Eine besondere Herausforderung der Maßnahmen in diesem Sektor liegt darin, sowohl die Produktivität zu erhalten bzw. vor allem im Bereich der Forstwirtschaft die nachhaltige Holzernte weiter zu steigern, als auch die Stabilität und einen weiteren Aufbau der biogenen Kohlenstoffspeicher – etwa durch Biomassezuwachs im Wald, Erhalt und wenn möglich Erhöhung von humusreichen Ackerflächen – zu unterstützen.“

Referenzrahmens zugrunde liegt. Für die Option *Kohlenstoffspeicherung* stellen sich diese Prinzipien folgendermaßen dar:

- **Permanenz:** Kohlenstoffbestände, insbesondere, aber nicht ausschließlich in Landökosystemen, sind in der Regel *vulnerabel*, d. h. sie können relativ schnell mobilisiert werden, bedingt durch das ökologische Prinzip *slow-in/rapid out* (Körner, 2003). Stehende Biomasse ist ein besonders dynamischer Kohlenstoffpool, der insbesondere auf Umwelt- und Landnutzungsveränderungen relativ schnell reagiert. Mobilisierungseignisse können natürlich oder durch gesellschaftliche Aktivitäten verursacht werden. Dazu gehören beispielsweise die Verringerung der Bestandspotenziale durch Verschiebungen im Auftreten von klimatischen Extremereignissen wie Feuer oder Schädlingsbefall (Seidl et al., 2017; Seidl, Spies, Peterson, Stephens & Hicke, 2016), oder die Mobilisierung der Bestände durch Landnutzungsänderungen, wie z. B. Rodung, Landnutzungsintensivierung oder Veränderung des Schutzstatus (Erb, Fetzel, et al., 2016; Seidl et al., 2019). Eine vollständige Ermittlung von Kohlenstoffspeicherpotenzialen erfordert, diese Unsicherheit explizit zu berücksichtigen. Wenn die Aufrechterhaltung der Kohlenstoffspeicher über einen gewissen Zeitraum nicht gewährleistet ist, ist auch kein Klimaschutzeffekt gegeben.
- **Zusätzlichkeit:** Zur Sicherstellung, Quantifikation und Attribution des Erhalts und des Ausbaus von Kohlenstoffbeständen ist das Prinzip der Zusätzlichkeit wichtig: Treibhausgasreduktionen sind dann zusätzlich, wenn sie ohne die Maßnahmen nicht stattgefunden hätten. Dieses Prinzip erscheint trivial, ist es aber nicht, weil Ökosysteme, z. B. durch veränderte Wuchsbedingungen, Legacy-Effekte der Landnutzung selten im Gleichgewicht sind (Erb et al., 2013; Gingrich, Lauk, Krausmann, Erb & Le Noë, 2021) und die *Distanz* zum Gleichgewicht nicht ohne weiteres bekannt sein muss. Daher kann es sein, dass die Erhöhung der Kohlenstoffbestände ganz oder teilweise auch ohne die Maßnahme erfolgen würde. Das Zusätzliche ist eng mit der Festlegung des Referenzrahmens verbunden. Ein Beispiel wäre die natürliche Erhöhung von Kohlenstoffbeständen in Böden durch klimatische Veränderungen, die in Unkenntnis der kausalen Zusammenhänge bestimmten Maßnahmen zugeschrieben wird.
- **Vermeidung von Auslagerungseffekten:** Es muss sichergestellt sein, dass jede Emissionsminderungsoption nicht zu einem Anstieg von Treibhausgasemissionen oder einer Reduktion von Kohlenstoffbeständen außerhalb der (räumlichen und zeitlichen) Systemgrenzen der Betrachtung führt. Wenn der Kohlenstoffbestandsaufbau beispielsweise mit Außernutzungsstellung in einer Region einhergeht, aber dieselbe Menge an Produkten oder Dienstleistungen konsumiert werden, können Auslagerungseffekte auftreten wie der Bezug von Rohstoffen von Regionen außerhalb der betrachteten Region. Diese Auslagerungseffekte haben das Potenzial, die Emissionsminderungen in einer Region zu kompensieren oder sogar in Nettoemissionen zu verwandeln. Ein Beispiel wäre die Verschiebung der Produktionsgebiete in andere (Welt)regionen durch die Außernutzungsstellung von schützenswerten, aber genutzten Waldflächen, oder die Aufgabe landwirtschaftlich genutzter, aber für die inländische Versorgung benötigter Flächen zugunsten von Nahrungsmittelimporten. Auslagerungseffekte sind in der Regel dann zu erwarten, wenn die Option nicht mit Maßnahmen, die auf Konsumveränderungen abzielen, begleitet ist. Maßgeblich entscheidend über die Klimawirksamkeit sind in solchen Fällen der Unterschied in der Emissionsintensität der Produktion in beiden Regionen. Als zweitgrößter Importeur weltweit von Rundholz (FAOSTAT, 2021) ist das für Österreichs Holzwirtschaft und Kohlenstoffbestände im Wald, in-

und außerhalb von Österreich, von besonderer Relevanz.

Diese drei Kriterien bedingen, dass Maßnahmen zur Emissionsminderung durch Kohlenstoffspeicherung durch Zusatzmaßnahmen abgesichert werden müssen, um robuste Wirksamkeit zu entfalten und über den Zielzeitraum zu erhalten.

Ein wesentliches Merkmal von Beständen, insbesondere, aber nicht ausschließlich, der natürlichen Kohlenstoffbestände, ist, dass sie mit der Zeit saturieren. In anderen Worten speichern Kohlenstoffpools zwar große Mengen an Kohlenstoff, aber nehmen netto nicht mehr signifikante Mengen auf. Für den Wald konnte gezeigt werden, dass diese Sättigungseffekte in der Regel nach einigen Jahrhunderten des Wachstums auftreten und bis dahin Wälder als Netto-Senke wirken (Luyssaert et al., 2008, 2021). Der Kohlenstoffbestand in gesellschaftlichen Beständen (z. B. Holz in Gebäuden) zeigt diese intrinsische Sättigung nicht. Allerdings sprechen unterschiedliche Nachhaltigkeitsziele (z. B. Reduktion der Versiegelung, Reduktion des Materialverbrauchs, aber auch Gründe der Permanenz, siehe oben) dafür, auch das Wachstum dieser gesellschaftlichen Bestände zu begrenzen. Zudem weist der Kohlenstoffbestand von Produkten üblicherweise und im Durchschnitt deutlich kürzere *Turnover*-Zeiten auf, als Kohlenstoffbestände in der Vegetation (z. B. wird die durchschnittliche Lebensdauer von Bauholz mit 50 Jahren angenommen, die von Papier und Pappe mit einem bis wenige Jahre; (Egglestone, Buendia, Miwa & Ngara (2006)).

Aufgrund der Zeit-Dimension, die für die Option so zentral ist, muss der Erhalt und Ausbau der Kohlenstoffbestände als Brückentechnologie angesehen werden, die kurz- und mittelfristig zur Reduktion von Treibhausgasemissionen beiträgt und so hilft, Zeit für die Dekarbonisierung (des Energiesektors, Industriesektors, Verkehrssektors und des Bau- bzw. Wohnsektors) zu gewinnen. In Zeithorizonten von wenigen Jahrzehnten sind der Kohlenstoffaufbau bzw. -erhalt den Substitutionsstrategien überlegen (Cowie, Pingoud & Schlamadinger, 2006; Marland & Schlamadinger, 1997; Moomaw, Masino & Faison, 2019; Norton et al., 2019).

In diesem Zusammenhang ist es wichtig anzuführen, dass die Dekarbonisierung des Energiesystems nicht auf Biomasetechnologien fußen kann. Eine signifikante Substitution des Fossilenergieeinsatzes (heute global ca. 450 EJ/a) durch Biomasse (heute bereits ca. 55 EJ/a als Brennholz; die gesamte Biomassernte beläuft sich auf ca. 250 EJ/a; (Haberl et al., 2013)) würde eine drastische Erhöhung der weltweiten Biomasse-Ernte bedingen, die durch den intrinsischen Zusammenhang zwischen Ernte und Kohlenstoffbestand in der Vegetation nicht ohne drastische Emissionen aus dem Abbau der Kohlenstoffbestände ablaufen kann. Dieser Zusammenhang von Bestandes- und Substitutionseffekt wird als *Kohlenstoffschuld* (*Carbon debt*) bzw. Paritätszeit (*parity time*) beschrieben (Nabuurs et al., 2017; Ter-Mikaelian et al., 2015).

