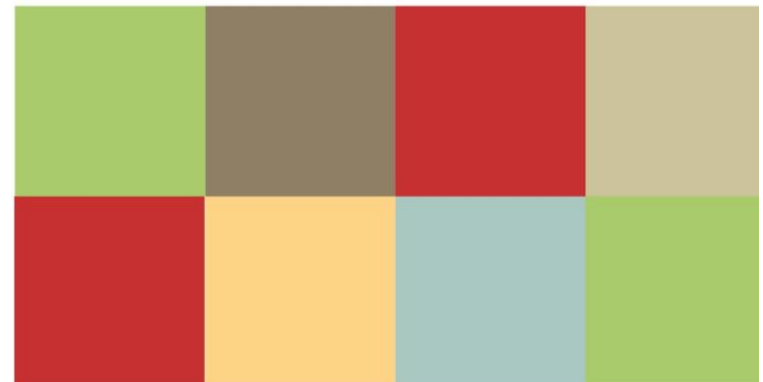


DIE ROLLE DES WALDES IM KLIMASCHUTZ – WIE WIRD UNSER WALD KLIMAFIT?

Auftraggeber

Mutter Erde – Umweltinitiative Wir für die Welt

Oktober 2021



Projekttitel:	Die Rolle des Waldes im Klimaschutz – Wie wird unser Wald klimafit?
Auftraggeber:	Mutter Erde - Umweltinitiative Wir für die Welt c/o Österreichischer Rundfunk, ORF Würzburggasse 30, A-1136 Wien
Finanzierung:	Mutter Erde - Umweltinitiative Wir für die Welt
Zitiervorschlag:	Huber, M., Kirchmeir, H., Fuchs, A. 2021: Die Rolle des Waldes im Klimaschutz – Wie wird unser Wald klimafit? Studie im Rahmen von Mutter Erde, Bearbeitung: E.C.O. Institut für Ökologie, Klagenfurt, 105 S.

Durchführung:
E.C.O. Institut für Ökologie
Jungmeier GmbH
Lakeside B07 b, 2. OG
A-9020 Klagenfurt
Tel.: +43 463/50 41 44
E-Mail: office@e-c-o.at
Website: www.e-c-o.at

Klagenfurt, Oktober 2021

DIE ROLLE DES WALDES IM KLIMASCHUTZ – WIE WIRD UNSER WALD KLIMAFIT?

Projektleitung:	DI Michael Huber
Bearbeitung:	Dr. Hanns Kirchmeir DI Michael Huber DI Anneliese Fuchs
Grafische Bearbeitung	DI Anneliese Fuchs
Beratung	Mag. Karin Enzenhofer (WWF Österreich)

Hinweis zur Verwendung des Dokuments

Das vorliegende Dokument wurde von E.C.O. Institut für Ökologie im Auftrag der Mutter Erde Initiative aufbereitet. Es ist ein technischer Bericht und als interne Arbeitsgrundlage für Mutter Erde konzipiert. Eine urheberrechtliche Freigabe zur Verwendung der Grafiken liegt derzeit noch nicht vor. Diese erfolgt erst im Rahmen der weiteren grafischen Aufbereitung und Layoutierung für eine Druckversion. Wir bitten daher derzeit von einem Druck (abseits einer internen Verwendung) bzw. jedweder Veröffentlichung des Dokuments abzusehen. Vielen Dank.

EXECUTIVE SUMMARY

Diese Grundlagenstudie zur Rolle des Waldes im Klimawandel spannt, in diesem komplexen Thema, den Bogen von den Grundlagen bis hin zu Handlungsempfehlungen.

Derzeit können wir nur aus den Beobachtungen der Vergangenheit Modelle entwickeln, die Prognosen der zukünftigen Entwicklung abschätzen. Da auch diese Prognosen mit Unsicherheiten behaftet sind, ist ein Maßnahmenmix, der unterschiedliche Optionen sinnvoll miteinander kombiniert, empfehlenswert.

Die Kohlenstoffpools der Biomasse (Biosphäre), der Atmosphäre und der Ozeane der Erde sind im ständigen Austausch. **In den letzten 100 Jahren** wurde **durch anthropogene Aktivitäten 40- bis 100-mal mehr Kohlenstoff aus fossilen Lagerstätten freigesetzt**, als es den **natürlichen Prozessen** entspricht. Der dadurch bedingte Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Atmosphäre von 300 auf über 400 ppm hat zu der inzwischen unbestrittenen **anthropogenen Klimaerwärmung** geführt, die wir derzeit beobachten.

Dabei haben auch **biologische Prozesse**, allen voran die **Photosynthese** der Pflanzen maßgeblich die **Gaszusammensetzung der Atmosphäre beeinflusst** und tun dies auch heute in enormem Umfang. Kohlenstoff wird von den Blättern absorbiert und in Zucker, Stärke, Zellulose und anderen organischen Verbindungen eingelagert, die Energie und Strukturen für die Ökosysteme aufbauen. Je mehr Biomasse und damit Energie in einem System bereitstehen, desto **komplexer und vielfältiger** können die Nahrungsketten und damit die biologische Vielfalt sein. Geschätzt wird, dass sich **mehr als zwei Drittel der biologischen Vielfalt der Erde in Wäldern konzentriert**. Während jedoch Bäume in einem **Urwald 300–600 Jahre** alt werden, wird in **Wirtschaftswäldern** die Entwicklung bereits nach **80–140 Jahren** durch den Ernteeingriff abrupt unterbrochen. Gerade in den **Spätphasen**, die der Wirtschaftswald nicht erlebt, **steigt jedoch die Biodiversität**.

Biodiversität und Kohlenstoffreichtum sind positiv miteinander verknüpft. Geht die Biodiversität im Wald verloren, verliert er auch an **Resilienz**, die für einen klimafitten Wald jedoch essenziell ist und im **Maßnahmenmix berücksichtigt werden muss**. Im **österreichischen Wald** sind ca. **800 Mio. t Kohlenstoff** (entspricht knapp 3.000 Mio. t CO₂-

Äquivalenten) **gespeichert**. In einem Urwald entspricht die jährliche Aufnahme von Kohlenstoff in etwa der Menge, die durch **Zersetzungsprozesse** von Wirbellosen, Pilzen und Bakterien, aber auch den Pflanzen selbst durch **Veratmung** von Kohlenstoffprodukten wieder an die Atmosphäre freigesetzt wird. Allerdings wird ein gewisser Teil in den Wäldern der **gemäßigten Klimazone** auch **als Dauerhumus** auf lange Zeit **im Boden** akkumuliert. **Holzernte greift** in das System **ein**, reduziert den Holzvorrat in den Wäldern und führt zur **stärkeren Besonnung von Waldboden** und damit zu einer **verstärkten Freisetzung von Kohlenstoff** aus dem Boden. Nach der Ernte dauert es in Europa **mindestens 10 bis 20 Jahre**, bis die **CO₂-Absorptionsrate eines jungen Bestandes größer ist als die CO₂-Freisetzungsrate durch Bodenatmung aus der Kahlschlagfläche**.

Es gibt daher einen breiten fachlichen **Diskurs** darüber, **ob** die Pariser Klimaziele eher durch eine **Intensivierung oder Extensivierung der Holznutzung** erreicht werden können. Derzeit liegt der durchschnittliche Vorrat der österreichischen Wälder **aufgrund der jahrhundertelangen forstlichen Bewirtschaftung** bei etwas 350 Vorratsfestmeter und damit deutlich unter den 500–700 Vorratsfestmetern, die sich in Ur- und Naturwäldern in Mitteleuropa finden. Es besteht also noch eine erhebliche **Reserve im Speichervolumen**. Holzbiomasse kann aber neben dem Wald auch im Holzproduktepool (in Gebäuden und Einrichtungsgegenständen) gespeichert werden. Daher müssen die **Potenziale** in der **Steigerung des Holzproduktepools**, die maßgeblich über **Menge und Verwendungsdauer** gesteuert werden, berücksichtigt werden. Holzbiomasse kann auch **stofflich und energetisch andere Materialien ersetzen**, die einen hohen Treibhausgasausstoß verursachen, und sich damit positiv auf die Treibhausgasbilanz auswirken. Die **Summenwirkung** aus Holzproduktepool, stofflicher und energetischer Substitution weist dabei aber **geringere Treibhausgasreduktionen** auf, **als durch** eine Steigerung des **Vorratsaufbaus** im Wald (Proforestation) möglich sind. Die Daten der CareforParis-Studie zeigen, dass das Szenario „Vorratsaufbau“ im Jahr 2050 um 8 Mio. t CO₂ mehr bindet als das Referenzszenario „Business as usual“. Im Vergleich zum Szenario „Umtriebszeitverkürzung“, also einer Intensivierung der Holznutzung, beträgt der Unterschied 16 Mio. t/Jahr. Der Begriff „Proforestation“ beschreibt die Steigerung der Kohlenstoffaufnahme im Wald durch Vorratsaufbau und die Entwicklung natürlicher Strukturen und damit die

Erhöhung der Biodiversität.

Wald wird von der EU-Kommission als natürlicher Verbündeter und **wichtiges Element zur Erreichung der europäischen Klimaziele** gesehen. Mit **48 % Flächenanteil** ist Wald ein **dominierendes Ökosystem** und kann damit die österreichische Treibhausgasbilanz maßgeblich mitbeeinflussen. Dabei ist es auch von Bedeutung, dass **kohlenstoff- und biodiversitätsreiche Ur- und Naturwälder nicht** in ihrer Qualität durch Nutzungseingriffe **beeinträchtigt werden**. Daher sollten auch in Österreich **entsprechend** den Vorgaben der **EU-Biodiversitätsstrategie 2030** rund **10 %** der Waldökosysteme, vorrangig die rund **3 %** existierenden **Urwälder** sowie weitere Naturwälder **streng geschützt** werden (derzeit sind erst 1 % der Wälder in Österreich unter strengem Schutz). Wenn ein weiterer Anstieg der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre vermieden werden soll, stellt eine **Nichtnutzung oder Nutzungsreduktion der Wälder** für Österreich eine unmittelbar **mögliche temporäre Zwischenlösung** dar, **vor allem in der Phase der Umstellung der technologischen Infrastrukturen** in der **Energiebereitstellung** (Solar-, Wind-, Wasserenergie, Speichersysteme). Die Steigerung des Holzprodukt pools in Gebäuden und Einrichtungsgegenständen ist limitiert und im Herstellungsprozess fallen beachtliche Holzmengen durch Verarbeitungsprozesse ab, die nicht mehr stofflich verwertet werden können. Die **Verbrennung von Holz emittiert mehr CO₂** in die Atmosphäre **als** beispielsweise **Erdgas** bzw. der aktuelle durchschnittliche österreichische Energiemix. Vor diesem Hintergrund ist die **Förderung von Biomassekraftwerken kritisch** zu sehen. Biomassenutzung ist auf die Zeitspanne der nächsten 30 Jahre nicht klimaneutral, da die Bindung des durch die Verbrennung freigesetzten Kohlenstoffs weitaus länger dauert.

Die stoffliche Nutzung von Holz und seine langfristige Verwendung, gerade in Gebäuden, leistet durchaus einen positiven Beitrag zur Kohlenstoffspeicherung. Allerdings können **nur lebende Bäume Kohlenstoff aus der Atmosphäre absorbieren**, und wir haben **derzeit keine technischen Alternativen** für diese Funktion. (Haberl, 2017; Körner, 2020)

Wälder können nur für eine **begrenzte Zeit als zusätzliches Speicherpotenzial** genutzt werden, weil **in 50–100 Jahren** eine

biologisch bedingte Sättigung erreicht wird. Die Möglichkeit, einen Teil der Treibhausgasemissionen durch die gesteigerte Kohlenstoffspeicherung im Wald zu kompensieren, soll den Ausstieg aus der Nutzung fossiler Brennstoffe allerdings nicht verlangsamen.

Die Folgen des Klimawandels zu begrenzen, ist auch für den Forstwirtschaftssektor von existenzieller Bedeutung. Durch den Klimawandel ändern sich die Rahmenbedingungen für Waldwachstum und Waldbewirtschaftung rapide. Änderungen in Temperatur und Niederschlag führen zu Hitze- und Trockenstress sowie zu Massenvermehrungen von Insekten, Waldbränden und setzen vor allem nicht-standortgerechte Wälder und geschwächte Waldökosysteme zusätzlich unter Druck. Das trifft besonders die wirtschaftlich derzeit bedeutendste Baumart Fichte. Der Klimawandel stellt gängige Vorstellungen der Waldbewirtschaftung basierend auf Erfahrungen der Vergangenheit in Frage, da sich Wuchs- und Standortbedingungen ändern. Die Auswirkungen und Dynamiken sind vor allem bei einer Erwärmung über 1,5 °C noch unklar. Es kann sogar sein, dass der Wald in Zukunft von einer Senke zu einer Kohlenstoffquelle wird.

Es bleibt unklar, wie sich Eingriffe in das derzeitige System im Klimawandel auswirken, da die **Erkenntnisse auf vergangenen Entwicklungen basieren**. Es gilt das **Risiko** zu **minimieren** und den Wald durch Reduktion von Stressfaktoren wie Kahlschlagnutzung, unnatürlicher Wildverbiss der Naturverjüngung, extremer Biomasseentzug, zu entlasten.

Naturverjüngung ist der Schlüssel zu einer angepassten Waldentwicklung und **Totholzinseln** und eine **hohe Diversität an Bewirtschaftungsformen** und Beständen sind der **Schlüssel** für eine hohe **Resilienz** der Wälder. Eine **Neueinführung von Baumarten** kann eine Handlungsoption darstellen, ist aber mit vielen Unwägbarkeiten und **Risiken** verbunden. Vom Menschen konstruierte Ökosysteme haben sich in der Vergangenheit als instabil herausgestellt (vgl. den aktuellen Zustand von Fichten-Altersklassenwäldern).

Um die Pariser Klimaziele zu erreichen, sind auch **Änderungen** in den **österreichischen Waldentwicklungskonzepten notwendig**. Die derzeitigen Klimaziele in der **Österreichischen Waldstrategie 2020+** sind sehr niedrig, da sie das Kohlenstoffsinkenpotenzial des Waldes **nicht**

adäquat in Betracht ziehen. Die auf neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen basierende **europäische Waldstrategie 2030** spricht diese **Senkenfunktion** an. Eine **Integration** dieser neuen Zielsetzungen **auf österreichischer Ebene in Strategien, Gesetze und Förderschienen** ist **dringlich**. Um die Waldeigentümer:innen für die Kohlenstoff-Speicherleistung von Wäldern adäquat zu entgelten, sind **Kohlenstoffzertifikate** zu entwickeln, die am Kohlenstoffmarkt handelbar sind. Parallel müssen **Mechanismen** entwickelt werden, die sicherstellen, dass eine **Reduktion der Holzernte** in Österreich **nicht durch Holzimporte egalisiert** wird. Der in der **EU-Biodiversitätsstrategie 2030** **geforderte gesetzliche Schutz von 30 % der Landfläche**, 10 % davon unter strengem Schutz (Außernutzungsstellung) als Klima- und Biodiversitätsschutzwälder ist rasch **umzusetzen**. Allgemein muss das Bewusstsein gestärkt werden, dass der Wald Teil der Lösung ist, aber andere Maßnahmen zu einer massiven Reduktion der Treibhausgasemissionen nicht ersetzt.

INHALTSVERZEICHNIS

Executive Summary	4
Inhaltsverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	13
Abkürzungsverzeichnis	14
1 Einleitung	15
1.1 Aufbau der Studie	15
1.2 Struktur der Kapitel und Hinweise zur Verwendung	18
1.3 Methodik	18
1.4 Wichtige Definitionen und Begrifflichkeiten	19
2 Die Geschichte des Kohlenstoffs auf der Erde	23
2.1 Kernbotschaften	23
2.2 Kohlenstoff versus Kohlendioxid	23
2.3 Klimatische Entwicklung und Kohlenstoffkreislauf in der Erdgeschichte in der früheren Atmosphäre	24
2.4 Kohlenstoffpool	26
2.5 Einflussnahme des Menschen auf den Kohlenstoffkreislauf der Erde und die Folgen fürs Erdklima	29
2.6 Die Rolle von Pflanzenbiomasse in der Bindung von CO ₂	29
2.7 Die Kohlenstoffbilanz Österreichs	30
3 Zusammenhang zwischen Kohlenstoffspeicherung in Wäldern und Biodiversität	32
3.1 Kernbotschaften	32
3.2 Waldbiodiversität	32
3.3 Die Rolle von Totholz im Kohlenstoffkreislauf	33
3.4 Potenzielle Gesprächspartner:innen und Expert:innen	35
4 Wälder als Kohlenstoffsinken und Kohlenstoffquellen	36

4.1	Kernbotschaften	36
4.2	Kohlenstoffkreislauf im Wald	36
4.3	Kohlenstoffakkumulation im Wald	37
4.3.1	Wie viel Kohlenstoff speichern verschiedene Baumarten?	39
4.4	Potenzielle Gesprächspartner:innen und Expert:innen	41
5	Kohlenstoff im Wald oder in Holzprodukten Speichern?	42
5.1	Kernbotschaften	42
5.2	Der aktuelle Diskurs	42
5.3	Sequestrierung und Speicherung von Kohlenstoff im Wald	43
5.3.1	Klimaschutz durch Vorratsaufbau im Wald	44
5.3.2	Die Rolle des Bodens und Totholz	47
5.4	Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten	47
5.4.1	Effizienz der Speicherung in Holzprodukten gegenüber der Speicherung im Wald	49
5.5	Energetische Nutzung und Substitutionseffekte (Gas-, Ölheizungen, Biomasse)	50
5.5.1	Anteil des thermisch verwerteten Holzes	50
5.5.2	Wirkungsgrad und Kohlenstofffreisetzung	50
5.5.3	Beitrag der energetischen Nutzung zur Treibhausgasreduktion	52
5.6	Stoffliche Substitutionseffekte von Holzprodukten	52
5.6.1	Was ist stoffliche Substitution?	52
5.6.2	Systemgrenzen: Räumliche Substitution – Importe und Exporte	55
5.7	Entwicklungsszenarien im Vergleich	56
5.8	Potenzielle Gesprächspartner:innen und Expert:innen	57
6	Rolle von Waldökosystemen in Österreich und Europa hinsichtlich der Erreichung der Pariser Klimaziele	58
6.1	Kernbotschaften	58
6.2	Der Wald und die Klimaziele	58
6.2.1	Das Pariser Klimaabkommen und seine Umsetzung	58

6.3 Speichervolumen und Speicherleistung der heimischen Wälder	59
6.4 Potenziale und Dimensionen zur Optimierung der Senkenwirkung des Waldes	61
6.5 Potenzielle Gesprächspartner:innen und Expert:innen	63
7 Auswirkung des Klimawandels auf den Wald, walddtypische Biodiversität und Kohlenstoffspeicherung	64
7.1 Kernbotschaften	64
7.2 Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald	64
7.2.1 Zuwachs und Artenzusammensetzung	66
7.2.2 Verschiebung der Waldgrenze	70
7.2.3 Kalamitäten und Störungsereignisse	70
7.2.4 Auswirkungen auf Naturgefahren	73
7.2.5 Kohlenstoffspeicherungspotenzial	73
7.3 Wald der Zukunft: Ausblicke	73
7.3.1 Funktionen des Waldes	73
7.3.2 Artenzusammensetzung	74
7.3.3 Nutzung	75
7.3.4 Überlegungen zum Wald der Zukunft	75
7.4 Potenzielle Gesprächspartner:innen und Expert:innen	78
8 Anpassungsmaßnahmen für einen klimafitten Wald	79
8.1 Kernbotschaften	79
8.2 Anpassungsmaßnahmen für einen klimafitten Wald	79
8.2.1 Stabilisierende Maßnahmen	80
8.2.2 Außernutzungsstellungen	84
8.2.3 Waldumbau	84
8.3 Einfluss auf Klimaanpassungsmaßnahmen auf andere Ökosystemleistungen	86
8.4 Potenzielle Gesprächspartner:innen und Expert:innen	87
9 Notwendige politische Entscheidungen und gesellschaftliche Veränderungen	88

9.1	Kernbotschaften	88
9.2	Klimawandel und Biodiversitätskrise – zwei globale Herausforderungen	88
9.3	Die Europäische Ebene	88
9.4	Politische Zielsetzungen auf nationaler Ebene	90
9.5	Wichtige Schritte zur Zielerreichung in Österreich	90
9.6	Positionen ausgewählter österreichischer Stakeholder	92
9.7	Potenzielle Gesprächspartner:innen und Expert:innen	95
10	Literaturverzeichnis	96
11	Annex: Liste der Interviewpartner:innen	105