### **13\_11.3 Optionenbeschreibung**

#### **13\_11.3.1 Beschreibung der Option bzw. der zugehörigen Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen**

Das zentrale Ziel dieser Option für SDG 13 ist der Erhalt und die Erhöhung von Kohlenstoffbeständen außerhalb der Atmosphäre. Die existierenden Kohlenstoffsinken sind integraler Bestandteil der Emissionsbilanz und ihr Erhalt ist aus diesem Grund wesentlich und bedingt damit eine Erhöhung

der Bestände in Ökosystemen oder in der Gesellschaft. Eine Erhöhung der Senkenfunktion ist durch die unmittelbare Wirksamkeit auf die Emissionsbilanz, aber auch die durch ökologisch bedingte Sättigung, eine vor allem kurzfristig hochwirksame Klimaschutzstrategie. Im Gegenzug dazu ist der Erhalt von Kohlenstoffbeständen essentiell, um Emissionen zu vermeiden.

Folgende Maßnahmen sind für eine naturverträgliche Kohlenstoffspeicherung notwendig:

**Maßnahme 1: Erhalt und Steigerung des Kohlenstoffspeichers in Waldbiomasse.**

Hier werden Maßnahmen zusammengefasst, die die mittlere Verweildauer von Kohlenstoff in Waldökosystemen verlängern. Dazu gehört die gezielte Anpassung der Baumartenzusammensetzung, die Außernutzungstellung von ökologisch wertvollen, alten (aber resilienten) Beständen und die kurz- bis mittelfristige Reduktion der Nutzungsintensität. Suffizienzstrategien sind in diesem Zusammenhang wichtig, da ohne sie Auslagerungseffekte möglich sind.

- Steigerung der Resilienz von Wäldern in Zusammenhang mit Option 15\_04: an Klimawandel angepasste Baumartenwahl, Begründung von klimawandelangepassten Mischwäldern im Sinne der ökologischen Versicherungshypothese (Yachi und Loreau, 1999), Ausweitung von Dauerwald, Durchforstungen zur Stabilitätssteigerung bei Nadelwäldern, Dichtstand in Jungwüchsen bei Laubholzbeständen und qualitätssteigernde Durchforstungseingriffe in Laubholzbeständen (und damit Schaffung der Basis für eine Steigerung der Produktlebenszeit), Anpassung von Dichte und Verteilung von Schalenwildbeständen, um schnelle Naturverjüngung nach Störungen zu ermöglichen;
- Ausweisung von (Wald-)Flächen, die außer Nutzung gestellt werden, in Zusammenhang mit Option 15\_02, das sind Flächen mit hoher Resilienz - verbunden mit Suffizienz-Strategien (siehe auch Option 12\_07), um Kompensation durch Importe zu vermeiden. Die Außer-Nutzung-Stellung ist finanziell adäquat abzugelten (siehe Option 15\_02);
- Unmittelbare, mittelfristige bis längerfristige Senkung der Nutzungsintensität und damit Bestandsaufbau, besonders in Wäldern mit hoher Zuwachsleistung und hoher Resilienz – verbunden mit Suffizienz-Strategien, um Kompensation durch Importe zu vermeiden. Durch finanziell adäquate Kompensation (z. B. Kredit-systeme, forstwirtschaftliche Subventionen, Kohlenstoffbepreisung) wird die nachhaltige, sozial verträgliche Umsetzung gewährleistet. Ein positives Beispiel hierfür, in hoher Synergie mit dem Biodiversitätsschutz, sind die existierenden Anreizsysteme zur Anreicherung von Totholz in Waldökosystemen;
  - Reduktion der Nutzungsintensität der Bundesforste, Umstellung der Bewirtschaftung der Bundesforste mit vorübergehendem (zumindest mehrere Jahrzehnte) Vorrang von nachhaltiger Kohlenstoffspeicherung und Erhalt bzw. Erhöhung der Biodiversität, durch klimawandelangepassten Bestandesumbau (z. B. Förderung von Mischwäldern). Dazu werden Rahmenbedingungen geschaffen, die dies ermöglichen, z. B. durch (1) adäquate finanzielle Kompensation und/oder (2) Änderung des Bundesforstgesetzes (BGBl. Nr. 793/1996) hinsichtlich der aktuell gesetzlich vorgeschriebenen Ausrichtung auf Erzielung des „bestmöglichen wirtschaftlichen Erfolg“ § 4, Abs. 3 (2) durch z. B. Einbeziehung des bestmöglichen Wohlfahrtsbeitrages als Zielvorgabe;
  - Reduktion und Anpassung des Holzeinschlages im Großwald, Ausweisung von Waldflächen zur gezielten Nutzungsreduktion basierend auf Kriterien wie Kohlenstoffbestand, Speicherpotenzial, Biodiversität und Wasserschutz.

Durch finanziell adäquate Kompensation (z. B. Kreditsysteme, forstwirtschaftliche Subventionen, Kohlenstoffbepreisung) wird die nachhaltige, sozial verträgliche Umsetzung gewährleistet;

- Stabilisierung des Einschlags im Kleinwald auf ein Niveau unter 80 %, gezielte finanzielle o. a. Anreize und Kompensationen zum nachhaltigen Vorratsaufbau, Abschaffung von Anreizsystemen, die darauf abzielen, Einschlag im Kleinwald zu erhöhen.
- Weiterführung und Ausbau von Anreizsystemen, die auf Totholzanreicherung in Waldökosystemen abzielen (siehe Option 15\_04);
- Gezielte Verfolgung von Suffizienzstrategien im Holz-Bereich, beispielsweise die Beschränkung der Holzbiomasse zur Energiegewinnung auf die garantierte und reine Verwertung von Reststoffen, Reduktion des allgemeinen Ressourcenbedarfs (z. B. Energieeinsatz in Raumwärme, verringerte Bautätigkeit);
- Priorisierung von langlebigen Produkten und von kaskadischer Nutzung;
- Priorisierung von Substitution durch Holz auf emissionsintensive Produkte oder Rohstoffe unter Aufrechterhaltung der Wald-Senkenleistung, ökologischer Kriterien (z. B. Totholz) und nur im Zusammenhang mit Suffizienzstrategien; dies stellt allerdings eine wesentliche Forschungslücke dar und sollte unter Wahrung des Vorsorgeprinzips verfolgt werden (siehe unten).

### **Maßnahme 2: Erhöhung des Bodenkohlenstoff- bzw. Humusgehalts auf landwirtschaftlichen Flächen**

Durch gezielte Veränderung von Bewirtschaftungsformen (Deck- und Zwischenfrüchte, Fruchtfolgen mit Tiefwurzlern, Erhalt einer mittleren Nutzungsintensität im Grünland, Etablierung von Agroforstsystemen, organische Düngung) kann in wenigen Jahren bis Jahrzehnten der Kohlenstoffspeicher in landwirtschaftlichen Böden erhöht werden.

- Der Anbau von Deck- und Zwischenfrüchten sowie diverse Fruchtfolgen unter Einbezug von Tiefwurzlern und Kulturen mit symbiontischer Stickstoffbindung ist die wirkungsvollste Maßnahme in diesem Bereich. Auch biologischer Landbau, der diese Maßnahmen als wesentliches Element enthält, kann hier angeführt werden;
- Kohlenstoffsequestrierung in Grünlandböden kann in erster Linie durch mittlere Bewirtschaftungsintensität unter Einhaltung von 2-3 Schnitten im Jahr und gegebenenfalls mäßiger (Wirtschafts-)Düngung erzielt werden. Starke Extensivierung oder Intensivierung sollte vermieden werden. Erhöhung der Artendiversität im Grünland im Zuge von moderaten Extensivierungsmaßnahmen;
- Etablierung von Agroforstsystemen (siehe Option 15\_05). Damit können in relativ kurzer Zeit relevante Mengen an Kohlenstoff je Flächeneinheit gebunden werden. Limitierender Faktor ist der erzielbare Anteil in Agrarlandschaften. Hohe Synergieeffekte bei bereits vorhandenen Wind- oder Bodenschutzanlagen und mit Optionen des Biodiversitätserhalts. Zugleich gibt es Optionen einer mit den Schutzziele abgestimmten Nutzung (z. B. Energieholz, Wildobst etc.);
- Humusaufbau in landwirtschaftlich genutzten Böden durch Einträge organischer Materialien (z. B. Kompost und Wirtschaftsdünger) und das (teilweise) Belassen von Ernterückständen auf dem Feld. Aber es ist standortabhängig darauf zu achten, dass es zu keinen Störungen von Bodenfunktionen durch übermäßigen Kohlenstoffeintrag kommt. Falls es sich dabei aber lediglich um einen Transfer zwischen Kompartimenten handelt, und nicht um den Fall, dass sonst Kohlenstoff durch anderweitige Verwendung verloren gehen würde (z. B. durch energetische Nutzung der Biomasse), stellt diese Maßnahme keine Sequestrierung von

CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre dar;

- Ausweitung von reduzierter bzw. minimaler Bodenbearbeitung. Zwar handelt es sich dabei hauptsächlich um eine vertikale Umverteilung von Kohlenstoff im Bodenprofil, aber durch positive Wirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit und zur Vermeidung von Bodenerosion ist die Umsetzung trotz der geringen Bedeutung für Kohlenstoffsequestrierung empfehlenswert.