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verhältnis Kohlenstoff (C) zu Kohlendioxid (CO ₂)	24
Abbildung 2: Der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre in den letzten 65 Millionen Jahren.	25
Abbildung 3: Änderungen der atmosphärischen CO ₂ -Konzentration in den letzten 640.000 Jahren	25
Abbildung 4: Kohlenstoffvorrat der Erde nach Lee et al. (2019)	27
Abbildung 5: Der globale Kohlenstoffkreislauf im Überblick	28
Abbildung 6: Österreichische Treibhausgasemissionen 1990-2019 und Zielpfad	30
Abbildung 7: Verteilung der österreichischen THG Emissionen nach Sektoren	30
Abbildung 8: Jährliche Treibhausgas-Emissionen/-Senken im Wald je Kohlenstoffpool	31
Abbildung 9: Waldentwicklungsstadien und Biodiversität	32
Abbildung 10: Sogenannte Mikrohabitate an einem alten Baum	33
Abbildung 11: Energieflüsse in einem Buchenwald	34
Abbildung 12: Der Kohlenstoffkreislauf im Wald:	37
Abbildung 13: Prozentuelle Verteilung der Kohlenstoffvorräte im Wald nach Kompartimenten am Beispiel Deutschland	38
Abbildung 14: Kohlenstoffvorräte in unterschiedlichen oberirdischen Totholzkompartimenten	39
Abbildung 15: Jährliche Nettoprimärproduktion auf den im niedersächsischen Solling untersuchten Probeflächen	40
Abbildung 16: Die 3 S der Kohlenstoffspeicherung: Sequestrierung, Speicherung und Substitution	43
Abbildung 17: Kohlenstoffgehalt im Urwald und Wirtschaftswald im Vergleich	45
Abbildung 18: Kohlenstoffvorrat in Biomasse und Humus in verschiedenen Bewirtschaftungsmodellen	46
Abbildung 19: CareforParis: Modellierter Vorratsentwicklung im Wald in unterschiedlichen Szenarien	47
Abbildung 20: Modellierter Kohlenstoffgehalt (inkl. der Speicherung in Holzprodukten) für verschiedene Bewirtschaftungsszenarien.	47
Abbildung 21: Entwicklung des Holzprodukt pools in den CareforParis-Szenarien	49
Abbildung 22: Holzverwendung in Österreich gemäß Holzstromanalyse.	50
Abbildung 23: Jährlich vermiedene Emissionen der energetischen Holznutzung;	52
Abbildung 24: Ergebnisse CareforParis: Vermiedene Emissionen durch stoffliche Holznutzung	53

Abbildung 25: Holzstromanalyse 2018;	54
Abbildung 26: Exemplarische Darstellung des Stock-Change-Ansatzes	56
Abbildung 27: Jährliche Emission (+) oder Senke (-) durch Wald unter Berücksichtigung des Holzprodukteteils in den Szenarien	57
Abbildung 28: Zunahme der Waldfläche seit 1971 in Millionen Hektar	59
Abbildung 29: Vorrat im österreichischen Wald nach BHD-Klassen (Brusthöhendurchmesser)	60
Abbildung 30: Anteil von Fichtenreinbeständen, Laub- und Mischwäldern und Nadelholzbeständen in Österreich	60
Abbildung 31: Österreichische Holzvorräte/ha im globalen Vergleich	60
Abbildung 32: Vorratsentwicklung im österreichischen Wald seit den 1960er Jahren	61
Abbildung 33: Anteil des Zuwachses und der jeweiligen Nutzung nach Eigentumsart	61
Abbildung 34: Klimatische Wasserbilanz im österreichischen Wald im aktuellen Klima (links) und bei einer Erwärmung um 3,6 Grad Celsius (rechts)	66
Abbildung 35: Zuwachsentwicklung der Fichte in unterschiedlichen Höhenlagen	66
Abbildung 36: Erwartete Veränderungen des jährlichen Zuwachses	67
Abbildung 37: Relative Veränderung potenziell natürlicher Waldtypen unter einem Klimaänderungsszenario	67
Abbildung 38: Die Hauptbaumarten Fichte und Buche im Klimawandel	68
Abbildung 39: Vergleich der Trockenreaktion von Nadelbaumarten als Mittelwert aller getesteten Herkünfte in drei Trockenjahren 1993, 2000, 2003	69
Abbildung 40: Verschiebung der Waldgrenze	70
Abbildung 41: Waldbrandstatistik Österreich (1993–2021)	70
Abbildung 42: Schadholzmengen durch Sturm, Schnee und Borkenkäferbefall in Österreich 1944–2019	71
Abbildung 43: Annahmen zur kumulierten Schadholzmenge je Szenario in der CareforParis-Studie	72
Abbildung 44: Erwärmung der letzten 30 Jahre in Österreich: Dargestellt ist die Differenz der Klimaperiode 1991–2020 zur Klimaperiode 1961–1990	79
Abbildung 45: Plenterwald Aufbau	83
Abbildung 46: Altersklassenwälder aus einer schlagweisen Bewirtschaftung werden hauptsächlich aus gleichaltrigen Bäumen aufgebaut.	83
Abbildung 47: Wachstumspotenzial der Douglasie gegenwärtig sowie im Szenario RCP 4.5 und RCP 8.5	86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Jährliche THG Emissionen in Österreich nach Sektoren	30
Tabelle 2: Vorratsvolumen in Ur- und Naturwäldern in Mitteleuropa	44
Tabelle 3: Halbwertszeiten unterschiedlicher Quellen für verschiedene Sortimente	48
Tabelle 4: Zu Grunde gelegte Nutzungsdauern in der CareforParis-Studie	48
Tabelle 5: Direkte CO ₂ -Emissionen verschiedener Brennstoffe bezogen auf den Primärenergiegehalt	52
Tabelle 6: Kohlenstoffsinkenwirkung von drei Szenarien aus der CareforParis-Studie für das Jahr 2050	57
Tabelle 7: Liste der Gesprächspartner:innen (in alphabetischer Reihenfolge)	105

Abkürzungsverzeichnis

APCC – Austrian Panel on Climate Change
BfN – Bundesamt für Naturschutz
BFW – Bundesforschungszentrum für Wald
DCO – Deep Carbon Observatory
EEA – European Environment Agency (Europäische Umweltagentur)
Efm – Erntefestmeter
EU – Europäische Union
IPCC – The Intergovernmental Panel on Climate Change
LULUCF – Land Use, Land-Use Change and Forestry
MCPFE – Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe
NDC – Nationally Determined Contributions
ÖWI – Österreichische Waldinventur
ÖWAD – Österreichischer Walddialog
PNV – Potenziell natürliche Vegetation
PNWG – Potenziell natürliche Waldgesellschaft
ppm – parts per million (Millionstel)
RCP – Representative Concentration Pathways (Repräsentative Konzentrationspfade)
TEC – Total Ecosystem Carbon
THG - Treibhausgase
UBA – Umweltbundesamt
UWD – Umweltdachverband
UZV – Umtriebszeitverkürzung
Vfm – Vorratsfestmeter
VfmS – Vorratsfestmeter Schaftholz
VRA - Vorratsaufbau

1 EINLEITUNG

Der Wald gerät im Klimawandel zunehmend unter Druck, während gesellschaftliche, wirtschaftliche und politische Anforderungen an ihn wachsen.

In den letzten Jahren gab es eine Reihe von Studien, die beispielsweise wie die CareforParis-Studie Nutzungsszenarien favorisieren, während zunehmend auch Stimmen auftauchen, die eine Reduktion der Nutzungseingriffe und einen damit verbundenen Vorratsaufbau („Proforestation“), also die Speicherung von Kohlenstoff im Wald fordern.

Die neue EU-Biodiversitätsstrategie (2020) und EU-Waldstrategie (2021) betonen das Potenzial von Außernutzungsstellungen für die Kohlenstoffspeicherung in Kombination mit dem Biodiversitätsschutz. Das führte zu kontroversiellen Reaktionen aus dem Forstwirtschaftssektor, der weitgehend einhellig der Meinung ist, dass durch eine Nutzung der Holzbiomasse als Bau- oder Möbelholz sowie deren energetische Nutzung der bessere Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden kann.

Die hier vorliegende Studie ist eine Bestandsaufnahme zur aktuellen Diskussion rund um Kohlenstoffspeicherung im Wald, die aktuelle Debatte rund um Nutzung und Vorratsaufbau und die Verbindung zu Biodiversität.

In den letzten Jahren gab es eine exponentielle Zunahme an Studien, Positionspapieren und Strategien, die teils widersprüchlich sind.

Gerade rund um das Thema Kohlenstoffspeicherung, Klimawandel und Substitution fossiler Energieträger wird die Diskussion teilweise sehr emotional geführt. Durch die Unsicherheiten über die tatsächliche Entwicklung und viele Forschungslücken basieren fast alle Studien auf einer Vielzahl von Annahmen, die in Prognosen und Modellen münden, die unterschiedlich interpretiert werden.

Die vorliegende Studie ist ein Versuch, den aktuellen Wissenstand, aktuelle Lücken, debattierte Annahmen und harte Fakten aufzubereiten, um eine breite und sachliche Diskussion dieses wichtigen Themas zu ermöglichen.

1.1 Aufbau der Studie

Die Meta-Studie ist wie folgt aufgebaut:

Kapitel 2: Die Geschichte des Kohlenstoffs auf der Erde

Dieses Kapitel beleuchtet, welche Kohlenstoffpools es gibt und wie diese miteinander in Form von Kohlenstoffkreisläufen interagieren. Als Grundlagenkapitel umreißt es auch die historische Entwicklung des Kohlenstoffgehalts in der Atmosphäre und den unterschiedlichen Pools und wie dies mit dem Klima zusammenhängt.

Kapitel 2 beantwortet somit u. a.,

- wie der Kohlenstoffkreislauf auf der Erde seit Mio. von Jahren funktioniert,
- was der Unterschied zwischen Kohlenstoff und Kohlendioxid ist,
- wie man Mengenangaben für Kohlendioxid in Kohlenstoff umrechnet und umgekehrt,
- wie der Kohlenstoffvorrat der Erde verteilt war und ist,
- welche unterschiedlichen Kohlenstoffpools es gibt und wie Kohlenstoff und Klimawandel zusammenhängen.

Kapitel 3: Zusammenhang zwischen Kohlenstoffspeicherung in Wäldern und Biodiversität

Terrestrische Ökosysteme, insbesondere Wälder, sind riesige Kohlenstoffspeicher. Dieses Kapitel beleuchtet, wie Kohlenstoffspeicherung im Wald funktioniert. Besonderes Augenmerk liegt darauf, wie Waldbiodiversität, Energieflüsse im Wald sowie die zeitliche Entwicklungsdynamik in bewirtschafteten und unbewirtschafteten Wäldern erfolgen.

Kapitel 3 beantwortet somit u. a.,

- wie Kohlenstoffspeicherung im Wald und Biodiversität zusammenhängen,
- warum Totholz für die Biodiversität im Wald wichtig ist,
- wie sich die Entnahme von Totholz auf die Biodiversität und den Nährstoffhaushalt des Waldes auswirken,
- wie lange ein vollständiger Zyklus der Waldentwicklung in einem europäischen Urwald dauert,

- warum frühes Abholzen kritisch zu sehen ist.

Kapitel 4: Wälder als Kohlenstoffsенke und Kohlenstoffquelle

Eine Schlüsselfrage in der Thematik ist die Frage, wie viel und wie lange Wälder Kohlenstoff zusätzlich speichern. Grundsätzlich binden Wälder durch Pflanzenwachstum und Humusaufbau im Boden Kohlenstoff aus der Atmosphäre und geben diesen durch Totholzzersetzung, Veratmung und Verrottung wieder an die Atmosphäre frei. Je nach Umwelteinflüssen wie Ernte, Katastrophen, Wasserhaushalt oder Klima, ist ein Wald Quelle, Senke oder im Gleichgewicht. Dieses Kapitel beleuchtet Faktoren, die die Quell- oder Senkenfunktion beeinflussen.

Kapitel 4 beantwortet u. a.,

- wie eine positive Senkenwirkung im Wald entsteht,
- wie der Kohlenstoffkreislauf im Wald funktioniert,
- warum das Gleichgewicht in Hinblick auf Kohlenstoffsенken und Kohlenstoffspeicherung gestört ist,
- wovon die Größe des jeweiligen Kohlenstoffpools abhängt,
- welche Baumart wie viel Kohlenstoff aufnehmen kann,
- wie sich die klimatischen Bedingungen auf die Kohlenstoffakkumulation im Wald auswirken,
- wie viel Tonnen Kohlenstoff im österreichischen Wald gespeichert sind,
- warum Berechnungen der Kohlenstoffspeicherkapazität großen Schwankungsbreiten unterliegen,
- warum Störungsregimes den größten Unsicherheitsfaktor in allen Szenarien und Modellierungen darstellen,
- welche Rolle die Schadholzaufarbeitung dabei spielt,
- warum es als illusorisch gilt, die Emission von fossilem CO₂ langfristig über die CO₂-Aufnahme von Waldökosystemen zu lösen.

Kapitel 5: Kohlenstoffspeicherung in Wäldern versus Holznutzung

Kohlenstoff wird entweder im Wald in Biomasse oder nach der Ernte und Weiterverarbeitung in der kaskadischen Verwertung in Holzprodukten gespeichert. Je nach Systemgrenze und dahinter liegenden Annahmen gibt es hier eine große Bandbreite an Ergebnissen, die entweder eine Kohlenstoffspeicherung im Wald favorisieren oder Nutzungsoptionen,

die eine möglichst große Speicherung außerhalb des Waldes in Form von stofflicher Nutzung und energetischer Substitution fordern. In letzteren wird vor allem damit argumentiert, dass die Nutzung von Holzprodukten fossile Energieträger zurückdrängt.

Dieses Kapitel stellt wesentliche Haltungen, Ergebnisse, Positionen basierend auf den vorhandenen Daten, Studien und Modellen gegenüber.

Kapitel 5 beantwortet somit u. a.

- welche Arten der Kohlenstoffspeicherung es gibt,
- wie viel Tonnen Kohlenstoffdioxid jährlich in Österreich in Holzprodukten gespeichert werden,
- wie viele Reserven im Speichervolumen der österreichischen Wälder vorhanden ist und warum,
- welche Argumente für eine Intensivierung der Holzwirtschaft vorgebracht werden,
- warum Menge und Verwendungsdauer beim Ausbau des Holzprodukt pools unbedingt einzuberechnen sind
- welche Argumente gegen eine Intensivierung der Holzwirtschaft vorgebracht werden,
- welche Argumente für einen größeren Holzvorratsaufbau im Wald vorgebracht werden,
- welche Argumente gegen einen größeren Holzvorratsaufbau im Wald vorgebracht werden,
- warum es essenziell ist, Import- und Exportströme in die Kohlenstoffflüsse miteinzuberechnen,
- warum es entscheidend ist, den österreichischen Holzmarkt nicht isoliert zu betrachten,
- warum die Nutzung von Zertifizierungssystemen beim Holzimport und -export wichtig ist.

Kapitel 6: Rolle von Waldökosystemen in Österreich und Europa hinsichtlich der Erreichung der Pariser Klimaziele

Waldökosystemen wird eine sehr prominente Rolle im Klimaschutz und bei der Erreichung der Klimaziele zugeschrieben. Dieses Kapitel beleuchtet, ausgehend von den vorhandenen Daten zum österreichischen Wald und den Ergebnissen aus Kapitel 5 das derzeitige und zukünftig mögliche Potenzial der Kohlenstoffspeicherung im Wald

durch Vorratsaufbau, durch Nutzung in Form von Holzprodukten bzw. durch Substitution fossiler Energien.

Kapitel 6 beantwortet somit u. a.,

- welche Vorgaben die Pariser Klimaziele für Österreich und die EU enthalten,
- welche Rolle Waldökosysteme bei der Erreichung der Pariser Klimaziele spielen,
- warum der Wald als essenzieller Partner bei der Lösung der Klimakrise zu behandeln ist,
- wie die Nichtnutzung der Wälder die Umstellung der Energiewirtschaft unterstützen kann,
- warum die Förderung von Biomassekraftwerken als kritisch zu sehen ist,
- welche Rolle die jeweilige Altersklasse eines Waldes hinsichtlich seiner Kohlenstoffspeicherkapazität spielt,
- wie sich die Waldbestände in Österreich seit den 1980er Jahren verändert haben,
- wo Österreich im globalen Vergleich bzgl. Holzvorratsaufbau liegt,
- welche Potenziale zur Optimierung der Senkenwirkung im Wald es gibt.

Kapitel 7: Auswirkung des Klimawandels auf den Wald, Waldbiodiversität und Kohlenstoffspeicherung

Der Wald gerät im Klimawandel zunehmend unter Druck, was die Erfüllung der vielfältigen Ansprüche an den Wald sowie die Waldbesitzer:innen vor große Herausforderungen stellt. Dieses Kapitel beschreibt kurz, wie sich der Klimawandel auf den Wald, die Waldbiodiversität und damit auch auf die Kohlenstoffspeicherung auswirkt und gibt Ausblicke, in welche Richtungen sich der Wald in Zukunft entwickeln könnte.

Kapitel 7 beantwortet somit u. a.,

- vor welche Herausforderungen der Klimawandel den Wald allgemein stellt,
- wie sich die nachhaltig verfügbare Holzmenge dadurch verändern kann,

- wie sich der (Gebirgs)Wald durch den Klimawandel verändern wird,
- mit welchen Extremwetterereignissen Österreich zukünftig häufiger konfrontiert sein wird und wie sich diese auf den Wald auswirken,
- womit die derzeit wirtschaftlich meistgenutzte Baumart Fichte konfrontiert wird,
- wie der Klimawandel die Konkurrenzsituation unter den Baumarten beeinflusst,
- welche Baumarten resilienter als andere sind und unter welchen Bedingungen,
- vor welche Herausforderungen der Klimawandel die Waldbesitzer:innen stellt,
- wie sich der Klimawandel auf den Wald, die Waldbiodiversität und damit auch auf die Kohlenstoffspeicherung auswirkt,
- warum teilweise angenommen wird, dass die hohen Senkenraten des Waldes nur temporär sind und welche Maßnahmen dieser Hypothese erfolgreich entgegenwirken können,
- wie der Wald der Zukunft aussehen könnte,
- welche Rolle Dauerwald- und Plenterwaldkonzepte spielen werden und was diese auszeichnet.

Kapitel 8: Anpassungsmaßnahmen für einen klimafitten Wald

Unbestritten ist, dass sich der Wald an den Klimawandel anpassen muss. Dies kann entweder durch natürliche Prozesse oder aktive Maßnahmen erfolgen.

Das Kapitel gibt einen Überblick über die derzeit wichtigsten erforderlichen Anpassungsmaßnahmen.

Kapitel 8 beantwortet somit u. a.,

- welche Anpassungsmaßnahmen für einen klimafitten Wald derzeit diskutiert werden,
- warum es viele Unsicherheiten in den Prognosen gibt,
- welche Faktoren für ein erfolgreiches Risikomanagement wichtig sind,
- warum und wie Naturverjüngung der Schlüssel zu einer angepassten Waldentwicklung sein kann,

- wie eine hohe Resilienz der Wälder erreicht werden kann,
- welchen Stressfaktoren der Wald ausgesetzt ist und wie sie reduziert werden können,
- wie massiv sich die Baumartenkombinationen in den nächsten 50 Jahren verändern werden,
- welche Probleme die Neueinführung von Baumarten verursachen kann,
- wie ein klimafitter Wald der Zukunft aussehen kann,
- warum Dauerwälder zunehmend an Popularität gewinnen.

Kapitel 9: Notwendige politische Entscheidungen und gesellschaftliche Veränderungen

In Anbetracht der Klimakrise, gewinnt die gesellschaftliche und politische Debatte über Klimawandel und Biodiversität und damit auch über die nationale Umsetzung der EU-Biodiversitäts- und Waldstrategien auch in Österreich an Fahrt.

Dieses Kapitel umfasst die wichtigsten Forderungen und notwendigen Änderungen an Politik und Gesellschaft, um der Klimakrise im und für den Wald bestmöglich begegnen zu können.

Kapitel 9 beantwortet somit u. a.,

- wie die Klimakrise und die Biodiversitätskrise zusammenhängen,
- welche politischen Entscheidungen notwendig werden, um der Klimakrise im und für den Wald bestmöglich zu begegnen,
- welche konkreten Ziele sich die EU und damit auch Österreich gesetzt haben,
- welche rechtlichen Rahmenbedingungen, Regularien, Positionspapiere etc. es derzeit in Österreich und auf Ebene der EU gibt, die sich damit auseinandersetzen,
- welche gesellschaftlichen Änderungen notwendig werden, um der Klimakrise im und für den Wald bestmöglich zu begegnen,
- wie sich die europäische Waldstrategie 2030 von der Österreichischen Waldstrategie 2020+ unterscheidet,
- warum und wie die Einführung von Kohlenstoffzertifikaten Sinn macht,
- warum es weitere Reglementarien bei einer Reduktion der Holzernte in Österreich braucht,

- warum die Förderung von Biomasseanlagen zugunsten anderer Energiequellen reduziert werden sollte,
- warum der Kohlenstoffspeicherfunktion gegenüber der energetischen und stofflichen Substitutionsfunktion Priorität eingeräumt werden sollte,
- welche prioritären Handlungsfelder für die politischen Entscheidungsträger:innen in Österreich ableitbar sind.