### **Maßnahme 3: Erhöhung des Kohlenstoffspeichers auf anderen Flächen**

Die Flächen von Mooren, Feuchtgebieten und Siedlungsgebieten sind, verglichen mit land- und forstwirtschaftlichen Flächen, klein, sodass hier keine großen Emissionsminderungs-Effekte zu erwarten sind. Die zu erwartenden Effekte erhöhter C-Speicher sind aber durchwegs positiv und zeigen hohe Synergien mit anderen SDGs.

- Renaturierung von Moorstandorten und Feuchtgebieten: Moore und Feuchtgebiete sind in Österreich außerordentlich gefährdete Ökosysteme, gleichzeitig gelten sie als effektiver Kohlenstoffspeicher durch die großen Mengen gebundenen Kohlenstoffs pro Landfläche (IPCC, 2019);
- Siedlungsgebiete, Städte: In Synergie mit Option 13\_03 führt die Erhöhung von Biomassebeständen, als Straßenbäume, Fassadenbegrünung, Begrünung von Dachterrassen etc. zwar zu relativ kleinen, aber durchgängig positiven Klimaschutzeffekten. Urbane Begrünung wirkt sich darüber hinaus auch positiv auf das Mikroklima aus und verringert Hitzeinseln. Ermöglicht durch Förderstrukturen und Norm-Anpassungen.

### **Maßnahme 4: Holznutzung als Kohlenstoffspeicher: Erhöhung der durchschnittlichen Lebensdauer von Holzprodukten**

Ziel dieser Option ist die Erhöhung des Kohlenstoffspeichers in Produkten durch die Verlängerung der durchschnittlichen Lebensdauer von Holzprodukten. Dies kann erzielt werden durch Maßnahmen, welche auf eine Reduktion des Anteils von kurzlebigen Produkten wie Brennholz, Pellets und Papier abzielen, etwa durch Suffizienzstrategien, oder durch Maßnahmen, die auf die Lebenszeit von Produkten wirken.

- Verlängerung der durchschnittlichen Lebensdauern von Gebäuden durch raumplanerische Ansätze/Eingriffe in die Raumordnung/ÖNORMEN. Die Lebenszeit von Gebäuden ist deutlich kürzer als jene von Wäldern. Eine Verlängerung der Lebenszeit reduziert daher den Erntedruck und die Auswirkungen auf den Kohlenstoffbestand im Wald. Zudem wird Kohlenstoff länger außerhalb der Atmosphäre gebunden;
- Entwicklung von langfristigen Nutzungskonzepten von neuerrichteten Gebäuden, insbesondere von Gebäuden mit hohem Holzanteil;
- Förderung von Produkten mit langlebigen Designs, die sich auch zur Reparatur eignen, um zu vermeiden, dass Holzprodukte (z. B. Möbel) vor dem Erreichen der Lebenszeit ausgetauscht werden;
- Reduktion des Anteils von kurzlebigen Produkten aus Holzbiomasse, z. B. Papier und Platten. Papier und Platten haben durchschnittliche Lebensspannen von weniger als einem bis zu wenigen Jahren, umfassen aber maßgebliche Produktionsmengen in Österreich. Eine Reduktion ihres Anteils im Produktionsportfolio wirkt daher direkt auf die durchschnittliche Lebensdauer des Holzprodukte-Pools;
- Beschränkung des Bioenergie-Aufkommens auf die reine Verwertung von Reststoffen der Sägeindustrie und auf stabilitätssteigernde Durchforstungen (Durch-

forstung im Sinne der ökologischen Versicherungshypothese und zur Resilienzsteigerung) sowie qualitätssteigernde Durchforstungen, die den Anteil an Holz, das in langfristige Bestände überführt werden kann, nachweislich erhöhen).

#### **Maßnahme 5: Schutz der Kohlenstoffbestände, die durch österreichischen Konsum und Wertschöpfung im Ausland verändert werden**

Österreich belegt durch seinen gesellschaftlichen Stoffwechsel große Landflächen außerhalb des eigenen Territoriums, unter anderem in Gebieten mit Abholzung oder Landdegradation. Sowohl durch Regelungen, die die Herkunft von Biomasse betreffen, als auch durch Umstellung der Wertschöpfungsketten und Nachfrage kann diese globale Auswirkung deutlich reduziert werden mit hoher Klimaschutzeffizienz. Zudem ist eine Vorbildwirkung erwartbar.

- Entwicklung eines Lieferkettengesetzes für Österreich (ähnlich wie jenes in Deutschland), das Konzerne verpflichtet, ihre Lieferketten transparent zu machen, und sie für die Einhaltung von Umweltstandards (z. B. Entwaldung) entlang der gesamten Lieferkette haftbar macht. Damit werden Konzerne dazu gebracht, auf die Einhaltung von Umweltstandards bei Zulieferer\_innen zu achten, und Konsument\_innen, aber auch z. B. Aktionär\_innen erhalten wertvolle Information, die ihre Kaufentscheidungen beeinflussen (siehe auch: Vorschlag der EU-Kommission zu einer Verordnung, die von der EU mitverursachte Entwaldung und Waldschädigung auf ein Minimum zu reduzieren<sup>2</sup>);
- Schaffung politischer Rahmenbedingungen für eine Umstellung der Ernährung auf einen deutlich geringeren Anteil tierischer Produkte, etwa durch Schaffung von Kostenwahrheit (z. B. über Besteuerung mit sozialem Ausgleich sowohl auf Produzent\_innen- als auch Konsument\_innenseite, ähnlich der CO<sub>2</sub>-Steuer), begleitet von Strategien der Reduktion von Futtermittelimporten und – mit entsprechenden Übergangsfristen – Anpassungen der Fördersysteme (z. B. ÖPUL). Muss mit gezielten Maßnahmen flankiert werden, die die häufig auftretenden *Rebound*-Effekte vermeiden und dazu führen, die freien Flächen tatsächlich als Kohlenstoffspeicher zu nutzen. Dies hat eine nationale wie auch eine internationale Komponente;
- Schaffung politischer Rahmenbedingungen für eine Reduktion des Abfall-Aufkommens in Nahrungsproduktion und -konsum. Internationalen Schätzungen zufolge beläuft sich der Abfall-Anteil der Nahrungskette auf 30 % der Primärbiomasseproduktion. Reduktionen dieses Anteils tragen damit hochwirksam zur Reduktion des Landbedarfs dar;
- Neben verbindlichen gesetzlichen Maßnahmen wie einem Lieferkettengesetz, kann zusätzliches *Labelling* dazu führen, dass importierte Produkte (z. B. Holz, Schokolade, Fleisch) ohne Entwaldung auch als solche gekennzeichnet werden. *Labelling*-Systeme sind allerdings im Moment nicht treffsicher und schwer nachvollziehbar. Aber eine Überarbeitung der *Labelling*-Systeme, unter anderem in eine Richtung, dass auch Kohlenstoffbestandseffekte robust und ganzheitlich abgebildet werden, kann zur Erhöhung der Effizienz der Maßnahmen beitragen;
- Suffizienzstrategien bei *forest-risk commodities*: Der Import bestimmter Produkte wie Palmöl aus Südostasien oder Soja und Rindfleisch aus Lateinamerika sind für einen großen Anteil der globalen tropischen Entwaldung verantwortlich. Eine

<sup>2</sup> [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/qanda\\_21\\_5919](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/qanda_21_5919)

Umstellung des Konsums (weniger tierische Produkte, weniger hochverarbeitete Produkte) in Österreich kann aktiv dazu beitragen, effektiv weitere Emissionen aus Entwaldung zu verhindern.