1.2 Struktur der Kapitel und Hinweise zur Verwendung

Die Kapitel geben einen Überblick über das jeweilige Thema, beleuchten aktuelle Themen, den derzeitigen Wissensstand sowie offene Fragen. Einzelne Fallbeispiele, Auszüge aus vorab geführten Interviews und die Nennung möglicher Interviewpartner:innen sollen weiterführende Diskussionen ermöglichen.

Die Vorschläge für weiterführende Interviewpartner:innen waren teilweise Gesprächspartner:innen für die vorliegende Studie oder sind wichtige (nationale) Fachexpert:innen zum Thema. Bei einer Kontaktaufnahme ist zu berücksichtigen, dass diese nicht vorab vom Autor:innenteam informiert wurden.

1.3 Methodik

Die vorliegende Studie basiert weitestgehend auf einer ausführlichen Literaturrecherche und Sichtung wissenschaftlicher Quellen sowie auf aktuellen Studien und Ergebnissen im österreichischen Kontext. Sie ist somit als Meta-Studie zu verstehen. Eigene Erhebungen wurden nicht durchgeführt.

Ergänzend wurden 11 semistrukturierte Leitfadeninterviews mit unterschiedlichen Interessensgruppen aus Forschung, Politik, Forstwirtschaft und Zivilgesellschaft geführt, um unterschiedliche Perspektiven und Positionen zur Thematik zu erhalten (Liste der Gesprächspartner:innen siehe Anhang).

1.4 Wichtige Definitionen und Begrifflichkeiten

Albedoeffekt

Der Albedoeffekt bezeichnet das Rückstrahlvermögen einer nicht spiegelnden Oberfläche. Dabei wird das Verhältnis von reflektierter zu absorbierter Strahlung angegeben. Eine weiße Schneedecke hat ein Albedo von 0,95 – das bedeutet, sie nimmt fast keine Strahlung auf. Eine schwarze Oberfläche dagegen absorbiert die gesamte Strahlung und hat daher ein Rückstrahlvermögen von 0.

Biodiversität

Der Begriff Biodiversität oder biologische Vielfalt beschreibt die Vielfalt des Lebens auf der Erde und ihre Zusammenhänge in ihrer gesamten Bandbreite. Konkret beschreibt Biodiversität:

- Die Vielfalt innerhalb der Arten, also ihre genetische Bandbreite (genetische Ebene)
- Die Vielfalt an Arten (organismische Ebene)
- Die Vielfalt an Lebensgemeinschaften von Arten und ihre Wechselbeziehungen (ökosystemare Ebene)

Biomasse

Biomasse ist allgemein die gesamte erzeugte organische Substanz, welche durch Pflanzen, Tiere und Menschen anfällt. In der Energietechnik ist mit Biomasse nur die energetisch nutzbare Biomasse gemeint.

Boreale / hemiboreale Wälder

Boreale Wälder sind Wälder in der kaltgemäßigten Klimazone auf der Nordhalbkugel. Nadelbäume aus den Gattungen Fichte, Tanne, Lärche und Kiefer bilden teils gemischte, häufig aber monodominante Bestände. Die hemiboreale Zone ist zwischen der gemäßigten und der borealen Zone einzuordnen. In hemiborealen Wäldern überwiegen zwar auch Nadelbäume, aber eine signifikante Anzahl von Laubarten wie Espen, Eichen, Ahorn, Eschen, Birken, Buchen, Haselnüsse und Hainbuchen kommen ebenfalls vor.

CareforParis

CareforParis (Weiss et al., 2020b) ist ein Projekt, gefördert vom Austrian

Climate Research Programme, das die Auswirkungen von verschiedenen Waldbewirtschaftungsszenarien im und dessen Einfluss auf die Treibhausgas(THG)-Bilanz des waldbasierten Sektors Österreichs in sechs Szenarien bis 2150 untersuchte. Der wissenschaftliche Abschlussbericht, an dem das Bundesforschungszentrum für Wald (BFW), die Universität für Bodenkultur (BOKU), Wood K plus und das Umweltbundesamt mitgearbeitet haben, wurde 2020 veröffentlicht.

Dauerhumus

Mit Humus wird die gesamte abgestorbene organische Substanz eines Bodens bezeichnet. Man unterscheidet zwischen dem durch Mikroorganismen abbaufähigen Teil, dem Nährhumus, und dem als schwer zersetzlich verbleibenden Rückstand, dem Dauerhumus.

Evapotranspiration

Evapotranspiration bezeichnet die Summe aus Transpiration und Evaporation, also der Verdunstung von Wasser aus Tier- und Pflanzenwelt sowie von Boden- und Wasseroberflächen.

Kaskadische Holznutzung

Bei einer kaskadischen Holznutzung werden die verschiedenen Baumteile bei der Holzernte für alle Verwertungsbereiche genutzt. Es geht daher nicht um die Bereitstellung von entweder Industrie- oder Energieholz – sondern um ein besonders intelligentes marktwirtschaftlich orientiertes Optimieren der anfallenden Holzmengen sowohl für die verschiedenen Industriezweige als auch für die energetische Verwendung.

Kalamität

Als Waldkalamität bezeichnet man eine Massenerkrankung von Waldbeständen, die zu großflächigen Ausfällen führen können und damit meist mit wirtschaftlichen Folgen für den Menschen verbunden sind.

Kohlenstoff

Kohlenstoff, CO₂ und CO₂-Äquivalente

Die Begriffe Kohlenstoff, CO₂ und CO₂-Äquivalente tauchen regelmäßig in der Diskussion rund um Kohlenstoffspeicherung

auf, bedeuten aber nicht das Gleiche:

- C (Kohlenstoff) ist das chemische Element, das gemeinsam mit dem chemischen Element Sauerstoff Kohlenstoffdioxid bildet.
- CO₂ (Kohlenstoffdioxid): Kohlen(stoff)dioxid ist die chemische Zusammensetzung des Treibhausgases CO₂ und besteht aus zwei Teilen Sauerstoff und einem Teil Kohlenstoff.
- CO₂eq (CO₂-Äquivalente) sind eine Maßeinheit, um die Klimawirkung unterschiedlicher Treibhausgase vergleichbar zu machen, indem diese mit der Wirkung von Kohlenstoffdioxid verglichen werden. So hat etwa Methan eine 28-fache Treibhauswirkung wie Kohlenstoffdioxid. Also entspräche 1 g Methan 28 g CO₂eq.

Diese Begrifflichkeiten sind besonders wichtig, da im Kontext der Kohlenstoffspeicherung meist von t CO₂, t C oder t CO₂eq gesprochen wird. Die Umrechnung von „C“ zu „CO₂“ erfolgt mit dem Faktor 3,67. Das bedeutet, dass eine t Kohlenstoff 3,67 t Kohlenstoffdioxid entspricht. CO₂ und CO₂eq bedeuten das Gleiche.

Kohlenstoffspeicher

Überall dort, wo Leben ist, ist auch ein Kohlenstoffspeicher. Die natürlichen Kohlenstoffreservoirs (= Speicher) sind Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre, Pedosphäre, Lithosphäre.

Kohlenstoffpool

Der Kohlenstoffpool bezeichnet den Gesamtvorrat von Kohlenstoff in einem Ökosystem oder dessen Kompartimenten. In einem Kohlenstoffspeicher sind Kohlenstoffpools (= Kohlenstoffvorrat) für eine unbestimmte Zeitspanne enthalten.

Kohlenstoffkreislauf

Die Pools der natürlichen Kohlenstoffreservoirs (Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre, Pedosphäre, Lithosphäre) stehen in einem ständigen Austausch zueinander.

Kohlenstoffsенke

Ein Kohlenstoffspeicher kann sowohl Quelle als auch Senke für Kohlenstoff-Flüsse sein. Jedes Ökosystem, das mehr Kohlenstoff aufnimmt als abgibt, wird als Kohlenstoff- oder CO₂-Senke bezeichnet.

Kohlenstoffquelle

Reservoirs können jederzeit ihre Rolle vertauschen, also z. B. von einer Kohlenstoffsенke zu einer Kohlenstoffquelle werden. Als Kohlenstoffquellen werden daher Ökosysteme bezeichnet, die mehr Kohlenstoff an die Atmosphäre abgeben als sie aufnehmen.

Kohlenstoffsequestrierung

Als Kohlenstoffsequestrierung bezeichnet man die Aufnahme und Speicherung atmosphärischen Kohlenstoffs durch Pflanzen, insbesondere Bäume. Sie kann etwa durch Landnutzungsänderung oder Aufforstung erfolgen.

Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (Land Use, Land Use Change and Forestry, LULUCF)

LULUCF behandelt Maßnahmen im Bereich der Forstwirtschaft und Landnutzung im Kyoto-Protokoll. Wälder können als Kohlenstoffsенken in die CO₂-Bilanz einbezogen werden.

National festgelegte Beiträge (Nationally Determined Contributions, NDC)

NDCs beschreiben die von den Staaten selbst festgelegten Beiträge der einzelnen Nationalstaaten zur Emissionsreduktion gemäß den Pariser Klimazielen.

Nettoprimärproduktion

Nettoprimärproduktion ist die Gesamtmenge des organischen Materials, das von Lebewesen mit der Kraft der Sonne hergestellt wird. Man kann die Nettoprimärproduktion in Biomasse, in gebundenem Kohlenstoff oder in Energie messen.

Netto-Treibhausgasemission

Netto-Treibhausgasemissionen sind die Treibhausgasemissionen nach den Abzügen durch natürliche und künstliche Senken.

Holzproduktepool

Auch nach der Ernte im Wald ist der Kohlenstoff weiterhin im Holz gespeichert. Wird das Holz z. B. für Möbel oder im Hausbau eingesetzt, bleibt der Kohlenstoff in diesen Holzprodukten gespeichert und wird erst verzögert wieder freigesetzt. Wie lange der Kohlenstoff gespeichert wird, hängt vornehmlich von der Lebensdauer der Produkte ab. Hier werden vier Holzproduktklassen unterschieden. Produkte mit langer, mittlerer und kurzer Lebensdauer sowie Energieholz.

Holzstromanalyse

Ziel einer Holzstromanalyse ist es aufzuzeigen, wie die Relationen zwischen heimischer Holzproduktion bzw. Import sowie stofflicher und energetischer Nutzung sind und welche Größenordnung die einzelnen Verbrauchskanäle mengenmäßig einnehmen.

Pariser Klimaziele

Das Übereinkommen von Paris gibt einen globalen Rahmen zur Bekämpfung des Klimawandels vor: Die Erderwärmung soll deutlich unter 2°C gehalten werden; der Temperaturanstieg soll durch weitere Maßnahmen auf 1,5°C begrenzt werden. Außerdem sollen die Länder bei der Anpassung an die Folgen des Klimawandels unterstützt werden.

Das Übereinkommen von Paris ist die erste umfassende und rechtsverbindliche weltweite Klimaschutzvereinbarung und wurde im Dezember 2015 auf der Pariser Klimakonferenz (COP21) geschlossen.

Proforestation

Unter Proforestation versteht man die Aufforstung eines bestehenden Waldes, um sein volles ökologisches Potenzial auszuschöpfen. Dabei handelt es sich um eine naturnahe Lösung, bei der bestehende Wälder als intakte Ökosysteme geschützt werden, um ein kontinuierliches Wachstum zur maximalen Kohlenstoffspeicherung und ökologischen und strukturellen Komplexität zu fördern.

Repräsentativer Konzentrationspfad (representative concentration

pathway, RCP)

Der Begriff repräsentativer Konzentrationspfad wird seit dem Fünften Sachstandsbericht des Weltklimarates (IPCC) zur Beschreibung von Szenarien für den Verlauf der absoluten Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre verwendet.

Störung / Störungsregime

Eine Störung ist ein von außerhalb einwirkender, das System verändernder Faktor. Störung wird in der Ökologie wertfrei genutzt. Oft lassen sich bestimmte Ökosystem sogar nur durch ein Störungsregime erhalten.

Substitution / energetische Substitution

Bei der energetischen Substitution geht es um den Ersatz von fossilen Brennstoffen. Durch die energetische Nutzung von Holz werden fossile Treibhausgasemissionen vermieden, die z.B. bei der Verbrennung von Kohle anfallen.

Substitution / stoffliche Substitution

Wird das Holz stofflich genutzt, können andere energieintensivere Materialien ersetzt (substituiert) werden. Durch die Verwendung von z. B. Holzfenstern werden fossile Treibhausgasemissionen vermieden, die beispielsweise bei der Herstellung von Aluminiumfenstern anfallen

Trockenstress

Trockenstress ist eine außergewöhnliche Belastung für Pflanzen, die durch Trockenheit, also Wassermangel, ausgelöst wird. Wassermangel limitiert die Entwicklung der Pflanze.

Umtriebszeit

Die Umtriebszeit ist die durchschnittliche Dauer von der Begründung eines Waldes bis hin zu seiner Ernte.

Wald

Altersklassenwald

Anders als im Dauerwald oder Plenterwald stehen im Altersklassenwald die verschieden alten Bäume nicht gemischt, sondern in etwa gleich alten Beständen räumlich voneinander

getrennt. Erfolgt Waldbau in einem Zyklus von Pflanzung, Pflege, Ernte (Kahlschlag) und erneutem Pflanzen, spricht man von Altersklassenwald.

Dauerwald

Der Dauerwald zeichnet sich durch ein naturnahes Waldpflege- und Nutzungskonzept aus, welches durch mehrschichtige, ungleichaltrige und überwiegend gemischte Bestände gekennzeichnet ist. Aus dem stetig bestockten Wald entstehen strukturreiche Bestände, die durch Einzelbaumnutzung und Naturverjüngung „dauerhaft“ zur Holzproduktion erhalten werden.

Naturverjüngung

Naturverjüngung bezeichnet Verjüngungsverfahren im Waldbau, bei dem sich die Bäume natürlich reproduzieren. Naturverjüngung entsteht durch selbstständige Saat von Bäumen oder durch vegetative Vermehrung (Stockausschlag).

Naturwald / Naturwalddynamik

Als Naturwälder oder Naturwald-Reservate werden Waldflächen bezeichnet, in denen die (forstliche) Nutzung komplett eingestellt wird.

Plenterwald

Der Plenterwald ist ein vom Menschen bewirtschafteter, naturnaher Hochwald. Er ist dadurch gekennzeichnet, dass alle Stärkeklassen, vom Keimling bis zum Starkholz auf engem Raum nebeneinander vertreten sind. Im Plenterbetrieb gibt es keinen Kahlschlag, es werden immer nur einzelne, erntereife Stämme entnommen. Auf diese Weise bleiben eine vielfältige Struktur und das Waldklima dauerhaft erhalten, der Plenterwald ist somit eine Sonderform des Dauerwalds.

Primärwald / Urwald

Als Primärwald oder Urwald wird von menschlicher Einflussnahme nicht berührter Wald bezeichnet, mithin eine ökologische Klimaxgesellschaft (Endzustand der Vegetation).

Sekundärwald

Ein Sekundärwald oder, nach massiven Eingriffen, zunächst eine Sekundärvegetation mit unterschiedlich stark veränderter Artenzusammensetzung entwickelt sich nach menschlichen Eingriffen wie Straßenbau, Holzeinschlag, Brandrodung, Etagenanbau.

Vorratsaufbau

Gezielte Erhöhung des Holzvolumens der stehenden Bäume durch Reduzierung des Einschlags. Dabei wird jährlich weniger genutzt als diesem Zeitraum zuwächst.

Waldgesellschaft

Als Waldgesellschaft versteht man einen klar abgrenzbaren Waldtyp, der durch seine Artenkombination geprägt ist. Dabei spielen aber nicht nur die Baumarten eine Rolle, sondern auch die restliche Vegetation, insbesondere die krautigen Pflanzen sind entscheidend für die Feineinteilung, also die Bestimmung der Assoziation. Die Assoziation ist die kleinste Vegetationseinheit.

Wirtschaftswald

Als Wirtschaftswald oder Nutzwald werden umgangssprachlich Wälder bezeichnet, die forstwirtschaftlich genutzt werden.

2 DIE GESCHICHTE DES KOHLENSTOFFS AUF DER ERDE

2.1 Kernbotschaften

- Es gibt immer gleich viel Kohlenstoff im Kohlenstoffkreislauf der Erde, es ändern sich nur Ort und Form.
- Die größten Kohlenstoffpools liegen im Inneren der Erde (Erdkern, Erdmantel, Erdkruste).
- Oberhalb der Gesteinsdecken haben die tiefen Schichten der Ozeane den größten Anteil an Kohlenstoff.
- Die Kohlenstoffpools der Biomasse (Biosphäre), der Atmosphäre und der Ozeane sind im ständigen Austausch.
- Kohlenstoffsinken in den Ozeanen und an Land verlangsamen den Anstieg von CO₂ in der Atmosphäre.
- Atmosphäre, Landbiosphäre und Ozean tauschen permanent Kohlenstoff aus
- Seit 800.000 Jahren lag der Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre konstant unterhalb von 300 ppm¹, heute liegt er bei Jahresdurchschnittswerten von 410 ppm.
- In den letzten 100 Jahren wurde durch anthropogene Aktivitäten 40- bis 100-mal mehr Kohlenstoff aus fossilen Lagerstätten freigesetzt, als es den natürlichen Prozessen entspricht.
- Temperaturänderungen ergeben sich aus der Wechselwirkung zwischen Pflanzenwachstum und CO₂-Gehalt der Atmosphäre.

2.2 Kohlenstoff versus Kohlendioxid

Es führt oft zu Verwirrung, wenn Kohlenstoffspeichermengen und Emissionen von Treibhausgasen verglichen werden. Das Element Kohlenstoff (Carbon, chemisches Symbol „C“) kommt in der Natur in reiner Form als Diamant oder Graphit vor, viel häufiger jedoch in Calciumcarbonat (Kalk) oder organischen Kohlenwasserstoffverbindungen biologischen Ursprungs (Stärke, Zucker, Zellulose, aber auch Kohle, Erdöl oder Erdgas).

Das gasförmige Kohlendioxidmolekül besteht aus einem Kohlenstoffatom und zwei Sauerstoffatomen.

Kohlenwasserstoffverbindungen entstehen in erster Linie durch Photosynthese in den grünen Zellen von Pflanzen durch die Aufnahme von Kohlendioxid und Sonnenlicht. Sie haben ein höheres Energieniveau als Kohlendioxid. Durch Verbrennung (oder Veratmung in lebenden Organismen) werden Kohlenwasserstoffe wieder in Kohlendioxid umgewandelt.

Kohlenstoffspeicher werden in der Regel in t Kohlenstoff ausgedrückt. Dabei ist die reine Kohlenstoffmenge gemeint (nur das C-Atom).

Treibhausgasemissionen werden in der Regel in t Kohlendioxid angegeben, also dem Kohlenstoff-Sauerstoff-Molekül.

Bei der Verbrennung von Kohlenstoff verbindet sich ein Kohlenstoffatom (C) mit jeweils zwei Sauerstoffatomen (O) aus der Luft. Es entsteht Kohlendioxid (CO₂). Da die atomare Masse von Sauerstoff 16 g je Mol (gebräuchliche Mengeneinheit von Atomen und Molekülen) beträgt und die von Kohlenstoff 12 g je Mol, wiegt ein Mol Kohlendioxid 44 g. Der Umrechnungsfaktor von Kohlenstoff zu Kohlendioxid beträgt, bedingt durch das Masseverhältnis 44:12, somit 3,67. Wird eine t Kohlenstoff verbrannt, entstehen folglich 3,67 t Kohlendioxid.

¹ ppm (Teile pro Million) ist das Verhältnis der Anzahl von Treibhausgasmolekülen zur Gesamtzahl der Moleküle in trockener Luft.