### **13\_11.3.2 Beschreibung von potenziellen Konflikten und Systemwiderständen sowie Barrieren**

Eine Extensivierung oder Außernutzungsstellung von Flächen in der Landwirtschaft sowie in der Forstwirtschaft stellt immer eine Konkurrenz mit der jeweiligen opportunen Nutzung dar. Besonders deutlich wird dies, wenn Flächen zur Nahrungsmittelproduktion bereitstehen sollen. Es empfiehlt sich daher eine Abstimmung mit regionalen Plänen zur Ernährungssicherung und Siedlungsentwicklung (siehe auch Option 15\_15: „*Wie verwenden wir das Land: Festlegen einer verbindlichen Regionalplanung auf Ebene der Bundesländer zur Verminderung von Flächenverlusten*“). Insbesondere empfiehlt es sich, Weichenstellungen und Konzepte für nachhaltige Ernährungsstile, also u. a. Reduktion des Fleischkonsums und des Lebensmittelabfalls, bereits kurzfristig umzusetzen (siehe Optionen 02\_01, 02\_07 und 02\_08 in SDG 2). Außerdem haben sie ökologisch weitere Vorteile, da sie extensivere Nutzungen ermöglichen (Vorteile für die Biodiversität auf Acker- und Grünlandflächen, für Klimaschutz, Bodenschutz, Gewässerschutz, geringeres Abfallaufkommen, geringerer Flächenverbrauch) und somit den Druck in Richtung Intensivierung reduzieren. Maßnahmen, die die Etablierung anderer, nicht kohlenstoffspeicher-aufbauende Nutzungen auf freigewordenen Flächen vermeiden, sind wichtig, um einen positiven Klimaschutzeffekt zu erzielen. Insbesondere bedingt eine Strategie der erhöhten Kohlenstoffspeicher eine Anpassung der etablierten Fördersysteme der Land- und Forstwirtschaft, einerseits, um Anreize zu schaffen, andererseits um kurz- und mittelfristig Einkommensentfall durch die Priorisierung der Ökosystemleistung Kohlenstoffspeicherung zu kompensieren.

Aufgrund der flächenmäßig hohen Bedeutung des Waldes in Österreich kommt es in einigen Bereichen zu einem Interessenskonflikt bei der Umsetzung von Waldbewirtschaftungsmaßnahmen oder Veränderungen in der Holznutzung. Hier können beispielhaft ein paar prominente Nutzungskonflikte angeführt werden:

- Die finanzielle Abgeltung von **bisher nicht geförderten** Waldökosystemleistungen, deren ökonomisch-äquivalenter Wert als sehr hoch einzuschätzen ist (Getzner et al., 2020), ist oft mit großen Widerständen verbunden, da die Gesellschaft eine hohe Erwartungshaltung an die Erbringung der Leistungen der Forstwirtschaft hat. Derzeit nicht marktfähige Leistungen marktfähig zu machen, birgt daher viele rechtliche und soziale Herausforderungen;
- Die Forst- und Holzwirtschaft macht 3,2 % der österreichischen Wirtschaftsleistung aus und sichert 300.000 Arbeitsplätze. Sollten Suffizienzstrategien in der Holzverarbeitung und -verwendung implementiert werden, müssen Lösungen mit allen Betroffenen aus dieser Branche gefunden werden.

Naturverträgliche Kohlenstoffspeicherung und eine intensivierete Biomasseverwendung sind nur begrenzt kompatibel, daher gibt es Zielkonflikte auch mit bestimmten Maßnahmen, die eigentlich auf Klimaschutz abzielen. Dies betrifft insbesondere folgende Punkte:

- Die Bioökonomie setzt auf Substitution von fossilen durch nachwachsende Rohstoffe. Da der Ressourcenverbrauch in Österreich sehr hoch ist, wird eine reine Substitution der Erhaltung und Erhöhung von C-Speichern in Ökosystemen entgegenwirken. Daher sind Suffizienzstrategien so wichtig, die neben der Substitution auch auf eine Verlängerung der Produktlebensdauer und eine Reduktion des

Materialdurchsatzes abzielen (siehe auch Option 15\_17);

- Der verstärkte Umstieg auf Biomasse kann zu *versteckten* Emissionen führen, wenn Bioenergie a-priori als klimaneutrale Energieform betrachtet wird, ohne die Kohlenstoffflüsse gesamthaft zu bilanzieren. Hier gilt es, bei der Energiewende sicherzustellen, dass Biomasseverwendung nur dann als klimaneutral angesehen wird, wenn sie den Schutz von C-Senken nicht gefährdet.

Neben diesen gesellschaftlichen Barrieren und Konfliktfeldern können auch negative ökologische Auswirkungen auftreten. Übermäßige Kohlenstoffeinträge in den Boden können das standortgemäße Fließgleichgewicht stören, und sich damit negativ auf Bodenfunktionen, insbesondere Bodenfruchtbarkeit und mikrobiellen Stoffumsatz auswirken. Zudem wird der Kohlenstoff bei hohen Eintragsraten nur unzureichend stabilisiert, kann also sehr rasch wieder mikrobiell abgebaut und als CO<sub>2</sub> an die Atmosphäre abgegeben werden. Ähnlich verhält es sich bei der Aufforstung frei gewordener landwirtschaftlicher Flächen (etwa durch Nachfrageveränderungen), die, wenn sie nicht standortgerecht und unter ökologischen Gesichtspunkten erfolgt, mit negativen Auswirkungen auf Biodiversität, Wasserhaushalt oder Resilienz verbunden sein kann.

### **13\_11.3.3 Beschreibung des Transformationspotenzials**

Die relative Priorisierung der Kohlenstoffspeicherung über die Produktionsfunktion von Landökosystemen ist eine Naturschutzmaßnahme und bedarf der Finanzierung, etwa durch Mittel aus der GAP, aus ökologischen Steuern oder weiteren Fördertöpfen. Hohe Synergien mit Option 15\_02 (Ökoflächen) sind gegeben und stellen einen wesentlichen Schritt für die Weiterentwicklung der Gesellschaft hin zu einer verträglicheren Gesellschaft-Naturbeziehung dar. Die Priorisierung der Kohlenstoffspeicherungsfunktion und die Betonung der Konsumstrategien im Rahmen der Bioökonomie repräsentieren eine Internalisierung von Umweltexternalitäten, die wiederum helfen kann, Zielkonflikte zu vermeiden bzw. zu kompensieren.

Die Option *naturverträgliche Kohlenstoffspeicher* ist mit grundlegenden Umgestaltungen der derzeitigen Landnutzung verbunden. Daher kann nur eine Beteiligung der Betroffenen und Einbindung von Stakeholder\_innen eine hohe Akzeptanz und damit Umsetzbarkeit der Maßnahmen gewährleisten. Den Agrar- und Forstbehörden kommt hier eine besondere Bedeutung in der Organisation der Prozesse zu, dazu ist eine Ausrichtung der Agrarbehörden an einem neuen Naturschutz-Leitbild erforderlich.

Maßnahmen der Kohlenstoffspeicherungen im Wald sind bei Wahrung von best-practice-Ansätzen direkt mit der Erhaltung der Biodiversität verbunden, da diese einen großen Teil der Landfläche betreffen (rund die Hälfte der Landesfläche trägt Wald). Eine Kohlenstoffspeicher-orientierte Nutzung der Wälder kann dazu beitragen, die derzeitige Nutzungsintensität von 88 % (Nutzung zu Zuwachs) in Richtung der von der Europäischen Umweltagentur empfohlenen 70 % zu gehen – oder darüber hinaus, um ökologische Schäden zu minimieren.

In Verbindung mit Naturschutzansätzen (Prozessschutz in Naturwaldreservaten, Kernzonen in Nationalparks, Entwicklung von Managementplänen) können damit wesentliche Fortschritte im Bereich der SDG Ziele erreicht werden.

Die Option Kohlenstoffspeicher ist synergistisch mit mehreren Nachhaltigkeitszielen verbunden. Durch die Ausrichtung an Suffizienz-

zielen, die notwendig ist, um Auslagerungseffekte zu vermeiden, trägt sie unmittelbar zu Strategien des *decoupling* bei, also der Verringerung des Ressourceneinsatzes bei gleichzeitiger Erhöhung der Lebensqualität, wie in *The Roadmap to a Resource Efficient Europe*<sup>3</sup> dargelegt. Dabei ist ein wesentliches Element, Inkohärenzen in der land-, forst- und energiewirtschaftlichen Regulations- und Förderlandschaft zu beseitigen und umweltschädliche Subventionen abzubauen.