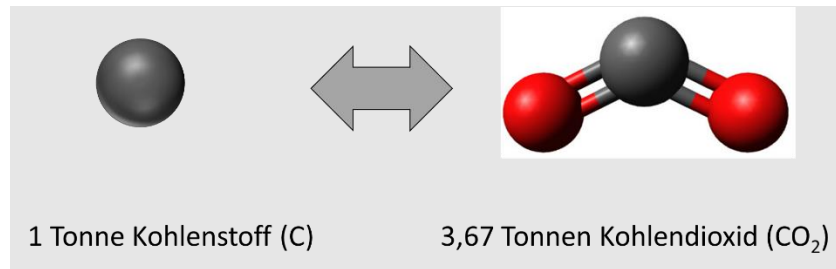


Abbildung 1: Verhältnis Kohlenstoff (C) zu Kohlendioxid (CO₂)

Dieser Umrechnungsfaktor ist immer zu berücksichtigen, wenn zwischen Treibhausgasmengen und Kohlenstoffspeicher verglichen wird.

2.3 Klimatische Entwicklung und Kohlenstoffkreislauf in der Erdgeschichte in der früheren Atmosphäre

Kohlendioxid seit Beginn der Erdgeschichte

Ebenso wie die Temperatur war auch der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre im Laufe der Erdgeschichte starken Schwankungen unterworfen. Vor etwa 4 Milliarden Jahren enthielt die Uratmosphäre praktisch keinen Sauerstoff, hatte aber einen sehr hohen Gehalt an Kohlendioxid, Wasserdampf und Methan.

Obwohl die Sonneneinstrahlung damals 25–30 % schwächer war als heute, herrschten aufgrund der hohen Konzentration von Treibhausgasen globale Durchschnittstemperaturen von über 50 °C. CO₂ wurde aus der Atmosphäre gelöst und in Sedimenten im Ozean gebunden. Ebenso wurde durch die Verwitterung von Gesteinen an Land CO₂ aus der Atmosphäre gebunden und ebenfalls in Sedimenten dem Ozean zugeführt. Später kam die Entwicklung der Vegetation – in der ersten Phase waren es hauptsächlich Algen – hinzu, die der Atmosphäre durch Photosynthese Kohlendioxid entnahm. Die Folge war eine zunehmende Abkühlung der Atmosphäre. In dieser Phase wurden aus der Atmosphäre durch die Photosynthese große Mengen CO₂ entnommen und Sauerstoff an die Atmosphäre abgegeben. Da ein großer Teil der abgestorbenen Algenbiomasse in die Tiefen des Ozeans

absank und dort aufgrund von Sauerstoffmangel nicht abgebaut wurde, bildeten sich am Meeresboden große Kohlenstoffspeicher gebildet. Ein Teil der Sedimente gelangte in das Erdinnere und wurde geschmolzen. Durch Vulkanismus gelangte dann ein Teil des Kohlendioxids wieder in die Atmosphäre, was zu einer erneuten Erwärmung führte. Dieser Kohlendioxid-Regelkreis sorgte im Laufe der Erdgeschichte dafür, dass die Temperaturen der Erde nicht in ein Extrem abdrifteten, sondern zwischen sehr warmen Phasen von bis zu 50 °C und sehr kalten Phasen, in denen die Erde weitgehend vereist war, wechselten.

Etwas bessere Informationen liegen über diese Temperaturschwankungen der letzten 500 Millionen Jahre vor. In den ersten 100 Millionen Jahren dieses Zeitraums lag der CO₂-Gehalt zwischen 4.000 und 6.000 ppm (heute 400 ppm). Es folgte eine Periode mit ähnlich niedrigen CO₂-Werten wie heute und einer Eisbedeckung fast bis zum 30. Breitengrad, was in etwa der heutigen Lage von Kairo entspricht. Vor 250 bis 100 Millionen Jahren lag der CO₂-Gehalt wieder deutlich über 1.000 ppm. Es war die Zeit der Dinosaurier mit Temperaturen, die um 8 °C wärmer waren als heute. (Werscheck, 2004)

Kohlendioxid im Känozoikum

In den letzten 65 Millionen Jahren, dem Känozoikum (Erdneuzeit), nahm der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre jene Entwicklung, die zu den heutigen Klimabedingungen führte. In den ersten 30 Millionen Jahren lag er bei etwa 1.000 ppm und überschritt vor etwa 50 Millionen Jahren sogar 1.500 ppm. In dieser ersten Hälfte des Känozoikums war die Erde noch eisfrei. Ab etwa 35 Millionen Jahren vor heute nahm die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre tendenziell ab und lag schließlich bei etwa 300 ppm, was die Vergletscherung der Antarktis vor etwa 35 Millionen Jahren und die aktuelle Eiszeit vor etwa zweieinhalb Millionen Jahren auslöste (Hansen et al., 2008). Derzeit leben wir also in einer Warmzeit dieses Eiszeitalters.

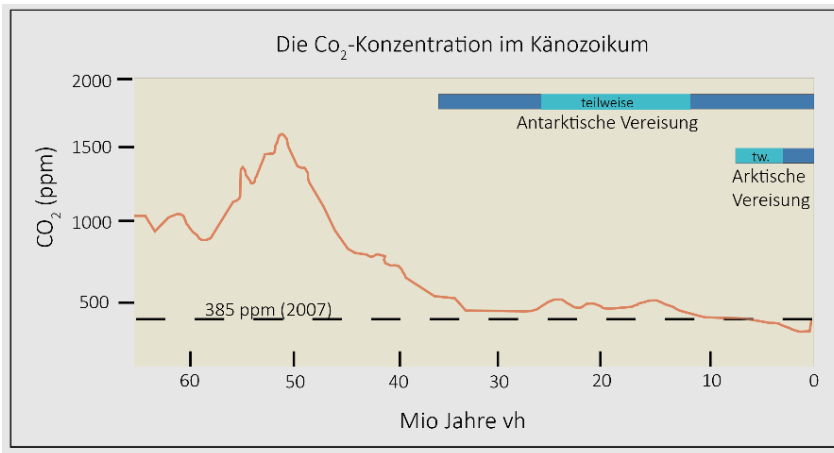


Abbildung 2: Der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre in den letzten 65 Millionen Jahren.

Die Konzentration zu Beginn des Känozoikums entspricht etwa dem extremen IPCC-Szenario (A1FI) für das Ende des 21. Jahrhunderts. Verändert nach Hansen et al. (2008).

Noch bessere Informationen über den CO₂-Gehalt der Atmosphäre gibt es über die vergangenen 740.000 Jahre von Eisbohrkernen aus der Antarktis, die auch besonders gut die Korrelation zwischen Temperatur und Kohlendioxidkonzentration belegen. Diese Zeit umfasst knapp die letzte Hälfte des so genannten Eiszeitalters, das durch fast regelmäßige Schwankungen zwischen Warm- und Kaltzeiten charakterisiert ist.

Grundlegende Ursache für diese Schwankungen sind Änderungen in den Parametern der Erdbahn um die Sonne. Die hierdurch bedingten zunächst relativ geringen Einflüsse auf den Strahlungshaushalt der Erde werden jedoch durch Änderungen der Albedo² und der atmosphärischen Konzentration der Treibhausgase, vor allem des Kohlendioxids, erheblich verstärkt. So führt eine Verringerung der Sonneneinstrahlung zur Bildung von Eis- und Schneeflächen, die

einfallende Sonnenstrahlen reflektieren und damit die eingeleitete Abkühlung verstärken. Außerdem reduziert sich durch die anfängliche Abkühlung die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre, da kühlere Ozeane mehr CO₂ aufnehmen können als wärmere. Erst durch die höhere Albedo und die geringere CO₂-Konzentration werden also die anfänglich nur gering fallenden Temperaturen um mehrere Grad gesenkt und eine neue Eiszeit beginnt. Umgekehrt läuft der Prozess zu Beginn einer neuen Warmzeit: Schmelzendes Eis verringert die globale Albedo, und der höhere CO₂-Gehalt, der primär aus der CO₂-Abgabe des sich erwärmenden Ozeans stammt, erwärmt die Atmosphäre.

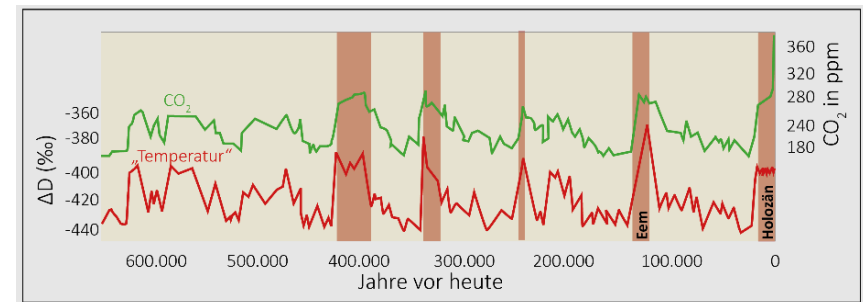


Abbildung 3: Änderungen der atmosphärischen CO₂-Konzentration in den letzten 640.000 Jahren

Sowie Schwankungen von Deuterium („Schwerer Wasserstoff“) als Proxy (Stellvertreterdaten) für Temperatur im arktischen Eis. Verändert nach IPCC (2007)

Kohlenstoffdioxid in der Gegenwart

Seit wenigstens 800.000 Jahren lag der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre konstant unterhalb von 300 ppm. Somit hat die gesamte Menschheitsentwicklung in einer relativ konstanten Klimaphase stattgefunden. Der kontinuierliche Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration im Laufe des Industriezeitalters ist eindeutig auf Emissionen aus menschlichen Aktivitäten zurückzuführen (IPCC, 2021).

² Albedo ist ein Maß für das Rückstrahlvermögen (Reflexionsstrahlung) von Licht und damit auch Wärme.

Kohlenstoffsinken in den Ozeanen und an Land verlangsamten den Anstieg des CO₂ in der Atmosphäre. Seit 2011 sind die Konzentrationen in der Atmosphäre weiter angestiegen und haben für Kohlendioxid (CO₂) Jahresdurchschnittswerte von 410 ppm erreicht. Land und Ozean haben in den letzten sechs Jahrzehnten einen nahezu konstanten Anteil (weltweit etwa 56 % pro Jahr) der CO₂-Emissionen aus menschlichen Aktivitäten aufgenommen, wobei es regionale Unterschiede gibt.

Zwischen 1750 und heute ist die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre um 47 % gestiegen. Dieser Anstieg übertrifft die sonst mehrere Jahrhunderte und Jahrtausende dauernden natürlichen Veränderungen zwischen Eis- und Zwischeneiszeiten in den letzten 800.000 Jahren. Im Jahr 2019 war die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre so hoch wie seit mindestens 2 Millionen Jahren nicht mehr.

Die Projektionen im aktuellen IPCC-Bericht (IPCC, 2021) zeigen, dass die CO₂-Senken an Land und im Meer in Szenarien mit hohen Emissionen zwar mehr CO₂ aufnehmen als in Szenarien mit niedrigen Emissionen, dass aber der Anteil der Emissionen, der durch natürliche Senken aus der Atmosphäre entfernt wird, dadurch aber zunehmend geringer wird.

Die CO₂-Senke an Land wird von der Kohlenstoffaufnahme durch die Vegetation angetrieben, wobei es große zwischenjährliche Schwankungen gibt, die beispielsweise mit ENSO³ zusammenhängen. Seit den 1980er Jahren hat die Kohlenstoffdüngung durch den Anstieg des atmosphärischen CO₂ die Stärke der Netto-CO₂-Senke im Boden erhöht. Wachstum der Ozeansenke wurde seit jeher in erster Linie durch die Wachstumsrate des atmosphärischen CO₂ bestimmt. (IPCC, 2021)

2.4 Kohlenstoffpool

Das Element Kohlenstoff ist die Grundlage allen Lebens auf der Erde und ein entscheidender Faktor für das Klima und die Geochemie. Die drei im Kontext des anthropogenen Klimawandels wichtigen Kohlenstoffspeicher Atmosphäre, Landbiosphäre und Ozean tauschen permanent Kohlenstoff aus, wobei sich der Austausch in Zeiträumen von bis zu Jahrhunderten vollzieht, was auf den ersten Blick langsam erscheint. Bedenkt man aber, dass Kohlenstoff in den Gesteinen der Erdkruste für Jahrtausende gebunden bleibt, dann kann man den Austausch zwischen den Kohlenstoffreservoirs Atmosphäre, Landbiosphäre und Ozean als rasch bezeichnen. Im Rahmen des Deep Carbon Observatory Programmes wurde 2019 eine Kohlenstoffbilanz der Erde erstellt (Lee et al., 2019). Demnach enthält die Erde insgesamt 1,85 Mrd. Gt Kohlenstoff – eine Gt entspricht einer Mrd. t. Mehr als 99,9 % dieser enormen Menge sind jedoch unter der Oberfläche gespeichert, verteilt auf Erdkern, Erdmantel und Erdkruste. Dort ist der Kohlenstoff sowohl elementar als auch in Form von chemischen Verbindungen in einer Vielzahl von Gesteinen und Mineralien enthalten. Nur etwa 47.500 Gt Kohlenstoff befinden sich oberhalb der Gesteinsdecken der Erde in den Ozeanen, in den Sedimenten und Böden der Landflächen, in der Biosphäre und in der Atmosphäre. Den größten Anteil daran haben die tiefen Bereiche der Ozeane mit rund 37.000 Gt Kohlenstoff. Die terrestrische Biosphäre enthält dagegen nur etwa 2.300 Gt Kohlenstoff, die Atmosphäre etwa 597 Gt.

Ein kleiner Teil des unterirdischen Kohlenstoffs kommt jedes Jahr durch Vulkane und andere natürliche Gasquellen ans Tageslicht, aber dieser Anteil wird inzwischen von den anthropogenen Kohlendioxidemissionen weit übertroffen.

All diese oberflächennahen Kohlenstoffkreisläufe unterliegen einem

³ El Niño und die Southern Oscillation (ENSO) beschreiben ein komplex gekoppeltes Zirkulationssystem von Erdatmosphäre und Meeresströmung im äquatorialen Pazifik. El Niño steht dabei eher für die ozeanischen Zusammenhänge, während die Südliche Oszillation bzw. Southern Oscillation für die atmosphärischen Zusammenhänge steht.

raschen Wandel und sind am stärksten von menschlichen Einflüssen geprägt.

Die Verteilung ist nicht statisch. Es findet ein ständiger Austausch zwischen den verschiedenen Kohlenstoffreservoirs statt. Jährlich entweichen etwa 280 bis 360 Mio. t Kohlenstoff in Form verschiedener Gase aus dem Untergrund in die Ozeane und die Atmosphäre. Diese Ausgasungen erfolgen bei Vulkanausbrüchen, aber auch schleichend und kontinuierlich an Gasaustritten in vulkanischen Gebieten und entlang tektonischer Nahtstellen. Umgekehrt kehrt der Kohlenstoff auch ständig ins Erdinnere zurück, vor allem durch die Subduktion von Erdplatten entlang von Plattengrenzen. Wenn dort Teile der Kruste in den Erdmantel gedrückt werden und schmelzen, bringen sie den in Sedimenten und Gesteinen gebundenen Kohlenstoff zurück in die Tiefe.

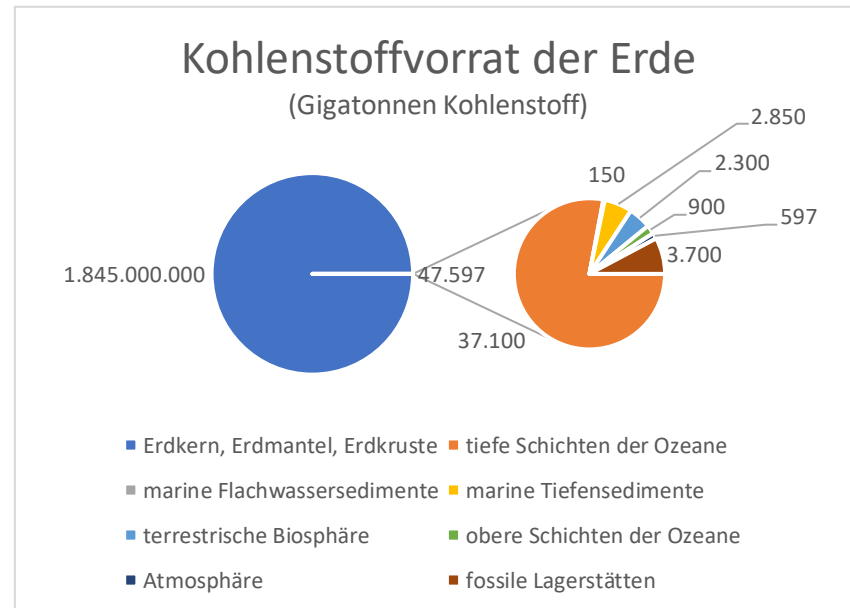


Abbildung 4: Kohlenstoffvorrat der Erde nach Lee et al. (2019)

Über Milliarden von Jahre hat die Erde ein Gleichgewicht zwischen dem Kohlenstoff, der durch Subduktion ins Erdinnere gelangt, und dem Kohlenstoff, der durch Vulkane freigesetzt wird, gefunden – das sind die

Prozesse, die zur Stabilisierung von Klima und Umwelt beitragen. Dieses Gleichgewicht wurde immer wieder gestört – unter anderem durch Ausbrüche der großen Vulkanprovinzen des Sibirischen und des Dekkanischen Trapps, aber auch durch Asteroideneinschläge wie vor 66 Millionen Jahren, bei denen große Mengen kohlenstoffhaltigen Gesteins verdampften. In den meisten Fällen war das Ergebnis dieser Störungen mit Massenaussterben verbunden (Lee et al., 2019).

Nun hat auch der Mensch dieses Gleichgewicht durch die Freisetzung von (fossilem) CO₂ maßgeblich beeinflusst und gestört. In den letzten 100 Jahren wurde durch anthropogene Aktivitäten 40- bis 100-mal mehr Kohlenstoff freigesetzt als durch natürliche Prozesse (IPCC, 2021; Lee et al., 2019).

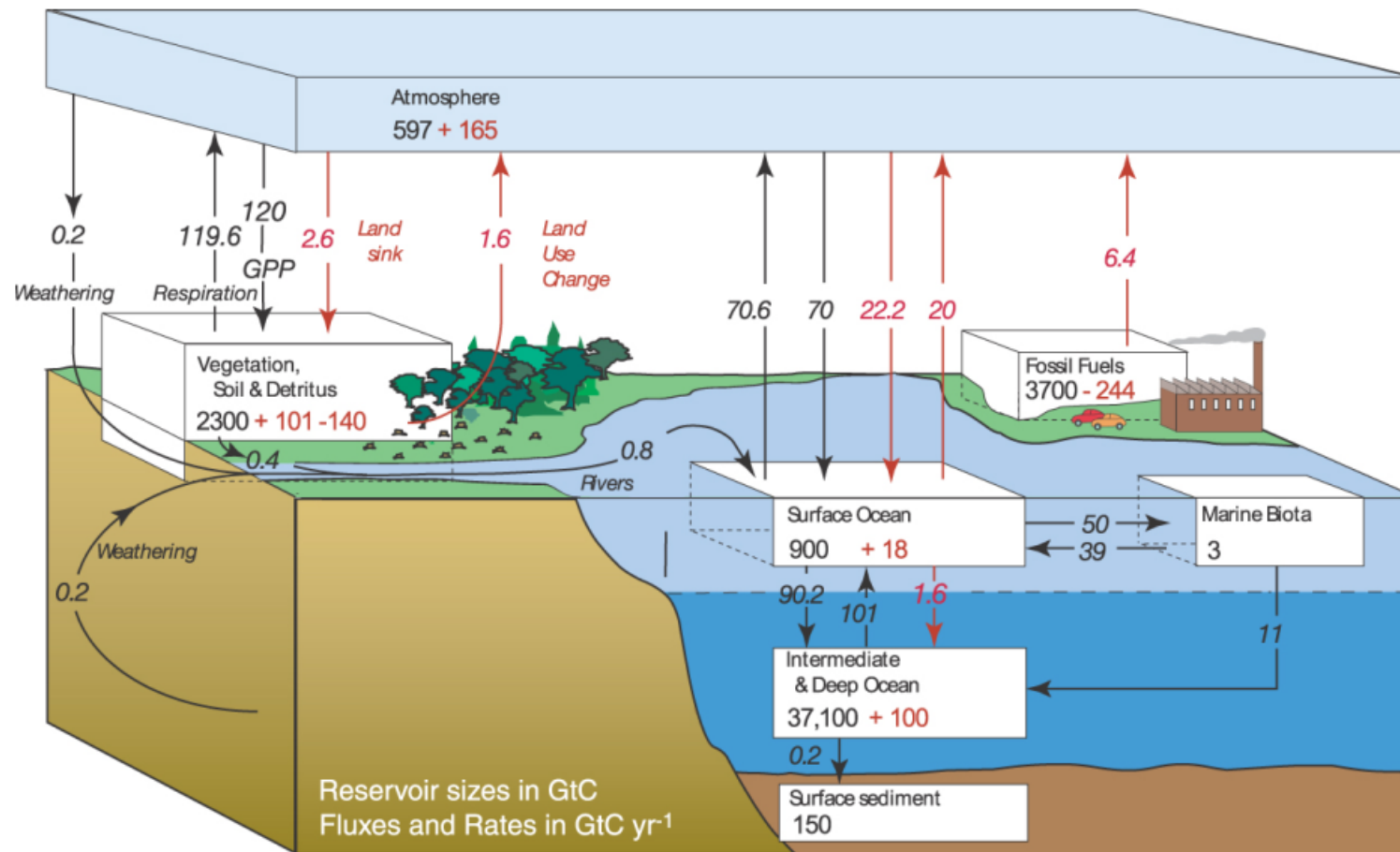


Abbildung 5: Der globale Kohlenstoffkreislauf im Überblick

Gültig für die 1990er Jahre; Zahlen in den Rechtecken geben das Speichervolumen in Gt Kohlenstoff (nicht in CO₂!) an. Zahlen in den Pfeilen geben den jährlichen Fluss ebenfalls in Gt Kohlenstoff an. Zahlen und Pfeile in Schwarz bezeichnen vorindustrielle/„natürliche“ Flüsse oder Speicher. Rote Zahlen und Pfeile bezeichnen menschlich verursachte Flüsse und Speicheränderungen.