Zudem sind vorteilhafte Auswirkungen auf den Bereich Gesundheit zu erwarten. Die Veränderung von Konsummustern in der Ernährung, vor allem die Reduktion des tierischen Anteils in der Ernährung (in Österreich und darüber hinaus), ist eine hochwirksame Klimaschutzmaßnahme, die sich auf Produktion, Lieferketten und Konsum auswirkt. Auf der Produktionsseite sind dadurch Reduktion von Nutzungsintensität und positive Auswirkungen auf die Biodiversität zu erwarten, auf der Konsumseite sind positive Gesundheitseffekte belegt.

### 13\_11.3.4 Umsetzungsanforderungen

Die Umsetzung der Maßnahmen bedingt Veränderungen, die teilweise innerhalb der Sektoren, teilweise von übergreifender Natur sind. Veränderungen der Bodenbewirtschaftung in der Landwirtschaft oder Reduktion des durchschnittlichen Einschlages (im Einklang mit Resilienzziele) im Wald sind innerhalb der jeweiligen Sektoren umsetzbar, wenn die ökonomischen und strukturellen Anreiz- und Regulationssysteme darauf abgestellt sind (z. B. durch eine finanzielle Förderung der Kohlenstoffspeicher im Rahmen des Deckungsbeitrages oder der ÖPUL, Abgeltung der Waldökosystemleistungen, Bepreisung von Biodiversitätsverlust, etc.). Dazu ist eine Ausrichtung der jeweiligen institutionalisierten Akteur\_innen, z. B. Forst- und Agrarbehörden nach einem ökologischen Leitbild erforderlich. Ebenso sind Strategien der Raumplanung, die beispielsweise auf die Lebensdauer von Gebäuden oder des Holzkohlenstoffbestands in der Gesellschaft wirken, innerhalb der Raumplanung umsetzbar, bedürfen aber ebenso einer Ausrichtung der Institutionen an ökologischen Leitbildern und einer Veränderung des Problembewusstseins.

Im Gegensatz dazu bedingt die Vermeidung von Auslagerungseffekten, die die Vorteile von Kohlenstoff-speichermaßnahmen kompensieren – wenn nicht aufheben können – eine grundlegendere Transformation des Wirtschaftssystems, die sich nicht immer explizit und oft nur in Ansätzen in Strategien wie der Bioökonomie oder des *Green Deals* wiederfinden. Ohne die Stärkung von Suffizienzstrategien und ihre robuste Integration mit den dominierenden Effizienzstrategien kann hier wahrscheinlich kein wesentlicher Fortschritt erzielt werden. Durch die hohe Leistungsfähigkeit der Suffizienzstrategien und ihre hohe Synergie mit Gesundheit und Biodiversität ist aber ein solcher Umbau zumindest in Teilbereichen (tierische Produktion, Ausweitung der Naturschutz zonen im Wald) naheliegend und auch umsetzbar.

Eine nicht unwesentliche Umsetzungsanforderung der Option ist der Aufbau eines robusten und funktionierenden Monitoringsystems, die den Prinzipien des *Accountings* (Permanenz, Zusätzlichkeit und Auslagerungseffekten) gerecht wird. Dies bedarf einer Erweiterung der existierenden Monitoringsysteme, um beispielsweise die Abgeltung von Waldökosystemleistungen zu ermöglichen.

<sup>3</sup> [https://ec.europa.eu/environment/resource\\_efficiency/about/roadmap/index\\_en.htm](https://ec.europa.eu/environment/resource_efficiency/about/roadmap/index_en.htm) [5.1.2023]

### 13\_11.3.5 Erwartete Wirkungsweise

Der Erhalt von Kohlenstoffspeichern, etwa durch Vermeidung von Landnutzungsintensivierung (also keine Erhöhung des Holzeinschlages, keine Intensivierung der Landwirtschaft) ist unmittelbar wirksam und hält beträchtliche Mengen an Kohlenstoff von der Atmosphäre fern. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen kann nur durch konterfaktische Szenarien abgeschätzt werden, im Licht der Kurzfristigkeit der Klimaziele erscheinen sie aber als maßgeblich auch ohne Quantifizierung.

Der Ausbau von Kohlenstoffspeichern durch die Reduktion der Nutzungsintensität kann kurzfristig große Mengen an Kohlenstoff binden, was sich sofort auf die Emissionsbilanz auswirkt. Da große Flächen betroffen sind (rund die Hälfte der Landesfläche), sind sehr hohe Mitigationseffekte zu erwarten. Derzeit beträgt die Senke im Wald rund 2,4 MtCO<sub>2</sub>/a, jede vermiedene Erntemenge erhöht kurzfristig gesehen direkt diese Senke um denselben Anteil. Der Kohlenstoffaufbau im Wald ist durch die hohe Wuchleistung des Waldes auch unmittelbar wirksam und kommuniziert direkt mit den Kohlenstoffentnahmen durch Ernte. Ein Kohlenstoffaufbau, der auf freien Flächen stattfindet, ist allerdings langsamer.

### 13\_11.3.6 Zeithorizont der Wirksamkeit

Wie eingangs erwähnt, ist die Mitigations-Wirkung der Option äußerst groß und unmittelbar, insbesondere die Reduktion der Nutzungsintensität im Wald, die sich sofort in einer Erhöhung von Kohlenstoffsenken niederschlägt. Im Rahmen der UniNEtZ-Zeiträume ist diese Option kurz-, mittel- und langfristig wirksam (definiert als <2/2-5/5-10 Jahre). Mit zeitverzögerter Wirksamkeit, und möglicherweise nicht im großen Maßstab umsetzbar, ist die Verlängerung der Lebenszeit von Holzprodukten einzuschätzen, da es sich hierbei nicht ohne Weiteres um die Verlängerung der Lebenszeit existierender Produkte, sondern um neu designte Produkte handeln wird. Andere Senken, wie der Bodenkohlenstoffaufbau, Agroforstsysteme oder Bestandsaufbau auf freigewordenen Flächen (durch konsumseitige Maßnahmen), sind mittel- bis langfristig wirksam. Aufforstungen von freien Flächen müssen sozial verträglich (*Verwaldung*) und damit in nicht sehr hohem Ausmaß und langsam erfolgen, große Effekte sind durch natürliche Sukzession erst nach einem bis mehreren Jahrzehnten erwartbar.

Da Waldbiomasse, wie auch Bodenkohlenstoff, mit der Zeit jedoch sättigen (Luyssaert et al., 2008, 2021), ist die Option *Kohlenstoffspeicher* aus THG-Sicht eine *Brückentechnologie*, die ihre größte Wirksamkeit in den ersten Dekaden ihres Einsatzes hat: Senken sind einmal wirksam, binden aber große Mengen an Kohlenstoff, und zwar mit unmittelbarer Auswirkung auf die Emissionsbilanz. Daher kann die Option dazu beitragen, Zeit für die kritischen nächsten Jahrzehnte (IPCC, 2018) zu *kaufen*, um andere gesellschaftliche Sektoren zu dekarbonisieren. Im Rahmen der *UniNEtZ*-Zeiträume sind diese Sättigungseffekte jedoch erst nach mehreren Jahrzehnten bis Jahrhunderten zu erwarten (also jenseits einer als langfristig definierten Zeitspanne; Wälder nehmen in der Regel über mehrere Jahrhunderte Kohlenstoff auf. Das ist also weit länger als die übliche Umtriebszeit von Wirtschaftswäldern, die rund bei einem Jahrhundert oder

darunter liegen (Luyssaert et al., 2008, 2021). Unter Nutzungsszenarien verkürzt sich die Sättigungszeit, so saturiert beispielsweise im Bestandsaufbauszenario (Szenario reduzierter Holzernte) der Care4Paris-Studie (Weiss et al., 2020) die Wald-Senke ca. im Jahr 2110.

### **13\_11.3.7 Vergleich mit anderen Optionen, mit denen das Ziel erreicht werden kann**

Die Synergien mit anderen SDGs sind, wie in den vorigen Kapiteln bereits dargelegt, sehr hoch, insbesondere mit Biodiversität (SDG 15), Gesundheit und Landwirtschaft (SDG 2 und 3), Wasserhaushalt (SDG 6), Ressourceneffizienz (SDG 12).