Quelle: S. 515; IPCC (2007)

2.5 Einflussnahme des Menschen auf den Kohlenstoffkreislauf der Erde und die Folgen fürs Erdklima

Auch der Kohlenstoff in den fossilen Brennstoffen wurde ursprünglich aus der Atmosphäre durch die Photosynthese von Pflanzen in Biomasse gebunden. Durch geochemische Prozesse kam es vor Millionen von Jahren jedoch nicht zu einem vollständigen Abbau der Biomasse, sondern der Kohlenstoff blieb in organischen Verbindungen, oft unter Sauerstoffabschluss, in geologischen Lagerstätten als Erdöl, Erdgas oder Kohle erhalten. Durch die Verbrennung dieser fossilen Energieträger setzen wir den über Jahrmillionen gebundenen Kohlenstoff sehr rasch wieder frei, was zu einem Anstieg des Kohlendioxids in der Atmosphäre und damit zum Treibhausgaseffekt und zur Klimaerwärmung führt.

Neben der Verbrennung fossiler Energieträger (6,4 Gt Kohlenstoff jährlich in den 1990er Jahren) ist die Ursache für die Freisetzung von Kohlenstoff eine geänderte Landnutzung wie beispielsweise die intensive Brandrodung in den tropischen Regenwäldern (1,6 Gt Kohlenstoff pro Jahr). Vom Anfang des 19. Jahrhunderts bis zum Ende des 20. Jahrhunderts hat der Mensch rund 400 Gt Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid freigesetzt. Damit befindet sich der heutige Kohlenstoffkreislauf in einem markanten Ungleichgewicht. Diese zusätzlichen Mengen an Kohlenstoff führen zu Verschiebungen zwischen den Kohlenstoffreservoirs, was sich darin äußert, dass sich die Austauschflüsse zwischen Reservoirs im Vergleich zu jenen der vorindustriellen Zeit verändert haben. Neben der Atmosphäre nehmen auch die Ozeane und vermutlich auch die Landpflanzen permanent einen Teil dieses anthropogenen, also durch menschliche Aktivitäten freigesetzten CO₂ auf. (Schröder, 2010)

2.6 Die Rolle von Pflanzenbiomasse in der Bindung von CO₂

Derzeit macht Kohlendioxid ca. 0,04 % (= 400 ppm) der Luft in der Atmosphäre aus. Aus ihr nehmen Pflanzen laufend Kohlendioxid auf. Durch diesen Prozess der Photosynthese in den grünen Zellen der

Blätter werden mit Hilfe der Sonnenenergie organische Kohlenstoffverbindungen, wie z. B. Zucker oder Zellulose, aus dem Kohlendioxid der Luft synthetisiert. Ein Teil dieser Energie wird durch den Energiebedarf der Pflanzen selbst wieder veratmet und an die Atmosphäre freigegeben, ein großer Teil wird aber in Biomasse gebunden. Die pflanzliche Biomasse wird zu einem kleinen Teil von Pflanzenfressern konsumiert. Der größte Teil stirbt ab. Im Zersetzungsprozess wird die Energie der Kohlenstoffverbindungen von Insekten, Bakterien und Pilzen genutzt, dabei Schritt für Schritt auch veratmet und wieder als Kohlendioxid in die Atmosphäre freigesetzt. Doch ein kleiner Teil des organischen Kohlenstoffs verbleibt als solcher langfristig im Boden und bildet dort eine Kohlenstoffsänke. Über diesen Anreicherungsprozess weiß man noch wenig. In Naturwäldern der gemäßigten Zone wird angenommen, dass etwa 5 % des von den Pflanzen gebundenen Kohlenstoffs in sogenannten „Dauerhumus“ übergeht (Ellenberg et al. 1986 in Walter und Breckle (1999), S. 366).

Damit leisten auch ungenutzte Urwälder, selbst wenn ihr Vorrat an lebender Biomasse nicht mehr zunimmt, einen Beitrag als Kohlenstoffsänke. Nur durch diesen Dauerhumuseffekt konnte sich der Kohlenstoff in den Böden nach der Eiszeit anreichern und nur dadurch finden wir in den heutigen Waldböden etwas mehr Kohlenstoff gespeichert als in der lebenden Waldbiomasse (R. Jandl et al., 2015)

Doch während die Akkumulation von Kohlenstoff im Dauerhumus ein langfristiger Prozess ist, können die österreichischen Wälder auch kurzfristig einen enormen Beitrag zur Reduktion der Netto-Treibhausgasemissionen in Österreich leisten.

2.7 Die Kohlenstoffbilanz Österreichs

Mit Stand 2019 betrug die Gesamtkohlenstoffemission Österreichs rund 79,8 Mio. t CO₂ (Umweltbundesamt, 2021). Dies entspricht rund 21,7 Mio. t Kohlenstoff. Derzeit ist in der Bilanz noch keine substanzielle Reduktion des Trends erkennbar.

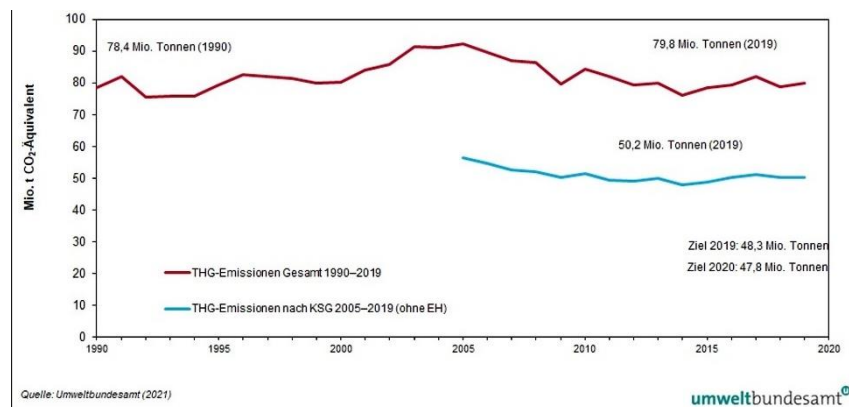


Abbildung 6: Österreichische Treibhausgasemissionen 1990-2019 und Zielpfad
Quelle: Umweltbundesamt (2020)

Ausgehend von den österreichischen Gesamtemissionen ist für eine Kohlenstoffneutralität und die Erreichung der Pariser Klimaziele eine Einsparung bzw. Substitution dieser Menge erforderlich.

Tabelle 1: Jährliche THG Emissionen in Österreich nach Sektoren
Quelle: Umweltbundesamt (2021)

Sektor	Emissionen in Mio t. CO ₂ equ	In %
Energie & Industrie	35.0	44.5
Verkehr	24.0	30.5
Gebäude	8.1	10.3
Landwirtschaft	7.1	9.0
Abfallwirtschaft	2.3	2.9
Fluorierte Gase	2.2	2.8

Der Klimaschutzbericht des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt, 2021) zeigt klar den Sektor Energie und Industrie mit jährlichen Emissionen von rund 35 Mio t CO₂equ und den Sektor Verkehr mit rund 24 Mio t CO₂equ als Hauptverursacher

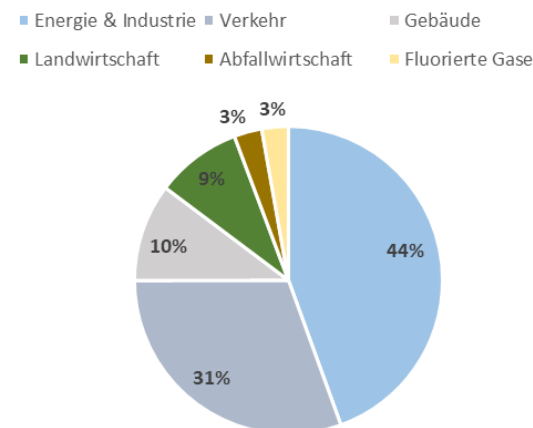


Abbildung 7: Verteilung der österreichischen THG Emissionen nach Sektoren
Quelle: Umweltbundesamt (2021)

Im Klimaschutzbericht 2021 wird zudem auf die Bedeutung des Waldes als Senke hingewiesen. Der Landnutzungssektor (LULUCF) war von 1990 – 2019 mit jährlich zwischen 4,0 Mio. t und 19,7 Mio. t CO₂-Äquivalente durchgehend eine Kohlenstoffsенке. Diese hat gemäß dem Umweltbundesamt jedoch seit 200 abgenommen, was auf verstärkte Holznutzung im Wald und Kalamitätsereignisse zurückgeführt wird.

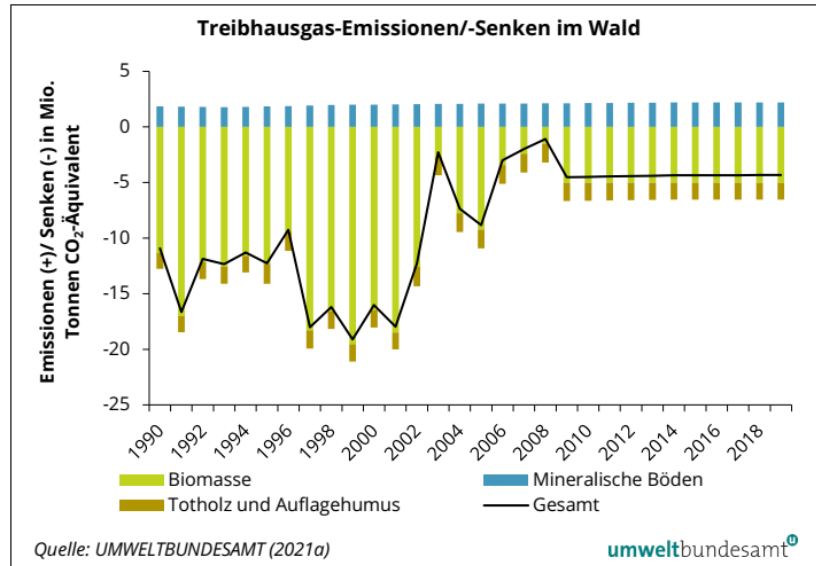


Abbildung 8: Jährliche Treibhausgas-Emissionen/-Senken im Wald je Kohlenstoffpool

Quelle: Umweltbundesamt (2021)

3 ZUSAMMENHANG ZWISCHEN KOHLENSTOFFSPEICHERUNG IN WÄLDERN UND BIODIVERSITÄT

3.1 Kernbotschaften

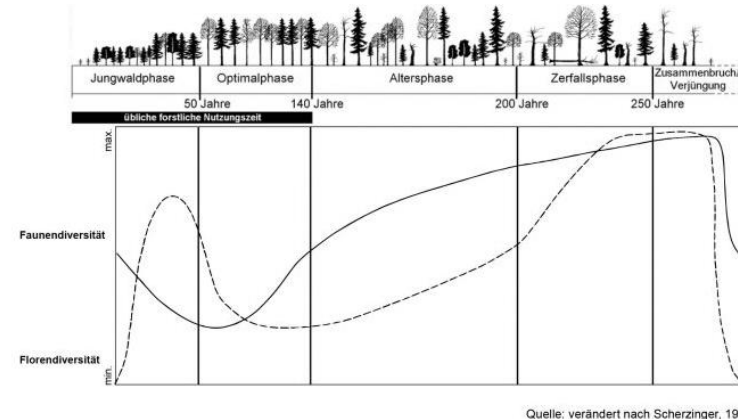
- Geschätzt wird, dass sich mehr als zwei Drittel der biologischen Vielfalt der Erde in Wäldern konzentriert.
- Im europäischen Urwald dauert ein vollständiger Zyklus der Waldentwicklung 300–600 Jahre, in Wirtschaftswäldern wird die Entwicklung bereits nach 80–140 Jahren durch den Ernteeingriff abrupt unterbrochen. Gerade in den Spätphasen, die der Wirtschaftswald nicht erlebt, steigt jedoch die Biodiversität.
- Bis zu 30 % der Waldarten (Pflanzen, Tiere, Pilze und Bakterien) sind auf Alt- und Totholz angewiesen.
- In alten Wäldern werden beträchtliche Mengen an Kohlenstoff (bis zu 5 % der in Pflanzenbiomasse) im Boden eingelagert. Für die Bodenbildung nimmt Totholz im Wald eine Schlüsselrolle ein.
- Die Entnahme von lebendem und auch totem Holz wirkt sich auf die Biodiversität und den Nährstoffhaushalt der Wälder aus.

3.2 Waldbiodiversität

Mit dem Kyoto-Protokoll ist eine neue Waldfunktion ins Blickfeld gerückt: der Wald als Kohlenstoffspeicher. Diese neue Waldfunktion birgt jedoch Konfliktpotenzial. Geschätzt wird, dass sich mehr als zwei Drittel der biologischen Vielfalt der Erde in Wäldern konzentriert. In Europa schätzt man, dass rund die Hälfte aller Arten in Wäldern vorkommt (Förster et al., 2020). Diese Biodiversität mit ihren zugrundeliegenden ökologischen Prozessen ist für die Ökosystemleistungen des Waldes und damit für den Menschen von zentraler Bedeutung.

Die biologische Vielfalt der Wälder, d. h. die Vielfalt der Pflanzen und Tiere in den Wäldern, hat sich über Millionen von Jahren entwickelt, lange bevor der Mensch Einfluss nahm. Natürliche, alte Wälder unterliegen meist einer Intensivierung der Bewirtschaftung; ihre

einzigartige Artenvielfalt und Strukturmerkmale gehen unwiederbringlich verloren (Förster et al., 2020). Die Artenvielfalt in heimischen Wäldern ist eng mit den natürlichen Waldentwicklungsphasen verknüpft (siehe Abbildung 9).



Quelle: verändert nach Scherzinger, 1996

Abbildung 9: Waldentwicklungsstadien und Biodiversität
verändert nach Scherzinger (1996)

Während im Urwald ein kompletter Zyklus der Waldentwicklung bis zu 600 Jahre und länger dauern kann, wird in den Wirtschaftswäldern die Entwicklung bereits nach 80–140 Jahren durch Ernteeingriffe abrupt unterbrochen. Da in Österreich 88 % des jährlichen Holzzuwachses durch forstliche Eingriffe entnommen werden (Gschwantner, 2019), wird dem Ökosystem damit ein erheblicher Anteil von Biomasse und Energie entzogen. Während in Naturwäldern eine typische Abfolge von sogenannten Entwicklungsphasen in einem für gemäßigte Wälder typischerweise kleinräumigen Mosaik erfolgt, entstehen durch die schlagweise forstliche Nutzung gleichaltrige Bestände mit einem recht homogenen und eingeschränkten Set an Strukturen und Kleinlebensräumen.

Das „frühe“ Abholzen der Wälder ist kritisch zu sehen, weil viele Pflanzen- und Tierarten auf die späten Entwicklungsphasen eines Waldes angewiesen sind. Eine Umtriebszeitverkürzung, also die Verkürzung des Zeitraums zwischen den Nutzungseingriffen, lässt deutlich negative Auswirkungen auf die Biodiversität erwarten. Späte

Entwicklungsphasen sind in unseren Wirtschaftswäldern derzeit kaum anzutreffen, obwohl sie in den Urwäldern mehr als 60 % der Waldfläche einnehmen und auch zeitlich dominieren. Zudem verschwimmen die räumlichen Grenzen der verschiedenen Phasen in einem Urwald der gemäßigten Zone, zu der Österreich zählt, und so lassen sich dort Strukturen und Elemente unterschiedlicher Entwicklungsphasen auf nur einem Hektar Waldfläche gemeinsam finden.

Wenn mehr oder weniger einschichtige, hallenartige Wälder in der sogenannten „Optimalphase“ aus der Nutzung genommen werden, ändert sich häufig in den nächsten Jahrzehnten in Bestandesstruktur und Habitatangebot sehr wenig. Die Wälder werden älter, geschlossener und dunkler sowie womöglich ärmer an Mikrohabitaten. Erst wenn durch Naturereignisse wie Stürme oder Hagelunwetter und/oder Alterung Lücken in den Bestand gerissen werden und vermehrt Mikrohabitate sowie liegendes und stehendes Totholz entstehen, setzt allmählich die Naturwalddynamik ein.

Buchenurwälder und sehr naturnahe, seit über 100 Jahren unbewirtschaftete Buchenwälder weisen etwa deutlich höhere Strukturvielfalt und Biodiversität auf wie Buchenwirtschaftswälder. Es bedarf jedoch vieler Jahrzehnte Wirtschaftsruhe, bis die walddtypische Biodiversität zur vollen Entfaltung kommen kann.

3.3 Die Rolle von Totholz im Kohlenstoffkreislauf

Die Zusammensetzung von Naturwäldern, ihre Totholzstrukturen und die ökologischen Prozesse, die in diesen Phasen ablaufen, sind die Lebensgrundlage für zahlreiche Pflanzen-, Bakterien-, Pilz- und Tierarten. Doch 92 % der Bäume im österreichischen Wald erreichen nie ihre natürliche Altersgrenze und können nichts zu einem natürlichen Totholzangebot beitragen. Bäume sterben von Natur aus meist nicht schlagartig. Einzelne Äste sterben ab und hinterlassen Astlöcher und sogenannte Mulmhöhlen. Pilze befallen die Bäume. Ihre Fruchtkörper bilden einerseits Nahrung für andere Tierarten und andererseits auch selbst Mikrohabitate aus, die als Brut- und Nistplatz genutzt werden können (siehe Abbildung 10).

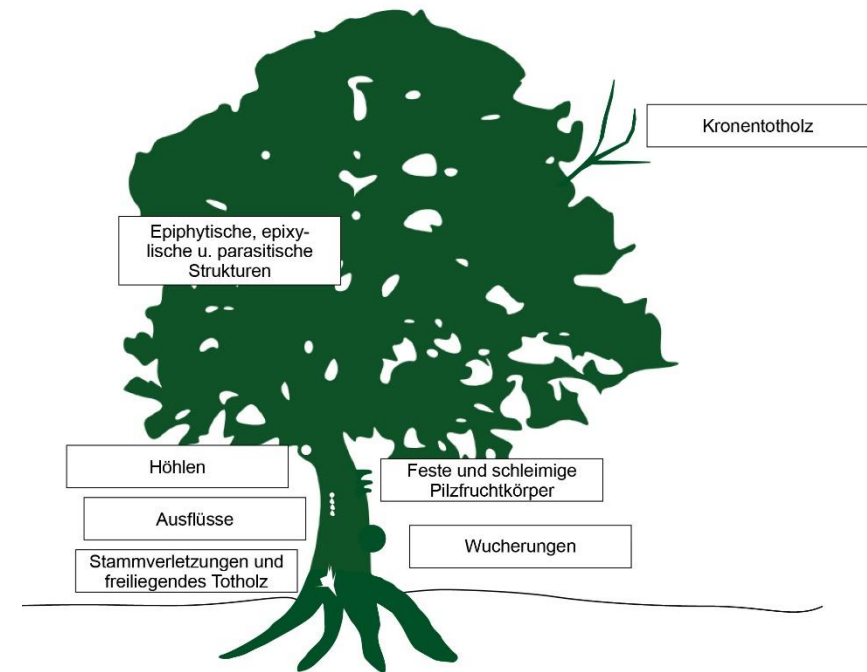


Abbildung 10: Sogenannte Mikrohabitate an einem alten Baum
Eigene Darstellung verändert nach Leicht 1996 in Walter und Breckle (1999)

Totholz ist eine Schlüsselstruktur und ein Indikator für große Teile der Artenvielfalt im Wald (Bütler et al., 2020). Etwa 30 % der im Wald lebenden Arten (Pflanzen, Tiere, Pilze und Bakterien) sind auf altes und totes Holz angewiesen. Etwa 1.500 Pilzarten und 1.340 Käferarten sind auf Totholz angewiesen. Davon sind 10 % eigentliche Urwaldreliktarten, d.h. Arten, die auf urwaldtypische Strukturen angewiesen sind (Scherzinger, 1996).

In Naturwäldern findet man äußerst komplexe und vielschichtige Nahrungsketten. An ihrer Basis stehen die Primärproduzenten (die Pflanzen), die mit Hilfe von Sonnenlicht in der Lage sind, CO₂ aus der Atmosphäre zu entnehmen und daraus Wasser und organische Kohlenstoffverbindungen wie Zucker oder Zellulose aufzubauen. Ein Teil der so erzeugten pflanzlichen Biomasse – in erster Linie ein Teil der

Blätter sowie jüngere Zweigachsen – werden von Konsumenten erster Ordnung, also Pflanzenfressern, konsumiert. Dieser Anteil macht aber in mitteleuropäischen Waldökosystemen nur einen geringen Teil aus (oft weniger als 1 %, vgl. (Walter and Breckle, 1999).

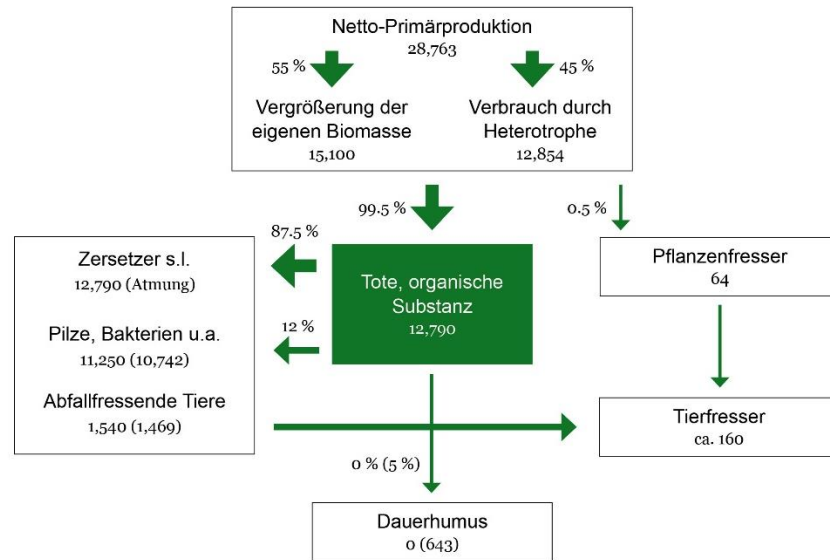


Abbildung 11: Energieflüsse in einem Buchenwald
Energieflüsse in kJ pro m³; Zahlen in Klammer unter der Annahme, dass 5 % in der organischen Substanz in Dauerhumus übergeht.
Eigene Darstellung nach Ellenberg et al. 1986 in Walter und Breckle (1999).

In natürlichen Waldökosystemen bilden abfallende Blätter, Nadeln und Äste die Streuschicht. Der Großteil dieser Biomasse wird durch Zersetzer und Destruenten abgebaut. Dabei wird auch eine große Menge an im Holz gespeicherten organischen Kohlenstoffverbindungen wieder abgebaut. Insekten und Würmer zerkleinern Streu, verarbeiten es in mehreren Schritten zu Humus und arbeiten es in die tieferen Bodenschichten ein. Pilze sind in der Lage, die langen Kohlenstoffketten der Zellulose im Holz aufzubrechen und die Energie darin zu nutzen. Gleichzeitig sind sie Nahrungsbasis für andere Tiere. Räuberische Insekten wie manche Laufkäfer oder auch Tausendfüßler, aber auch Vögel und Fleder- und Spitzmäuse leben von den Pflanzenfressern oder

eben auch den Raubinsekten. Die Nahrungsketten und ihre Verflechtungen sind so komplex, dass sie noch für kein Ökosystem vollständig abgebildet werden konnten.

Das Alter und der Vorratsreichtum von Waldbeständen und damit das Angebot an alten Habitatbäumen oder Totholz spielt für die Biodiversität eine bedeutende Rolle. Daher ist die Förderung von Totholz ein wichtiges Element des klassischen Naturschutzes im Wald.

Doch nicht nur das Alter der Bestände und die Verfügbarkeit von Totholz sind entscheidend für die Artenvielfalt, sondern auch die Zusammensetzung der Baumarten. Unterschiedliche Baumarten bieten unterschiedlichen Tier- und Pilzarten Lebensraum. Der Streuanfall hat unterschiedliche jahreszeitliche Rhythmen, verursacht unterschiedliche Besonnungssituationen am Waldboden, und bietet unterschiedlichen Tier- und Pilzarten Nahrung. Fichtenbäume, die Sommer und Winter ihre Nadeln tragen, führen zu einer gleichmäßigen Beschattung des Waldbodens, während bei Buchen- oder Eichenwäldern im Frühjahr und Herbst vor und nach dem Laubfall deutlich mehr Sonnenlicht auf den Boden fällt. In solchen Laubwäldern können besonders speziell angepasste Frühjahrsblüher wie z. B. der Bärlauch einen Lebensraum finden.

Alte Wälder binden kontinuierlich CO₂ und speichern den Kohlenstoff, bis der Baum zersetzt wird, das CO₂ veratmet oder der Kohlenstoff im Boden mineralisiert wird. Dabei werden beträchtliche Mengen an Kohlenstoff im Boden eingelagert. Für die Bodenbildung nimmt Totholz im Wald eine Schlüsselrolle ein: Zersetztes Holz liefert Nährstoffe und trägt damit maßgeblich zur Bodenfruchtbarkeit bei. Deshalb wirkt sich die Entnahme von lebendem und auch totem Holz negativ auf die Biodiversität und den Nährstoffhaushalt der Wälder aus. Mithilfe von Pilzen, Bakterien, Insekten und auch Vögeln oder Säugetieren erfolgt der Abbau von Holz bis zum Humus. Alt- und Totholz können daher als der „Boden von morgen“ bezeichnet werden.

Stimmen aus dem fachlichen Naturschutz

Die Datenlage und auch die rechtlichen Rahmenbedingungen für Naturschutz im Wald sind sehr limitiert. Die Akteur:innen aus der Forstwirtschaft agieren im Wald relativ frei und der Naturschutz hat hier wenig Handhabe. Das europäische Naturschutzrecht ist im Wald faktisch totes Recht. Dazu gibt es Rechtsstudien, wie jene des Umweltjuristen Volker Mauerhofer in der österreichischen juristischen Fachzeitschrift RdU Recht der Umwelt. Richtiger Naturschutz findet demnach im Wald sehr wenig statt. Im Wald gilt es derzeit vor allem vier große Herausforderungen zu meistern:

Totholz: Es würde mehr Naturwaldzellen im (Wirtschafts-) Wald brauchen, nicht einzelne Totholzbäume, sondern eine Matrix aus Wirtschaftswald und Naturwaldzellen mit jeweils vielleicht 20-30 Stämmen Altholz, um uns an die Artenvielfalt von Naturwäldern anzunähern.

Fichte: Im bewirtschafteten Kleinwald wird noch immer Fichte, neuerdings gebietsweise Douglasie, gepflanzt. Es wird zwar auch anderes mitaufgeforstet, aber das Laubholz oft sukzessive entfernt. Die Fichte bleibt, obwohl sie schon länger nicht mehr als klimafitte Baumart eingestuft wird. *(Anm. der Autor:innen: Sie kommt mit längeren Trockenperioden, wie es sie bedingt durch den Klimawandel immer häufiger gibt, weniger gut zurecht. Da sie ein Flachwurzler ist und der Boden nach Starkregenereignissen, die immer häufiger auf heiße Trockenperioden folgen, das Wasser nicht mehr aufnehmen kann und es zu Rutschungen kommt, werden Fichtenbestände, besonders in exponierten Lagen, immer häufiger entwurzelt. Und dann ist auch schon der Borkenkäfer zur Stelle).*

Wildproblematik: Durch massiv überhöhte Wildstände wird die Verjüngung des Waldes massiv beeinflusst oder verunmöglicht. Ohne die Lösung der Wildfrage kommen wir zu keiner Lösung der Waldfrage.

Forststraßenbau: Wir haben das dichteste Forststraßennetz Europas. Wenn der Forststraßenbau weiter so propagiert und massiv öffentlich gefördert wird, wandeln wir die Wälder de facto in Forste, in bewirtschaftete baumbestandene Flächen, um. Naturnahe Wälder gibt es nur noch in den nicht wirtschaftlich erreichbaren Bereichen wie etwa Schluchten oder in schwer erreichbaren Kammlagen.

Fallbeispiel für dringend notwendige Maßnahmen im Wald

Der WWF Österreich und die Esterhazy Betriebe GmbH haben in einer dreijährigen Forschungskooperation untersucht, wie ein zusammenhängendes System aus Prozessschutzflächen, Alt- und Totholzbäumen in Wirtschaftswäldern umgesetzt werden kann (Enzenhofer, 2021). Ziel ist die Artenvielfalt im Wald zu erhalten und fördern und gleichzeitig die Bewirtschaftung so wenig wie möglich zu stören.

Anhand dieses Modellprojekts entstand zu Projektende nach der konkreten Umsetzung im Projektgebiet ein Praxisleitfaden. Damit soll Waldbesitzer:innen ein Instrument zur Verbindung von Ökologie und Ökonomie im Wald in die Hand gegeben und damit zukünftige Projekte erleichtert werden.

3.4 Potenzielle Gesprächspartner:innen und Expert:innen

- Mag. Karin Enzenhofer, WWF Österreich
- Dr. Hanns Kirchmeir, E.C.O. Institut für Ökologie
- DI Christian Fraissl, Umweltdachverband UWD
- DI Klemens Schadauer, Dr. Katharina Lapin, Bundesforschungszentrum für Wald

4 WÄLDER ALS KOHLENSTOFFSENKEN UND KOHLENSTOFFQUELLEN

4.1 Kernbotschaften

- Im österreichischen Wald sind 800 – 985 Mio. t Kohlenstoff (entspricht knapp 2.900 – 3.600 Mio. t CO₂-Äquivalenten) gespeichert.
- Das Gleichgewicht zwischen Quellen und Senken ist seit der Industrialisierung gestört.
- Grüne Blätter können CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen und in Biomasse binden – Wälder sind die einzigen Ökosysteme, wo ein großer Teil des gebundenen Kohlenstoffs viele Jahrzehnte im Holz gebunden bleibt.
- Wenn das Biomassevolumen im Wald konstant bleibt, wird gleich viel Kohlenstoff aufgenommen wie veratmet. Wenn das Volumen (Blätter, Stamm, Wurzeln, Streu, Humus, Boden) zunimmt, wird mehr Kohlenstoff gebunden als veratmet und es entsteht eine positive Senkenwirkung.
- Im Allgemeinen kann Laubholz, mit Ausnahme von Weichholz wie Pappel oder Weide, mehr C aufnehmen als Nadelholz.
- Nach der Ernte dauert es in Europa mindestens 10 bis 20 Jahre, bis die CO₂-Absorptionsrate eines jungen Bestandes größer ist als die CO₂-Freisetzungsrate durch Bodenatmung aus Kahlschlagfläche.

4.2 Kohlenstoffkreislauf im Wald

Die Pools der natürlichen Kohlenstoffreservoirs (Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre, Pedosphäre, Lithosphäre) stehen in ständigem Austausch miteinander (Freeman et al., 2001). Wenn mehr Kohlenstoff aufgenommen als abgegeben wird, stellen die Reservoirs eine Senke dar. Ist dagegen die Freisetzung größer als die Aufnahme, spricht man von einer C-Quelle. Der anthropogene Einfluss (Industrialisierung,

Landflächenerweiterung) hat das natürliche Gleichgewicht zwischen Quellen und Senken gestört. Seit etwa 200 Jahren wird mehr Kohlenstoff in Form von CO₂ (Kohlendioxid) in die Atmosphäre emittiert, als von den Ökosystemen aufgenommen werden kann (IPCC, 2021). Dies führt zu einem Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre und damit zu einer Verstärkung des anthropogenen Treibhauseffekts (Khandekar et al., 2005), da Kohlendioxid nach Wasserdampf das wichtigste Treibhausgas ist.

Die Pflanzen nehmen kontinuierlich Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf. Durch diesen Prozess der Photosynthese in den grünen Zellen der Blätter werden aus dem Kohlendioxid der Luft mit Hilfe der Sonnenenergie organische Kohlenstoffverbindungen wie Zucker oder Zellulose synthetisiert. Ein Teil dieser Energie wird durch den Energiebedarf der Pflanzen selbst wieder verbraucht und an die Atmosphäre abgegeben, ein großer Teil wird jedoch in Biomasse gebunden. Ein kleiner Teil der pflanzlichen Biomasse wird von Pflanzenfressern verzehrt, aber der größte Teil stirbt ab, und im Zersetzungsprozess wird die Energie der Kohlenstoffverbindungen von Insekten, Bakterien und Pilzen genutzt, ebenfalls schrittweise veratmet und als Kohlendioxid wieder in die Atmosphäre abgegeben.

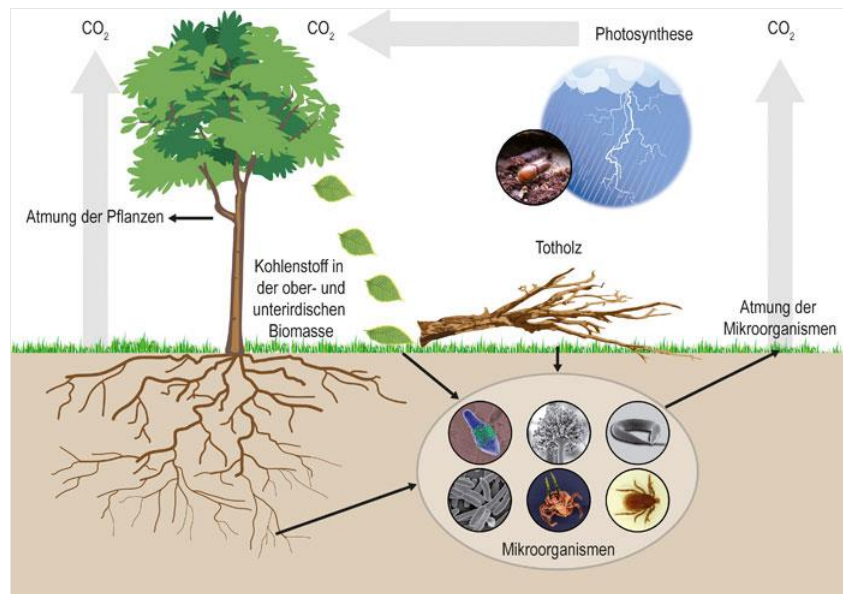


Abbildung 12: Der Kohlenstoffkreislauf im Wald:

Wälder bauen innerhalb einer Baumgeneration einen enormen Kohlenstoffspeicher in der Biomasse auf.

Quelle: BFW, (2013)

4.3 Kohlenstoffakkumulation im Wald

Wälder binden Kohlendioxid, das ist unstrittig. Aber die Frage ist: wie schnell und viel? Denn nicht alle Wälder sind gleich. Das CO₂ wird im Baum (Stamm, Äste, Wurzeln) und im Humus gespeichert. Die Menge des pro Baum gespeicherten CO₂ hängt von der Holzmasse und -dichte ab. Für die Aufnahme pro Zeiteinheit, z.B. pro Jahr, spielt auch das Alter der Bäume eine Rolle, denn sehr junge Wälder speichern weniger CO₂ als alte Wälder mit sehr großen Holzvorräten. Die jährliche Zuwachsrates bei Bäumen mittleren Alters ist besonders hoch. Auch der geografische Standort spielt eine Rolle. Tropische Wälder wachsen viel schneller als Wälder in Österreich. Dementsprechend wird von tropischen Bäumen im gleichen Zeitraum mehr CO₂ aufgenommen und gespeichert. Durch das feucht-warme Klima wird das Holz in tropischen

Wäldern aber unmittelbar zersetzt und der Kohlenstoff nicht im Humus gespeichert.

Die Urwälder der Erde (ca. 15 % der Landfläche) könnten rund 10 % der globalen Emissionen in zusätzlicher Biomasse speichern (Luyssaert et al., 2008). Obwohl Störungen diese Speicherung unterbrechen, bleiben diese Ökosysteme im Wesentlichen eine Senke. In Altersklassenwäldern ist der jährliche Holzzuwachs in jungen Jahren sehr niedrig und erreicht dann (zumindest bei Fichte) mit 50–90 Jahren ein Zuwachsmaximum. Im Alter nimmt die jährliche Zuwachsrates langsam wieder ab, jedoch ist der Vorrat in absoluten Zahlen sehr hoch.

Auch wenn durch Zersetzungsprozesse von Totholz Kohlenstoff kontinuierlich wieder freigesetzt wird, bleibt auch im Totholz Kohlenstoff noch jahrzehntelang gespeichert. Die genaue Dauer hängt dabei stark von den klimatischen Bedingungen ab. Während in tropischen Regenwäldern Totholz quasi unmittelbar zersetzt wird, bleiben in Wüsten oder Tundragebietern Totholzvorräte oft Jahrhunderte lang bestehen.

Wenn die Menge an lebender und toter Biomasse in einem Ökosystem auf einem konstanten Niveau bleibt, wird gleich viel Kohlenstoff aufgenommen wie veratmet. Wenn die Speicherkapazitäten (Blätter, Stamm, Wurzeln, Streu, Humus, Boden) aber zunehmen, wird mehr Kohlenstoff aufgenommen, als durch Atmung und Zersetzung freigesetzt wird. Die Formel dazu lautet in einem System, das sich im Gleichgewicht befindet:

$$\text{aufgenommener C} = \text{veratmeter C} + \text{gebundener C}$$

Ein Vergleich der Speicherkapazitäten verschiedener Waldökosysteme basierend auf Bewaldungsprozent und Bodenkohlenstoff zeigt, dass neben borealen und tropischen Wäldern temperate Wälder, wie sie bei uns vorkommen, das höchste Speicherpotenzial besitzen (Taylor and Marconi, 2019). Damit sollte auch aufgezeigt werden, dass Speicherannahmen von Standort und Waldtyp abhängen und nicht pauschal hochgerechnet werden können, wie von anderen Studien postuliert (Bastin et al., 2019).

In der Diskussion ist vor allem der gesamte im Ökosystem gespeicherte Kohlenstoff (TEC: Total Ecosystem Carbon) von Bedeutung, der neben der Biomasse auch Totholz, Krautschicht und Boden inkludiert. Die Größe der jeweiligen Kohlenstoffpools hängt vom Entwicklungsstadium

des Waldes ab (Jacob et al., 2013). Generell wächst der Pool mit dem Alter des Waldes bis zu seinem Höhepunkt am Zuwachsmaximum des Waldes.

Global wird vermutet, dass in Waldökosystemen rund 60 % des globalen terrestrischen Kohlenstoffpools gebunden sind (Federici et al., 2017). Das IPCC schätzt den gesamten Kohlenstoffpool des Waldes auf 1.645 Gt CO₂. Wird dabei noch der Kohlenstoffgehalt im Boden, Totholz und toten organischen Material mitgerechnet, könnten sogar bis zu 4.033 Gt CO₂ gespeichert sein (Federici et al., 2017; Pan et al., 2011). Dies wäre größer als die gesamten fossilen Energieträgerreserven, die auf 2.700 Gt CO₂e geschätzt werden (Heede and Oreskes, 2016). Pan et al. (2011) nehmen an, dass in der Periode von 1990–2007 Wiederbewaldung und Vorratzzuwachs global bis zu 60 % der gesamten fossilen Emissionen ausgeglichen haben. Dies hat sich in den letzten Jahren etwa durch Stickstoff- und Kohlenstoffdüngung aus der Luft und durch Klimawandel bedingte verlängerte Vegetationsperioden noch verstärkt (Keenan et al. 2016). Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen allerdings, dass dieser Effekt eventuell nur temporär ist und vor allem den Biomasseverlust aus vergangenen Nutzungen kompensiert (Erb, 2004; Loudermilk et al., 2013). Einige Studien vermuten, dass dieses schnellere Wachstum mit einer höheren Sterblichkeitsrate einhergeht (Brienen et al., 2020). Demnach wurde eine im Schnitt um 23 Jahre verkürzte Lebensdauer der Bäume festgestellt, und das über alle Klimazonen und Vegetationstypen hinweg, Sterben einzelne Bäume früher, könnten die modellierten Speicherraten pro Hektar und Jahr dadurch niedriger ausfallen als angenommen. Der Gesamtkohlenstoffpool (TEC), also der gesamte im Wald gespeicherte Kohlenstoff, könnte laut Studie aber durch dynamische Naturverjüngung und Auffüllen des Totholzpools trotzdem weiterwachsen. Die Sterblichkeitsrate ist somit eine wesentliche Einflussgröße – wenngleich eine große Unbekannte in Modellierungen zum möglichen Gesamtvorrat.