- 13\_06: Korrekte und engagierte Umsetzung der neuen energie- und klimarelevanten Rechtsakte der EU
- 13\_07: Monitoring und Wirksamkeitsanalyse der (österreichischen Beiträge zur) internationalen Klimafinanzierung
- 13\_08: Klimazielfördernde Digitalisierung
- 13\_09: Bioökonomie als Beitrag zum Klimaschutz
- 13\_10: Klimaschutzorientierte Raumplanung
- 02\_01: Protein Transition: Deutliche Reduktion des Fleischkonsums, gleichzeitig gesteigerter Konsum von pflanzlichen Proteinen
- 02\_06: Krisensicherung der Ernährung und Landwirtschaft: Sicherung einer ausgewogenen und langfristigen Eigenversorgung mit Lebensmitteln durch eine nachhaltige Lebensmittelwertschöpfungskette
- 02\_07: Beitrag Österreichs zur globalen Ernährungssicherheit und einer resilienten Landwirtschaft
- 02\_08: Lokales Wissen im Bereich nachhaltiger und regionaler/standortangepasster Landwirtschaft erhalten, austauschen und weiterentwickeln
- 08\_04: Ausstieg aus transatlantischen Sojaimporten, Reduktion von Schweinefleischproduktion, -konsum und -abfall
- 12\_07: Konsum von Gebrauchsgütern in einer Kreislaufwirtschaft: nachhaltig und transformativ
- 15\_01: Ökologisierung der Landwirtschaft
- 15\_02: Rettungsinselfür die Natur: Ökoflächen in der Land- und Forstwirtschaft zur Bewältigung der Biodiversitätskrise
- 15\_03: Ökologisierung der Landnutzung - Boden
- 15\_04: Nachhaltige Waldbewirtschaftung - Naturschutzelemente im Wirtschaftswald
- 15\_05: Entwicklung und Förderung von Agroforstwirtschaft als Beitrag zur Verbesserung der Nachhaltigkeit in der Landnutzung
- 15\_06: Schutz von Fließgewässern (Feuchtgebieten & Mooren) in den Gebirgen und Erhalt ökologisch wertvoller Lebensräume
- 15\_07: Arten- und Habitatschutz im urbanen Raum
- 15\_09: Neudenken des Naturschutzes
- 15\_10: Neudenken des Bodenschutzes
- 15\_11: Evaluierung des öffentlichen Steuer- und Förderungssystems hinsichtlich Synergien und Trade-offs mit den Zielen der Österreichischen Biodiversitäts-Strategie
- 15\_12: Mainstreaming von Biodiversitätsagenden in Bioökonomie- und Klimaschutzstrategien, -maßnahmen und -forschung
- 15\_13: Biodiversitätsforschung stärken
- 15\_14: Bildungsinitiative Naturschutz und Biodiversität: Bildungsziel „Natural Natives“

- 15\_15: Wie verwenden wir das Land: Festlegen einer verbindlichen Regionalplanung auf Ebene der Bundesländer zur Verminderung von Flächenverlusten  
15\_16: Einschränken neuer Baulandwidmungen

### 13\_11.3.8 Offene Forschungsfragen

Offene Forschungsfragen bzw. Wissenslücken für die naturverträgliche Kohlenstoffspeicherung sind folgende

- Zukünftige Speicherpotenziale (welcher Wald unter welchem Klima)? Welche zukünftigen Kohlenstoffspeicher können im Lichte des Klimawandels aufrechterhalten werden? Wie wirkt sich Klimawandel auf die Kohlenstoffbestände aus, was sind die Mechanismen? Wann sättigt der Bestandsaufbau?
- Wie können landnutzungsinduzierte Bestandsveränderungen in Ökosystemen von klimainduzierten Veränderungen unterschieden werden, welche *legacy*-effekte herrschen vor?
- Unter welchen Bedingungen sind die Auswirkungen auf die Biodiversität positiv, wann negativ? Wie sind positive Auswirkungen auf Biodiversität sicherstellbar? Welche negativen Auswirkungen sind erwartbar, wie können diese gering gehalten werden?
- Wie wirkt sich der Aufbau von Kohlenstoffspeichern auf den lokalen und regionalen Wasserhaushalt aus? Wie können negative Auswirkungen verhindert werden?
- Wie kann der Erhalt von Kohlenstoffspeichern in Monitoring and *verification* integriert werden? Treibhausgasinventuren haben nicht den Anspruch, alle Treibhausgas-relevanten Flüsse zwischen Ökosystemen und Atmosphäre zu dokumentieren. Sie geben in der Regel weder Aufschluss darüber, wie die Brutto-Flüsse sich verändert haben, noch informieren sie darüber, welche Senke sich ohne gesellschaftliche Nutzung etabliert hätte, also welchen Effekt die Nutzung gegenüber einem *Nicht-Nutzungs-Szenario* hat.
- In welchem Ausmaß wird in Agroforstsystemen der Kohlenstoffzuwachs in stabilen Bodenfraktionen (20  $\mu\text{m}$ ) gebunden? Sind positive Effekte auch im Boden zu erwarten?
- Wie können Kohlenstoffflüsse außerhalb des Territoriums auf die Veränderungen in Österreich bezogen werden? Methodenentwicklung ist notwendig, um Kausalitäten rund um Auslagerungseffekte robust berechnen zu können, hier sind erst erste Ansätze in der Literatur erkennbar. Wie kann (vergangene, historische) Entwaldung für z. B. Landwirtschaft „abgeschrieben“ und auf heutige Produktionsketten bezogen werden?
- Welche alternativen Verwertungsoptionen von Kohlenstoffinputs in landwirtschaftliche Böden (z. B. Biokohle, Kompost, Belassen von Ernterückständen) sind mit welchen THG-Netto-Flüssen verbunden, wenn man auch den dahinterliegenden (*upstream*) Ressourcenverbrauch sowie Substitutionseffekte betrachtet?
- Wie können *rebound*-Effekte bei produktionsseitigen Maßnahmen verhindert werden, um die Netto-Vorteile von Kohlenstoffspeicher- und Senkenschutz nicht zu gefährden?
- Suffizienz bei Waldprodukten: Welche Holzprodukte sind substituierbar, welche Reduktion von Holzprodukten bringt Klimavorteile? Während im Energiesystem und in der Ernährung Suffizienzstrategien bereits stark beforscht werden, ist eine solche Forschung im Holzbereich noch weitgehend ausständig.
- Allokation/Attribution von Kohlenstoffbestands-Reduktionen auf Produkte: Was sind sinnvolle Abschreibe-Horizonte? Welche Allokationsmechanismen sind sinnvoll? Wie können Kohlenstoff-opportunitätskosten der Landnutzung (Bhan

- et al., 2021; Searchinger, Wirsenius, Beringer & Dumas, 2018; Steininger et al., 2016) in solche Ansätze integriert werden?
- Welche politischen Steuerungsmaßnahmen zur naturverträglichen Kohlenstoffspeicherung verbinden soziale Verträglichkeit und Effektivität für den Klimaschutz?