Verschiedene Vegetationsmodelle nehmen an, dass der Wald grundsätzlich eine dauerhafte Kohlenstoffsene ist, also dass kontinuierlich mehr Kohlenstoff gespeichert als freigesetzt wird (Keenan and Williams, 2018; Sitch et al., 2008). Diese Dynamik wirkt bis sich entweder (nach langer Zeit) ein Gleichgewicht einstellt oder diese durch Ernte (menschlichen Einfluss) oder durch Naturkatastrophen

(insbesondere Feuer) abrupt unterbrochen oder verändert wird (Valentini et al., 2000).

Global gesehen sind boreale und temperate Wälder die größten Kohlenstoffsenken, wobei Holzbiomasse und Waldboden die größten Senken darstellen. Dabei weisen die mitteleuropäischen Wälder mitunter das größte Senkenpotenzial auf (>400 t/ha C Total Ecosystem Carbon (TEC), (Jacob et al., 2013; Seedre et al., 2014)), während alte boreale Wälder (175 t/ha TEC) bzw. hemiboreale Wälder (240 t/ha TEC) deutlich weniger Gesamtkohlenstoff speichern (Jacob et al., 2013).

In Wäldern (der temperaten und borealen Zone) werden über Zuwachs, Waldboden und Biomassezuwachs bis zu 6,6 t Kohlenstoff/ha und Jahr gespeichert (Valentini et al., 2000). Dies erscheint relativ hoch, da für Österreich wesentlich niedrigere Raten angenommen werden. So zeigt eine Auswertung des jährlichen Zuwachses der österreichischen Waldinventur, dass in Österreich jährlich etwa 6,3 t/CO₂ pro Hektar (d.h. 1,7 t Kohlenstoff) (nur) über den Zuwachs sequestriert werden (Kirchmeir et al., 2020).

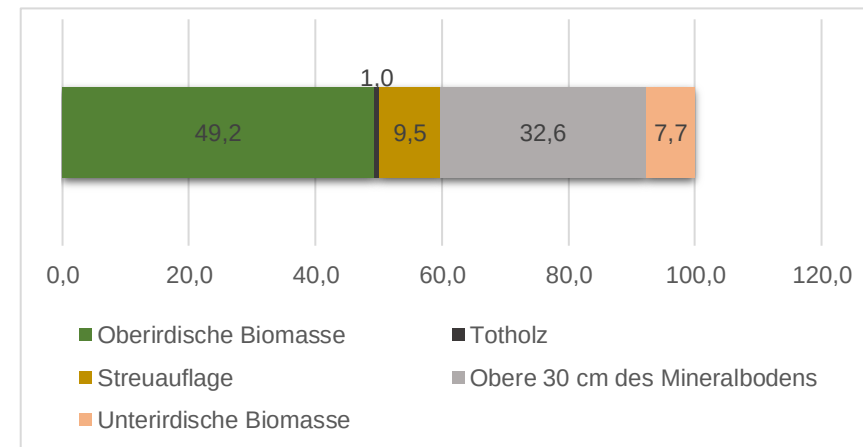


Abbildung 13: Prozentuelle Verteilung der Kohlenstoffvorräte im Wald nach Kompartimenten am Beispiel Deutschland

Quelle: verändert nach Grüneberg und Stümer (2014)

Im österreichischen Wald (Biomasse und Waldboden) sind in etwa 800 Mio. t (Weiss et al., 2000) bis 985 Mio. t Kohlenstoff (BFW, 2013)

gespeichert. Das entspricht rund 2,9 – 3,6 Mrd. t CO₂ und damit der 37- bis 45-fachen Menge, die jährlich an Treibhausgasen in Österreich ausgestoßen wird (vgl. Kapitel 2.7). Und mit dem Zuwachs an Holz nimmt auch dieser Kohlenstoffvorrat zu.

Laut Österreichischer Waldinventur haben die österreichischen Wälder einen Holzvorrat von ca. 351 Vorratsfestmeter (Gschwantner, 2019). Ein Vorratsfestmeter entspricht einem Kubikmeter des oberirdischen Stammvolumens. Wie die Daten der Kohlenstoffinventur zeigen, ist das Kohlenstoffspeicherpotenzial dieser Wirtschaftswälder noch lange nicht ausgeschöpft. Naturwälder können 500–700 Vorratsfestmeter an lebender und toter Holzbiomasse aufweisen (Kirchmeir et al. (2020) bzw. Tabelle 2 auf Seite 44).

Zudem erreicht der Jungwuchs bis zu einem Alter von 20 Jahren eine durchschnittliche Absorptionsrate von nur 33 bis 47 % der Altbestände mit einem Alter von 100 bis über 160 Jahren (Riedel et al., 2019). Das bedeutet, dass durch die frühe Nutzung auf die wertvolle Speicherkapazität älterer Bestände verzichtet wird – gerade jetzt, wo Zeit für das Dekarbonisierungsziel der EU gewonnen werden sollte.

Nach einer Kahlschlagnutzung dauert es in Europa mindestens 10 bis 20 Jahre, bis die CO₂-Absorptionsrate eines jungen Bestandes größer ist als die CO₂-Freisetzungsrate aus der Fläche (Knapp et al., 2021). Das liegt daran, dass die Abbauprozesse im Boden weiter fortschreiten und die Organismen im Boden laufend CO₂ freisetzen (Bodenatmung), während in den ersten Jahren nach der Nutzung keine oder nur geringe Mengen von Streu, Astabfall nachgeliefert werden. Da der Boden stärker besonnt wird und sich damit auch stärker erwärmt, nimmt die Bodenaktivität, verglichen mit einem geschlossenen Altholzbestand, deutlich zu.

Nicht genutzte Wälder, insbesondere Urwälder, mit ihrem Anteil an Totholz, akkumulieren dagegen über viel längere Zeiträume Biomasse und damit Kohlenstoff.

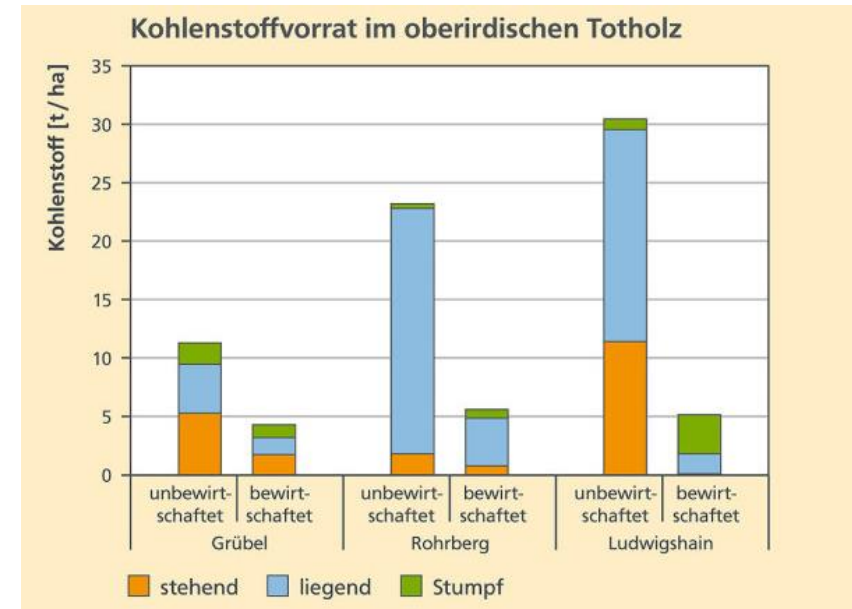


Abbildung 14: Kohlenstoffvorräte in unterschiedlichen oberirdischen Totholzkompartimenten

Quelle: Krüger et al. (2012)

4.3.1 Wie viel Kohlenstoff speichern verschiedene Baumarten?

Bäume speichern das Kohlendioxid aus der Atmosphäre nicht direkt im Holz. Im Zuge der Photosynthese in den Blättern wird das CO₂-Molekül in Sauerstoff und Kohlenstoff zerlegt und letzterer zuerst in Traubenzucker und in späterer Folge in Zellulose, Stärke und anderen Kohlenhydraten gespeichert.

Da es aber vor allem von Interesse ist, wie viel CO₂ durch das Wachstum der Bäume aus der Atmosphäre entfernt wird, werden die Abschätzungstabellen in CO₂-Einheiten dargestellt.

$$3,67 \text{ t CO}_2 = 1 \text{ t C}$$

Um von C auf CO₂ zu schließen, muss der C-Gehalt eines Baumes mit 3,67 multipliziert werden.

Beispiel: Eine 35 m hohe Fichte mit einem Alter von 100 Jahren hat einen Durchmesser von 50 cm (gemessen in einer Höhe von 1,3 m). Das Holzvolumen mit Ästen, aber ohne Wurzeln, beträgt $3,4 \text{ m}^3$. Die darin enthaltene Gesamtbiomasse hat ein Trockengewicht von knapp 1,4 t; die Hälfte des Holzkörpers besteht aus Kohlenstoff, also 0,7 t. Das bedeutet: Eine 35 m hohe Fichte hat in 100 Jahren rund 0,7 t Kohlenstoff gespeichert. Das entspricht einer Menge von $2,6 \text{ t CO}_2$ (Umrechnungsfaktor 3,67).

Eine Buche mit dem gleichen Holzvolumen, d.h. $3,4 \text{ m}^3$, hat ein Trockengewicht von 1,9 t. Auch hier besteht die Hälfte des Holzkörpers aus Kohlenstoff, d. h. etwa 0,95 t Kohlenstoff. Dies multipliziert mit 3,67 ergibt $3,5 \text{ t CO}_2$. Die Buche hat also in ihrem Leben $3,5 \text{ t CO}_2$ gespeichert. Eine Buche mit dem gleichen Holzvolumen wie eine Fichte hat fast eine t mehr CO_2 gespeichert. Der Grund dafür ist die höhere Holzdichte von Buchenholz. Dafür wächst das Holzvolumen der Buche etwas langsamer zu als bei der Fichte.

Im Allgemeinen hat Laubholz, mit Ausnahme von Weichholz wie Pappel oder Weide, eine höhere Holzdichte als Nadelholz.

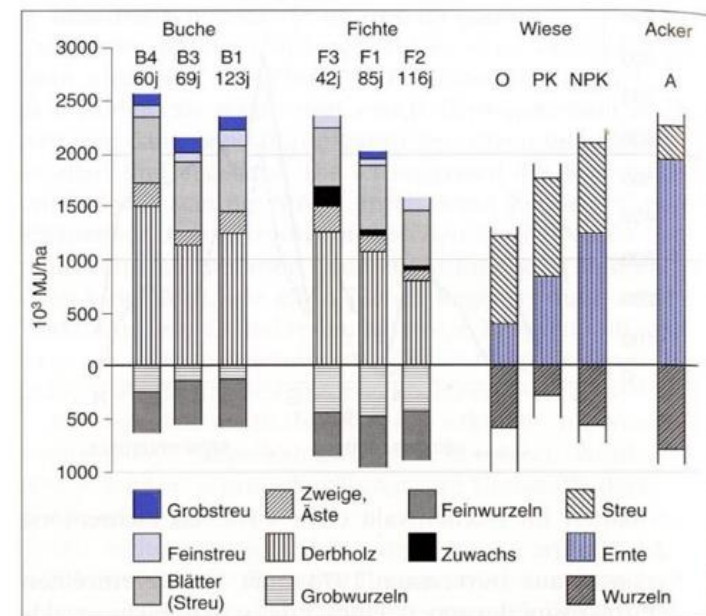


Abbildung 15: Jährliche Nettoprimärproduktion auf den im niedersächsischen Solling untersuchten Probenflächen

Buchenwald, Fichtenforst, Goldhaferwiese (NPK=vollgedüngt, PK=ohne Stickstoff; O=ohne Düngung), Weidegrasacker, angegeben in 1.000 MJ pro ha (offene Säulen: Schätzwerte) (Ellenberg et al., 1986)

In Abbildung 15 ist die jährliche Nettoprimärproduktion⁴ von Wald, Wiese und Acker dargestellt. Erstaunlicherweise sind die Produktivität und die jährliche CO_2 -Aufnahme der gedüngten Wiesen und des Ackers fast gleich groß wie die der Wälder. Davon sollte man sich aber nicht täuschen lassen, denn im Buchenwald wird CO_2 langfristig in der Biomasse und in der Streu gespeichert, während auf Wiese und Acker

⁴ Nettoprimärproduktion: Gesamtmenge des organischen Materials, das von Lebewesen mit der Kraft der Sonne hergestellt wird. Man kann die Nettoprimärproduktion in Biomasse, in gebundenem Kohlenstoff oder in Energie messen.

das CO₂ kurzlebig in unverholzten Teilen wie Blatt und Stammorgane investiert wird, bis es geerntet wird. Im Wald akkumuliert sich der Kohlenstoff jedoch über Jahrzehnte in der Biomasse und wird damit für viele Jahrzehnte dem Zyklus zwischen Photosynthese und Zersetzung entzogen.

Allerdings bleiben Störungsregimes der größte Unsicherheitsfaktor in allen Szenarien und Modellierungen. Großflächige Störungen (Borkenkäfer, Wind, Waldbrand, neue Krankheiten, durch Klimastress bedingte Zuwachsverminderungen) können die modellierte Speicherkapazität massiv verändern. Anderegg et al. (2020) sehen bereits eine kontinuierliche Vergrößerung dieser Risiken und nehmen aufgrund der kontinuierlichen Vergrößerung dieser Risiken und Unsicherheiten die mögliche terrestrische Speicherleistung global bis zum Jahr 2100 mit einer großen Schwankungsbreite, die von einer Senke mit 36,7 Gt CO₂equ/Jahr bis zu einer Quelle von 22 Gt CO₂equ/Jahr (Anm.: entspricht einer Senke von 134 Gt C/Jahr bis zu einer Quelle von 81 Gt/Jahr) reicht, an. (Anderegg et al., 2020).

Egal, ob bewirtschaftet oder nicht, die Aufarbeitung von Schadholz scheint ein wesentlicher Einflussfaktor zu sein (Höllerl and Bork, 2013). Höllerl und Bork (2013) berechneten für Fichtenreinbestände in der montanen Zone in Bayern, dass Kalamitäten durchgängig einen negativen Effekt auf die Kohlenstoffspeicherung haben werden: Für bewirtschafteten Wald mit intensiver Schadholzaufarbeitung wurde eine Gesamtspeicherung von 302,5 t C/ha (Standardabweichung 7,6) ermittelt, während für unbewirtschafteten Wald ohne Schadholzaufarbeitung 234,4 t C/ha (Standardabweichung 61,6) ermittelt wurden. Die hohe Standardabweichung bei den Szenarien für unbewirtschaftete Wälder zeigen, dass vor allem bewirtschaftete Wälder besser modellierbar sind als Wälder, die natürlichen Dynamiken unterliegen und damit mit größeren Unsicherheiten behaftet sind. Solange der aufstockende Bestand nach einer Kalamität nicht in gleichem Maße Streu produziert, wie der Boden veratmet, nimmt die Bodenkohlenstoffspeicherung ab. Je nach Szenario können über 120 Jahre bis zu 300 t C/ha sequestriert werden, wobei mit zunehmendem Alter durch Kalamitäten eine höhere Unsicherheit auftaucht.

Es wird als illusorisch angesehen, die Emission von fossilem CO₂ langfristig über die CO₂-Aufnahme von Waldökosystemen zu lösen

(Körner, 2020). Das Reservoir Wald kann nur einmal bis zu einem Gleichgewichtszustand befüllt werden. Körner sieht nur über den Vorratsaufbau und die Waldflächenvergrößerung Potenzial für die Erhöhung des Kohlenstoffspeichers im Wald. Der Waldflächenvergrößerung sind enge Grenzen gesetzt und diese kann mit anderen wichtigen Nutzungen in Konkurrenz treten, da alle produktiven Standorte der Welt weitgehend bereits genutzt sind (Haberl, 2017; Körner, 2020). Der Vorratsaufbau birgt einerseits das Risiko, dass durch eine Unternutzung in einem Land verstärkt Importe, oft aus Rodungen, erfolgen und damit die Senkeneffekte insgesamt wieder ausgeglichen werden. Je nach Waldtyp, Alter, Struktur und Zustand kann die Senkenleistung auch durch Katastrophen verringert werden. Vor allem in Naturwäldern bestimmen komplexe Vorgänge, die bislang unzureichend erforscht sind, den Gesamtvorrat (Körner, 2020). Studienergebnisse weisen etwa darauf hin, dass eine erhöhte Wachstumsrate nicht zwangsläufig den Biomassevorrat erhöht, da durch erhöhte Mortalität und rascheren Turnover Zugewinne neutralisiert werden (Brienen et al., 2020). Solange die Mortalitätsrate unklar ist, sind eindeutigen Aussagen über den potenziellen Gesamtvorrat nur schwer möglich.

4.4 Potenzielle Gesprächspartner:innen und Expert:innen

- Mag. Karin Enzenhofer, WWF Österreich
- Dr. Hanns Kirchmeir, E.C.O. Institut für Ökologie
- Dr. Robert Jandl, Bundesforschungszentrum für Wald
- Dr. Mathias Neumann, Universität für Bodenkultur Wien
- Dr. Dominik Thom, Technische Universität München

Mögliche Fallbeispiele

- Wildnisgebiet Dürrenstein (Urwaldgebiet) bzw. Nationalpark Kalkalpen (Urwaldgebiete und Wälder, die vor über 20 Jahren außer Nutzung gestellt wurden)

5 KOHLENSTOFF IM WALD ODER IN HOLZPRODUKTEN SPEICHERN?

5.1 Kernbotschaften

- Es gibt einen fachlichen Diskurs darüber, ob die Pariser Klimaziele eher durch eine Intensivierung oder Extensivierung der Holznutzung erreicht werden können.
- Derzeit werden im österreichischen Wald jährlich ca. 6,3 t Kohlenstoffdioxid (CO₂) pro Hektar gebunden und in langlebigen Holzgeweben gespeichert.
- Die maximale Waldbiomasse, die durch die Größenordnung des Holzvorrats beschrieben wird, ist durch biologische Grenzen beschränkt und liegt für die meisten Waldtypen bei 500 bis 700 Vorratsfestmeter.
- Derzeit liegt der durchschnittliche Vorrat der österreichischen Wälder aufgrund der jahrhundertelangen forstlichen Bewirtschaftung bei etwa 350 Vorratsfestmeter – es besteht also noch eine erhebliche Reserve im Speichervolumen.
- Holzbiomasse kann neben dem Wald auch im Holzproduktepool (in Gebäuden und Einrichtungsgegenständen) gespeichert werden. Daher müssen die Potenziale in der Steigerung des Holzproduktepools, der maßgeblich über Menge und Verwendungsdauer gesteuert wird, berücksichtigt werden.
- Holzbiomasse kann stofflich und energetisch andere Materialien ersetzen, die einen hohen Treibhausgasausstoß verursachen und sich damit positiv auf die Treibhausgasbilanz auswirken.
- Die Summenwirkung aus Holzproduktepool, stofflicher und energetischer Substitution weist deutlich geringere Treibhausgasreduktionen auf, als durch eine Steigerung des Vorratsaufbaus im Wald (Proforestation) möglich sind. Die Daten der CareforParis-Studie zeigen, dass das Szenario „Vorratsaufbau“ im Jahr 2050 um 8 Mio. t CO₂ mehr bindet als das Referenzszenario „Business as usual“. Im Vergleich zum Szenario „Umtriebszeitverkürzung“, also einer Intensivierung der Holznutzung, beträgt es sogar 16 Mio. t/Jahr mehr.
- Unter dem Begriff „Proforestation“ wird die Steigerung der

Kohlenstoffaufnahmen im Wald durch Vorratsaufbau und die Entwicklung natürlicher Strukturen und damit die Erhöhung der Biodiversität verstanden.