## Literatur

- Anderl, M., Friedrich, A., Gangl, M., Kriech, M., Kuschel, V., Lampert, C. et al. (2022). *Austria's National Inventory Report 2022. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol*. Wien: Umweltbundesamt GmbH.
- Arneith, A., Denton, F., Agus, F., Elbehri, A., Erb, K.-H., Elasha, B. O. et al. (2019). Framing and Context. In P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts et al. (Hrsg.), *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* (S. 77–129). : <https://research.vu.nl/en/publications/framing-and-context> [31.1.2020]
- Arneith, A., Sitch, S., Pongratz, J., Stocker, B. D., Ciais, P., Poulter, B. et al. (2017). Historical carbon dioxide emissions caused by land-use changes are possibly larger than assumed. *Nature Geoscience*, 10(2), 79–84. <https://doi.org/10.1038/ngeo2882>
- Bajželj, B., Richards, K. S., Allwood, J. M., Smith, P., Dennis, J. S., Curmi, E. et al. (2014). Importance of food-demand management for climate mitigation. *Nature Climate Change*, 4(10), 924–929. <https://doi.org/10.1038/nclimate2353>
- Bhan, M., Gingrich, S., Roux, N., Le Noë, J., Kastner, T., Matej, S. et al. (2021). Quantifying and attributing land use-induced carbon emissions to biomass consumption: A critical assessment of existing approaches. *Journal of Environmental Management*, 286, 112228. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112228>
- Billen, G., Aguilera, E., Einarsson, R., Garnier, J., Gingrich, S., Grizzetti, B. et al. (2021). Reshaping the European agro-food system and closing its nitrogen cycle: The potential of combining dietary change, agroecology, and circularity. *One Earth*, 4(6), 839–850. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.05.008>
- Booth, M. S. (2018). Not carbon neutral: Assessing the net emissions impact of residues burned for bioenergy. *Environmental Research Letters*, 13(3), 035001. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaac88>
- Camia, A., Giuntoli, J., Jonsen, R., Robert, N., Cazzaniga, N. E., Jasinevicius, G. et al. (2021). *The use of woody biomass for energy production in the EU* (Band EUR 30548 EN). Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Chazdon, R. & Brancalion, P. (2019). Restoring forests as a means to many ends. *Science*, 365(6448), 24–25. American Association for the Advancement of Science. <https://doi.org/10.1126/science.aax9539>
- Cowie, A., Pingoud, K. & Schlamadinger, B. (2006). Stock changes or fluxes? Resolving terminological confusion in the debate on land-use change and forestry. *Climate Policy*, 6(2), 161–179. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1080/14693062.2006.9685593>
- Duboc, O., Steiner, K., Radosits, F., Wenzel, W. W., Goessler, W. & Santner, J. (2019). Functional Recycling of Biobased, Borate-Stabilized Insulation Materials As B Fertilizer. *Environmental Science & Technology*, 53(24), 14620–14629. American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04234>
- European Environment Agency (EEA). (2017). Forest: growing stock, increment and fellings. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/forest-growing-stock-increment-and-fellings-3/assessment> [18.01.2021]
- Egglegstone, H. S., Buendia, L., Miwa, K. & Ngara, T. (2006). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Japan: IGES. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/> [15.12.2015]
- Erb, K.-H., Fetzler, T., Plutzer, C., Kastner, T., Lauk, C., Mayer, A. et al. (2016). Biomass turnover time in terrestrial ecosystems halved by land use. *Nature Geoscience*, 9(9), 674–678. <https://doi.org/10.1038/ngeo2782>
- Erb, K.-H., Kastner, T., Luysaert, S., Houghton, R. A., Kuemmerle, T., Olofsson, P. et al. (2013). Bias in the attribution of forest carbon sinks. *Nature Climate Change*, 3(10), 854–856. <https://doi.org/10.1038/nclimate2004>
- Erb, K.-H., Kastner, T., Plutzer, C., Bais, A. L. S., Carvalhais, N., Fetzler, T. et al. (2018). Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. *Nature*, 553(7686), 73–76. <https://doi.org/10.1038/nature25138>
- Erb, K.-H., Lauk, C., Kastner, T., Mayer, A., Theurl, M. C. & Haberl, H. (2016). Exploring the biophysical option space for feeding the world without deforestation. *Nature Communications*, 7, 11382. <https://doi.org/10.1038/ncomms11382>
- Eyvindson, K., Repo, A. & Mönkkönen, M. (2018). Mitigating forest biodiversity and ecosystem service losses in the era of bio-based economy. *Forest Policy and Economics*, 92, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.04.009>
- Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database (FAOSTAT). (2021). Statistical Databases. <http://faostat.fao.org>.
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A. et al. (2020). Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4), 3269–3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- Gavrilova, O., Jonas, M., Erb, K. & Haberl, H. (2010). International trade and Austria's livestock system: Direct and hidden carbon emission flows associated with production and consumption of products. *Ecological Economics*, 69(4), 920–929. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.015>
- Getzner, M., Kirchmeir, H., Berger, V., Huber, M., Jäger, M., Jungmeier, M. et al. (2020). „Werte der Natur“ – Bewertung der Ökosystemleistungen der Österreichischen Bundesforste. *Technischer Gesamtbericht*. Wien: TU Wien und E.C.O. Institut für Ökologie Klagenfurt.
- Gingrich, S., Erb, K.-H., Krausmann, F., Gaube, V. & Haberl, H. (2007). Long-term dynamics of terrestrial carbon stocks in Austria: a comprehensive assessment of the time period from 1830 to 2000. *Regional Environmental Change*, 7(1), 37–47. <https://doi.org/10.1007/s10113-007-0024-6>
- Gingrich, S., Lauk, C., Krausmann, F., Erb, K.-H. & Le Noë, J. (2021). Changes in energy and livestock systems largely explain the forest transition in Austria (1830–1910). *Land Use Policy*, 109, 105624. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105624>
- Gómez-González, S., Ochoa-Hueso, R. & Pausas, J. G. (2020). Afforestation falls short as a biodiversity strategy. *Science*, 368(6498), 1439–1439. American Association for the Advancement of Science. <https://doi.org/10.1126/science.abd3064>
- Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A. et al. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 201710465. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
- Gschwandtner, T. (2019). Holzvorrat auf neuem Höchststand. *BFW Praxisinformation*, 8–12.

- Haberl, H., Erb, K.-H., Krausmann, F., Running, S., Searchinger, T. D. & Smith, W. K. (2013). Bioenergy: how much can we expect for 2050? *Environmental Research Letters*, 8(3), 031004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/031004>
- Haberl, H., Kastner, T., Schafartzik, A., Ludwiczek, N. & Erb, K.-H. (2012). Global effects of national biomass production and consumption: Austria's embodied HANPP related to agricultural biomass in the year 2000. *Ecological Economics*, 84(0), 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.09.014>
- Harmon, M. E. (2019). Have product substitution carbon benefits been overestimated? A sensitivity analysis of key assumptions. *Environmental Research Letters*, 14(6), 065008. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1e95>
- Harmon, M. E., Ferrell, W. K. & Franklin, J. F. (1990). Effects on Carbon Storage of Conversion of Old-Growth Forests to Young Forests. *Science*, 247(4943), 699–702. American Association for the Advancement of Science. <https://doi.org/10.1126/science.247.4943.699>
- Havlik, P., Valin, H., Herrero, M., Obersteiner, M., Schmid, E., Rufino, M. C. et al. (2014). Climate change mitigation through livestock system transitions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, online first. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308044111>
- Holtmark, B. (2012). Harvesting in boreal forests and the biofuel carbon debt. *Climatic Change*, 112(2), 415–428. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0222-6>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. Geneva: Inter-
- governmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/sr15/> [25.1.2019]
- IPCC. (2019). Summary for Policymakers. In P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts et al. (Hrsg.), *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Geneva: IPCC.
- Kalt, G. & Amtmann, M. (2014). *Biogene Materialflüsse in Österreich. Endbericht.* Österreichische Energieagentur.
- Kalt, G., Mayer, A., Theurl, M. C., Lauk, C., Erb, K.-H. & Haberl, H. (2019). Natural climate solutions versus bioenergy: Can carbon benefits of natural succession compete with bioenergy from short rotation coppice? *GCB Bioenergy*, 11(11), 1283–1297. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12626>
- Keith, H., Lindenmayer, D., Macintosh, A. & Mackey, B. (2015). Under What Circumstances Do Wood Products from Native Forests Benefit Climate Change Mitigation? *PLOS ONE*, 10(10), e0139640. Public Library of Science. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139640>
- Kirchengast, G., Kromp-Kolb, H., Steininger, K., Stagl, S., Kirchner, M., Ambach, Ch. et al. (2019). Referenzplan als Grundlage für einen wissenschaftlich fundierten und mit den Pariser Klimazielen in Einklang stehenden Nationalen Energie- und Klimaplan für Österreich (Ref-NEKP). CCCA: Wien-Graz. <https://ccca.ac.at/wissens-transfer/uninetz-sdg-13-1>
- Knauf, M., Köhl, M., Mues, V., Olschofsky, K. & Frühwald, A. (2015). Modeling the CO<sub>2</sub>-effects of forest management and wood usage on a regional basis. *Carbon Balance and Management*, 10(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s13021-015-0024-7>
- Körner, C. (2003). Slow in, Rapid out--Carbon Flux Studies and Kyoto Targets. *Science*, 300(5623), 1242–1243. <https://doi.org/10.1126/science.1084460>
- Krausmann, F., Erb, K.-H., Gingrich, S., Lauk, C. & Haberl, H. (2008). Global patterns of socioeconomic biomass flows in the year 2000: A comprehensive assessment of supply, consumption and constraints. *Ecological Economics*, 65(3), 471–487. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.07.012>
- Le Noë, J., Erb, K.-H., Matej, S., Magerl, A., Bhan, M. & Gingrich, S. (2021). Altered growth conditions more than reforestation counteracted forest biomass carbon emissions 1990–2020. *Nature Communications*, 12(1), 6075. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26398-2>
- Leturcq, P. (2020). GHG displacement factors of harvested wood products: the myth of substitution. *Scientific Reports*, 10(1), 20752. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77527-8>
- Luyssaert, S., Schulze, E.-D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmoller, D., Law, B. E. et al. (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 455(7210), 213–215. <https://doi.org/10.1038/nature07276>
- Luyssaert, S., Schulze, E.-D., Knohl, A., Law, B. E., Ciais, P. & Grace, J. (2021). Reply to: Old-growth forest carbon sinks overestimated. *Nature*, 591(7851), E24–E25. Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03267-y>
- Mackey, B., Prentice, I. C., Steffen, W., House, J. I., Lindenmayer, D., Keith, H. et al. (2013). Untangling the confusion around land carbon science and climate change mitigation policy. *Nature Climate Change*, 3(6), 552–557. <https://doi.org/10.1038/nclimate1804>
- Marland, G. & Schlamadinger, B. (1997). Forests for carbon sequestration or fossil fuel substitution? A sensitivity analysis. *Biomass and Bioenergy*, 13(6), 389–397. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)00027-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)00027-5)
- Mitchell, S. R., Harmon, M. E. & O'Connell, K. E. B. (2012). Carbon debt and carbon sequestration parity in forest bioenergy production. *GCB Bioenergy*, 4(6), 818–827. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2012.01173.x>
- Moomaw, W. R., Masino, S. A. & Faison, E. K. (2019). Intact Forests in the United States: Proforestation Mitigates Climate Change and Serves the Greatest Good. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00027>
- Nabuurs, G.-J., Arets, E. J. M. M. & Schelhaas, M.-J. (2017). European forests show no carbon debt, only a long parity effect (Special section on The econo-
- mics of carbon sequestration in forestry). *Forest Policy and Economics*, 75, 120–125. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2016.10.009>
- Norton, M., Baldi, A., Buda, V., Carli, B., Cudlin, P., Jones, M. B. et al. (2019). Serious mismatches continue between science and policy in forest bioenergy. *GCB Bioenergy*, 11(11), 1256–1263. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12643>
- Paustian, K., Larson, E., Kent, J., Marx, E. & Swan, A. (2019). Soil C Sequestration as a Biological Negative Emission Strategy. *Frontiers in Climate*, 1, 8. <https://doi.org/10.3389/feclim.2019.00008>
- Pendrill, F., Persson, U. M., Godar, J., Kastner, T., Moran, D., Schmidt, S. et al. (2019). Agricultural and forestry trade drives large share of tropical deforestation emissions. *Global Environmental Change*, 56, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.03.002>
- Rockström, J., Beringer, T., Hole, D., Griscom, B., Mascia, M. B., Folke, C. et al. (2021a). Opinion: We need biosphere stewardship that protects carbon sinks and builds resilience. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(38). National Academy of Sciences. <https://doi.org/10.1073/pnas.2115218118>
- Rockström, J., Beringer, T., Hole, D., Griscom, B., Mascia, M. B., Folke, C. et al. (2021b). Opinion: We need biosphere stewardship that protects carbon sinks and builds resilience. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(38). National Academy of Sciences. <https://doi.org/10.1073/pnas.2115218118>
- Roe, S., Streck, C., Obersteiner, M., Frank, S., Griscom, B., Drouet, L. et al. (2019). Contribution of the land sector to a 1.5 °C world. *Nature Climate Change*, 9(11), 817–828. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0591-9>
- Röös, E., Bajželj, B., Smith, P., Patel, M., Little, D. & Garnett, T. (2017). Greedy or needy? Land use and climate impacts of food in 2050 under different livestock futures. *Global Environmental Change*, 47, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.09.001>
- Roux, N., Kastner, T., Erb, K.-H. & Haberl, H. (2020). Does agricultural trade reduce pressure on land ecosystems? Decomposing drivers of the embodied human appropriation of net primary production. *Ecological Economics*,

106915. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106915>

Scheidel, A. (2019). Carbon stock indicators: reductionist assessments and contentious policies on land use. *The Journal of Peasant Studies*, 46(5), 913–934. Routledge. <https://doi.org/10.1080/03066150.2018.1428952>

Scheidel, A. & Gingrich, S. (2020). Toward sustainable and just forest recovery: research gaps and potentials for knowledge integration. *One Earth*, 3(6), 680–690. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.11.005>

Searchinger, T. D., Beringer, T., Holtmark, B., Kammen, D. M., Lambin, E. F., Lucht, W. et al. (2018). Europe's renewable energy directive poised to harm global forests. *Nature Communications*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06175-4>

Searchinger, T. D., Wirseni, S., Beringer, T. & Dumas, P. (2018). Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change. *Nature*, 564(7735), 249. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0757-z>

Seidl, R., Albrich, K., Erb, K.-H., Formayer, H., Leidinger, D., Leitinger, G. et al. (2019). What drives the future supply of regulating ecosystem services in a mountain forest landscape? *Forest Ecology and Management*, 445, 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.047>

Seidl, R., Spies, T. A., Peterson, D. L., Stephens, S. L. & Hicke, J. A. (2016). REVIEW: Searching for resilience: addressing the impacts of changing disturbance regimes on forest ecosystem services. *Journal of Applied Ecology*, 53(1), 120–129. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12511>

Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G. et al. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7(6), 395–402. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>

Steininger, K., Lininger, C., Droege, S., Roser, D., Tomlinson, L. & Meyer, L. (2014). Justice and cost effectiveness of consumption-based versus production-based approaches in the case of unilateral climate policies. *Global Environmental Change*, 24, 75–87. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.10.005>

Steininger, K. W., Lininger, C., Meyer, L. H., Muñoz, P. & Schinko, T. (2016). Multiple carbon account-

ing to support just and effective climate policies. *Nature Climate Change*, 6(1), 35–41. Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/nclimate2867>

Strassburg, B. B. N., Iribarrem, A., Beyer, H. L., Cordeiro, C. L., Crouzeilles, R., Jakovac, C. C. et al. (2020). Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature*, 1–6. Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2784-9>

Ter-Mikaelian, M. T., Colombo, S. J. & Chen, J. (2015). The Burning Question: Does Forest Bioenergy Reduce Carbon Emissions? A Review of Common Misconceptions about Forest Carbon Accounting. *Journal of Forestry*, 113(1), 57–68. <https://doi.org/10.5849/jof.14-016>

Theurl, M. C., Lauk, C., Kalt, G., Mayer, A., Kaltenecker, K., Morais, T. G. et al. (2020). Food systems in a zero-deforestation world: Dietary change is more important than intensification for climate targets in 2050. *Science of The Total Environment*, 735, 139353. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139353>

United States Department of Agriculture (USDA) & United States Department of Health and Human Services (HHS). (2010). *Dietary Guidelines for Americans*. Washington D.C.: United States Department of Agriculture (USDA) and US Health and Human Services (HHS).

Veldman, J. W., Overbeck, G. E., Negreiros, D., Mahy, G., Le Stradic, S., Fernandes, G. W. et al. (2015). Where Tree Planting and Forest Expansion are Bad for Biodiversity and Ecosystem Services. *BioScience*, 65(10), 1011–1018. <https://doi.org/10.1093/biosci/biv118>

Weiss, P., Braun, M., Fritz, D., Gschwantner, T., Hesser, F., Jandl, R. et al. (2020). *Adaptation for carbon efficient forests and the entire wood value chain (including a policy decision support tool) - Evaluating pathways supporting the Paris Agreement. Endbericht zum Projekt CareforParis*. Wien: Klima- und Energiefonds.

West, P. C., Gibbs, H. K., Monfreda, C., Wagner, J., Barford, C. C., Carpenter, S. R. et al. (2010). Trading carbon for food: Global comparison of carbon stocks vs. crop yields on agricultural land. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(46), 19645–19648. <https://doi.org/10.1073/pnas.1011078107>

<https://doi.org/10.1073/pnas.1011078107>

Westhoek, H., Lesschen, J. P., Rood, T., Wagner, S., De Marco, A., Murphy-Bokern, D. et al. (2014). Food choices, health and environment: Effects of cutting Europe's meat and dairy intake. *Global Environmental Change*, 26, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.02.004>

Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S. et al. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447–492. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)

Zessner, M., Helmich, K., Thaler, S., Weigl, M., Wagner, K. H., Haider, T. et al. (2011). Ernährung und Flächennutzung in Österreich. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 63(5–6), 95–104. <https://doi.org/10.1007/s00506-011-0293-7>

Zimmermann, P., Tasser, E., Leitinger, G. & Tappeiner, U. (2010). Effects of land-use and land-cover pattern on landscape-scale biodiversity in the European Alps. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139(1), 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.06.010>