5.2 Der aktuelle Diskurs

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Kernfrage, wie sich Kohlenstoffspeicherung durch Nutzung bzw. durch Vorratsaufbau im Wald optimieren lässt. Über die Frage, ob es in der Gesamtbilanz besser ist, den Baum zu ernten und als Ressource zu nutzen oder den Baum im Wald weiterwachsen und Kohlenstoff speichern zu lassen, wird kontroversiell diskutiert. Generell gibt es zwei sich teilweise widersprechende Argumentationslinien:

Linie 1: Schützen und Vorratsaufbau

- Wälder speichern mehr und länger Kohlenstoff in Biomasse und Boden, als es durch die Holznutzung möglich wäre – trotz Holzprodukten und Substitution fossiler Energieträger.
- Wälder bieten ein unmittelbar verfügbares, großes Potenzial zusätzlichen Kohlenstoff zu binden, ab sofort, ohne technologische Investitionen.
- Eingriffe in Waldökosysteme sind mit zusätzlichem Energieaufwand (Ernte und Verarbeitung) und Unsicherheiten behaftet (z. B. Erfolg der Wiederaufforstung, Nutzungsdauer der Produkte, Endnutzung des Holzes). Nach der Holzernte im Kahlschlagverfahren dauert es 1–2 Jahrzehnte, bis die Erntefläche wieder zu einer Netto-Senke wird (Knapp et al. 2021) – zu lange, um bis zum Erreichen der Pariser Klimaziele im Jahr 2050 eine positive Bilanz zu erreichen.

Linie 2: Nutzung optimieren und möglichst viel Holz in Produktkreisläufe einfließen lassen

- Durch Holznutzung wird Holzbiomasse und der darin gespeicherte Kohlenstoff dauerhaft in Produkten wie Häusern oder Möbeln gespeichert. Zugleich wächst am Erntestandort ein neuer Wald nach und speichert wiederum Kohlenstoff.
- Weiters können durch Holzprodukte andere Produkte aus anderen Materialien mit großem Kohlenstoffrucksack (z. B.

- Stahl oder Beton) ersetzt und damit Emissionen reduziert werden.
- Der genutzte und gepflegte Wald ist weniger anfällig gegenüber Störungen und die Zuwachs- und damit die Speicherleistung wird optimiert.
- Durch eine Holznutzung wird der grüne Sektor gefördert und damit eine große wirtschaftliche Wertschöpfung in abgelegenen Regionen erzielt.
- Jegliche energetische Substitution von fossiler Energienutzung durch Holzbiomasse verringert die aus fossilen Lagerstoffen freigesetzte CO₂-Menge.
- Nur Photovoltaik, Wasser- und Windenergie allein sind nicht in der Lage den Energiebedarf nachhaltig zu decken. Biomasse ist hier eine wesentliche Säule.

Eine Kohlenstoffspeicherung kann im Wesentlichen über drei Wege erfolgen: Sequestrierung im Wald, Speicherung in Holzprodukten und durch die materielle und energetische Substitution.



Abbildung 16: Die 3 S der Kohlenstoffspeicherung: Sequestrierung, Speicherung und Substitution

Hintergrund CareforParis Studie

Um Klimaveränderungen und mögliche Anpassungsstrategien für den Wald abschätzen zu können, wurden im breit angelegten Projekt CareforParis in Zusammenarbeit vom Umweltbundesamt, BfW, BOKU, und Wood K plus verschiedene Bewirtschaftungsszenarien und Entwicklungen bis ins Jahr 2150 untersucht (Weiss et al., 2020b, 2020a). Die Szenarien berücksichtigen dabei neben verschiedenen Klimawandelmodellen das System Wald sowie die damit verbundenen Auswirkungen auf den Holzproduktetpool, sowie die energetische und stoffliche Substitution.

Als zentrale Anpassungsstrategien wurde eine Umtriebszeitverkürzung, ein Baumartenwechsel sowie ein moderater Vorratsaufbau im Wald näher untersucht und deren Auswirkungen auf die Kohlenstoffspeicherung ermittelt. Es handelt sich dabei um keine Treibhausgasoptimierungsszenarien, sondern um die Modellierung von Klimawandel-Anpassungsstrategien in der Waldbewirtschaftung, um abzuschätzen, wie sich die Treibhausbilanz des waldbasierten Sektors im Klimawandel entwickelt.

Es handelt sich hier um die größte und eine der aktuellsten Studien, die sich mit dem Speicherpotenzial des Waldes in Österreich befasst.

5.3 Sequestrierung und Speicherung von Kohlenstoff im Wald

Im Holz des Waldes werden laufend große Mengen Kohlenstoff gebunden. In einem Hektar Wald wachsen pro Jahr im Schnitt rund 8,9 Vorratsfestmeter Holz zu (Russ, 2019), was 6,3 t Kohlenstoffdioxid entspricht (Sequestrierung). Die Verteilung des Kohlenstoffs im Baum ist im Laufe des Lebens eines Baumes nicht gleichmäßig. Je älter ein Baum wird, desto mehr steigt die dauerhaft gespeicherte absolute Kohlenstoffmenge im Holz und desto geringer wird der Anteil an kurzfristig gespeichertem Kohlenstoff etwa in der Blattmasse. Thurner et al. (2019) ermittelten, dass bei der Buche die lebende Biomasse im Holz (Splintholzbiomasse) von ca. 40 t C/ha bei einem 30-jährigen Bestand auf bis zu 140 t C/ha im Alter von 120 Jahren ansteigt. Im selben

Zeitraum sinkt die Blattmasse von ca. 2 t C/ha auf 1 t/ha. Stirbt das Splintholz nach innen ab, wird es zu Kernholz, das wiederum auch Kohlenstoff dauerhaft bindet. Dieser Kohlenstoff wird entweder durch Ernte (Holznutzung) oder durch Absterben des Baumes und der darauffolgenden langsamen Verrottung bzw. Dauerhumusaufbau dem System wieder entzogen. Im Laufe des Lebens eines Baumes steigt damit mit der Zeit der gespeicherte Kohlenstoff (Pool) kontinuierlich an, während sich die zusätzliche Sequestrierungsleistung langsam reduziert.

Im Hinblick auf den Klimawandel und die optimale Kohlenstoffspeicherung werden aktive Diskussionen zwischen Wissenschaftler:innen, Politik und Gesellschaft geführt. Während aus Sicht der Forstwirtschaft die Nutzung (Entnahme) durch die Entwicklung der jährlichen Zuwachsraten definiert wird, könnte eine reduzierte Nutzung und ein gezielter Vorratsaufbau eine interessante Option zur Maximierung der Kohlenstoffspeicherung sein. Beide Positionen werden durch jeweilige wissenschaftliche Studien gestützt.

5.3.1 Klimaschutz durch Vorratsaufbau im Wald

Gemäß Ibisch et al. (2020) ist der Biomasseaufbau innerhalb der Wälder die rascheste, effizienteste und einfachste Möglichkeit, einen langfristigen Kohlenstoffspeicher aufzubauen. Durch geringere Nutzung erfolgt eine höhere Biomasseakkumulation und dadurch eine höhere Kohlenstoffbindung und höhere Klimaschutzwirkung als durch eine Holznutzung. Dies würde dadurch verstärkt, dass es bei einem konsequenten Vorratsaufbauszenario eine höhere Bestockung (z. B. Bewaldung der Rückegassen) geben könnte und durch höhere Totholzvorräte der Gesamtkohlenstoffpool des Waldes weiter vergrößert werden könnte.

Im Vergleich zu europäischen Urwäldern sind die derzeitigen Holzvorräte in Wirtschaftswäldern laut Österreichischer Waldinventur (ÖWI) eher gering (Russ, 2019). In Österreich liegt der Holzvorrat bei derzeit ca. 351 Vorratsfestmetern pro Hektar Wald (ÖWI 2016–18; (Gschwantner, 2019)) und damit in etwa bei der Hälfte des möglichen Holzvorrats, der in Naturwäldern vorhanden ist (siehe Mittelwert in Tabelle 2). Seit der letzten Inventurperiode 2007–2009 hat der Vorrat insbesondere auf Kleinwaldflächen – allerdings mit abnehmender Geschwindigkeit –

zugunommen (Russ, 2019). In Österreich liegt gemäß der Waldinventur 2016–2018 der durchschnittliche jährliche Zuwachs bei rund 8,9 Vfm, wovon etwa 7,8 Vfm genutzt werden (88 %) (Gschwantner, 2019).

Bei den Wäldern in Österreich besteht aufgrund der natürlichen Leistungsfähigkeit der Waldökosysteme noch ein großes Potenzial, den Vorrat und damit den gespeicherten Kohlenstoff zu erhöhen. Es scheint, selbst ohne Berücksichtigung des Bodenkohlenstoffs, ein zusätzliches Biomassepotenzial in unseren Breiten von bis zu 34 % im Bereich des Möglichen (Erb et al., 2018).

Tabelle 2: Vorratsvolumen in Ur- und Naturwäldern in Mitteleuropa.

Grün markierte Referenzen stammen aus Österreich.

Quelle: Kirchmeir et al. (2020)

Autor	Land	Gebiet	Vfm/ha
Steiner et al.	AT	Neuwald	745
Commarmot et al. 2013	UA	Karpatischer Urwald Unolka-Shyrokyi Luh	767
Lábusová et al. 2019	CZ	Jizera Mountains Beech Forest Reserve, Tschechien	679
Piovesan et al. 2010	IT	Lateis – Karnische Alpen	496
Piovesan et al. 2010	IT	Trelli – Karnische Alpen	302
Piovesan et al. 2010	IT	Timau – Karnische Alpen	601
Piovesan et al. 2010	IT	Gracco – Karnische Alpen	272
Piovesan et al. 2010	IT	Cleulis – Karnische Alpen	355
Piovesan et al. 2010	IT	Val Cervara – Appennin	506
Piovesan et al. 2010	IT	Coppo del Principe – Appennin	725
Piovesan et al. 2010	IT	Fonte Regna – Appennin	524
Piovesan et al. 2010	IT	Monte Cimino – Appennin	653
Piovesan et al. 2011	IT	Monte Raschio	595
Calamini et al. 2011	IT	Cozzo Ferriero	1245
Calamini et al. 2011	IT	Sasso Fratino	1070
Turcu	RO	Izvoarele Nerei – Rumänien	1080
Jaworski et al. 1991, 2002	PL	Bieszczady	794
Gehlar & Knapp. 2015	DE	Insel Vilm – Deutschland	420
Ruprecht et al. 2012	AT	Goldeck	725
Ruprecht et al. 2012	AT	Hutterwald 1	362
Ruprecht et al. 2012	AT	Kronawettgrube	478
Ruprecht et al. 2012	AT	Laser Berg	538
Lamedica et al. 2011	RO	Codrul Secular Giumalau Forest Reserve	534
Lamedica et al. 2011	IT	Valbona Forest Reserve	1009
		Mittel	645

Abgesehen von der Frage, als wie groß die Senkenwirkung von Kohlenstoff im Dauerhumus in Urwaldstandorten zu beurteilen ist, steht außer Zweifel, dass im österreichischen Wirtschaftswald durch einen Vorratsaufbau große Mengen von Kohlenstoff in den nächsten Jahrzehnten gespeichert werden könnten, bis ein maximaler Sättigungsgrad (der im Schnitt zwischen 600–700 Vfm/ha liegt) erreicht wird.

In der CareforParis-Studie (Hintergrund siehe Kap. 5.2) wurden mehrere Modelle verwendet, um die die Auswirkung von Bewirtschaftungsszenarien in Zukunft und dessen Auswirkungen auf die Treibhausgasemissionen zu prognostizieren. Die Ergebnisse zeigen, dass in etwa 50–100 Jahren der österreichische Wald aufgrund der Klimaveränderung zu einer Netto-Kohlenstoffquelle werden könnte (Weiss et al., 2020b). Sollte dieses Szenario eintreffen, wird weniger Kohlenstoff aus der Atmosphäre in Biomasse gespeichert als in den Jahren zuvor.

Grundsätzlich muss unterstrichen werden, dass Wälder auch in hohem Alter (über 200 Jahre) noch kontinuierlich Kohlenstoff binden (ca. 2,4 t C/ha/Jahr) (Luyssaert et al., 2008). Der Gesamtkohlenstoffgehalt steigt mit dem Alter des Waldes, v. a. jenseits von 130 Jahren (Ibisch et al., 2020). Dieses Alter wird in den österreichischen Wirtschaftswäldern aber kaum jemals erreicht und es bedeutet, dass praktisch auf der gesamten österreichischen Waldfläche noch eine deutliche Steigerung der in Biomasse gebundenen Kohlenstoffvorräte möglich wäre.

Seitens der Forstwirtschaft werden vor allem Zuwachsraten (also die zusätzliche Speicherung durch die jährliche Zuwachsleistung) hervorgehoben, während aus waldökologischer Sicht der im Wald gespeicherte Gesamtvorrat (also der gesamte im Wald gespeicherte Kohlenstoff) in den Vordergrund gerückt wird. Diese Aspekte werden oft gerne instrumentalisiert und vermengt.

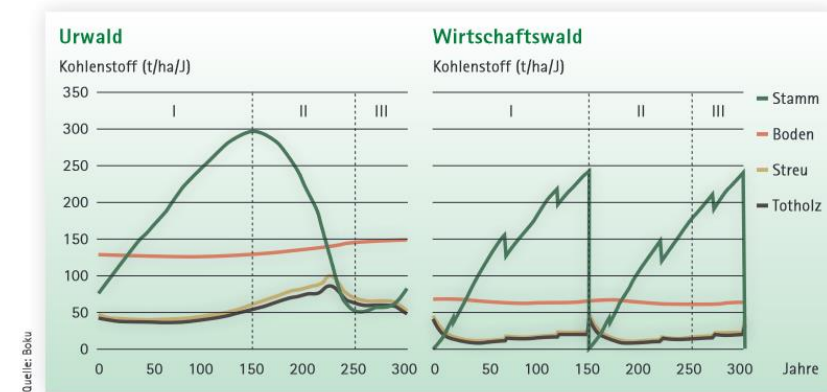


Abbildung 17: Kohlenstoffgehalt im Urwald und Wirtschaftswald im Vergleich
Vergleich von Kohlenstoff in Stamm, Streu, Boden und Totholz entlang der I Wachstumsphase, II Zerfallsphase und III Übergangsphase
Quelle: Hasenauer, (2014).

Die Darstellung in Abbildung 17 (Hasenauer, 2014) erweckt den Anschein, dass der Kohlenstoffgehalt in einem Urwald ab ca. einem Alter von 150 Jahren rapide abfällt, während in einem Wirtschaftswald zuvor durch Ernte am optimalen Zeitpunkt Holz entnommen wird. Während dies für den Zuwachs gelten mag, steigt in einem Urwald der Vorrat aber weiter. Daher ist die Darstellung in Abbildung 18 (Krug and Köhl, 2010) wesentlich präziser. Hier sieht man, dass sich der Vorrat anfangs rasch aufbaut (über Zuwachs) und dann im Laufe der Zeit kontinuierlich und langsam zunimmt.

Diese zwei Beispiele aus wissenschaftlichen Publikationen zeigen sehr deutlich, wie bestimmte Positionen selektiv hinterlegt werden können.

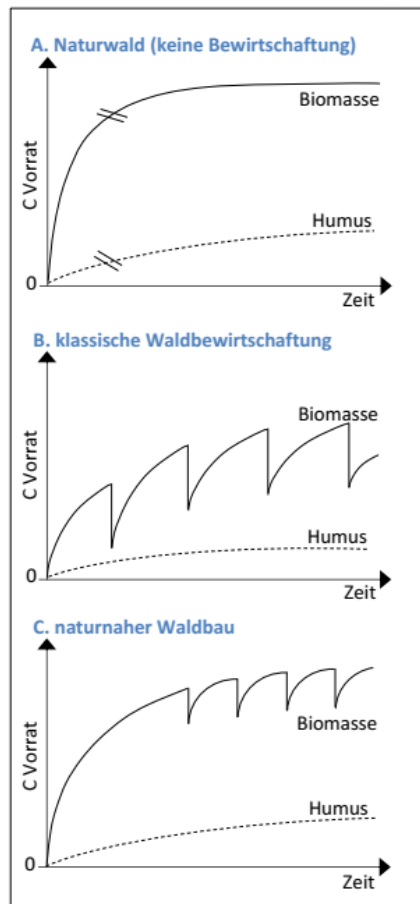


Abbildung 18: Kohlenstoffvorrat in Biomasse und Humus in verschiedenen Bewirtschaftungsmodellen

Vergleich von unbewirtschaftetem Naturwald, klassischer Waldbewirtschaftung und naturnahem Waldbau
Quelle: Krug und Köhl (2010)

Obwohl in den Schlussfolgerungen der CareforParis-Studie (Weiss et al., 2020a) dargelegt wird, dass Nutzungsszenarien gegenüber Vorratsaufbauszenarien zur Erreichung der Klimaziele zu priorisieren sind, zeigen die Ergebnisse auch, dass in fast allen in der CareforParis gerechneten Modellierungen der Wald frühestens in rund 90 Jahren von der Senke zur Quelle wird. Andererseits zeigt etwa das Szenario Umtriebszeitverkürzung mit maximaler Nutzung (etwa für Energie und Holzprodukte), dass dies bereits nach 15 Jahren eintritt.

Die CareforParis-Studie nimmt an, dass der jährliche Zuwachs zukünftig langsamer als in den vorangegangenen Perioden erfolgt (von 2,3 VfmS/ha/Jahr⁵ auf 1,7 VfmS/ha/Jahr) und der Vorrat im Szenario Vorratsaufbau rund um das Jahr 2130 ein Maximum von ca. 560 VfmS/ha erreicht, während in allen anderen Szenarien sich der Vorrat zwischen 200 und 350 VfmS/ha/Jahr bewegt (Weiss et al., 2020a, Abbildung 19).

Nimmt man die Pariser Klimaziele für 2050 als Referenzwert, wäre zum Zeitpunkt 2050 in einem Vorratsaufbauszenario 50–100 VfmS/ha mehr als in allen anderen Szenarien im Wald gespeichert. Das entspricht einem CO₂-Äquivalent von 45–90 t/ha und somit auf der österreichischen Waldfläche 178–356 Mio. t CO₂-Äquivalenten (also der 2–4,5-fachen Menge des derzeitigen jährlichen österreichischen Treibhausgasausstoßes).

Das Potenzial, dass im Wald erhebliche zusätzliche Mengen an CO₂ aus der Atmosphäre gespeichert werden könnten, wird auch von der CareforParis-Studie bestätigt. Das in der Studie verwendete Vorratsaufbauszenario hinterlegt in seinen Modellen eine Steigerung des Vorrats von 350 auf 550 Vorratsfestmeter pro ha bis zum Jahr 2150.

⁵ VfmS: Vorratsfestmeter Schafftholz

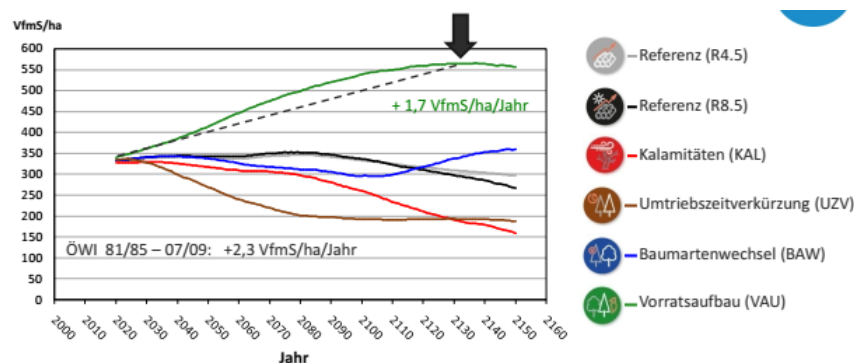


Abbildung 19: CareforParis: Modellierter Vorratsentwicklung im Wald in unterschiedlichen Szenarien

Quelle: Weiss et al. (2020b)

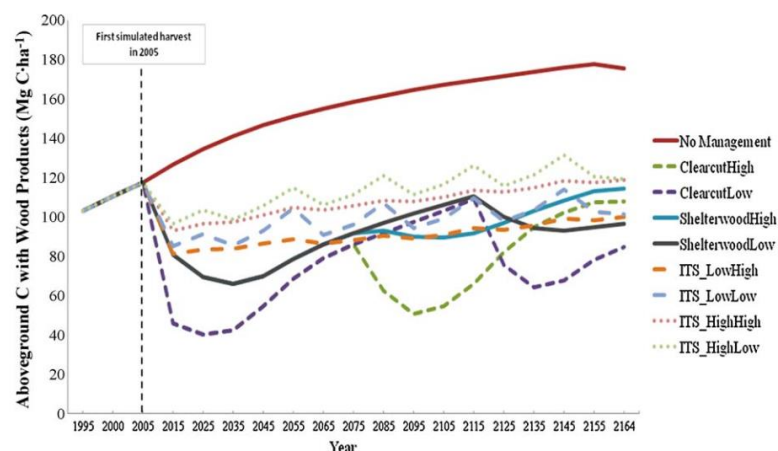


Abbildung 20: Modellierter Kohlenstoffgehalt (inkl. der Speicherung in Holzprodukten) für verschiedene Bewirtschaftungsszenarien.

No Management (keine Holzernte) schneidet hierbei zumindest für die nächsten 150 Jahre mit Abstand am besten ab

Quelle: Nunery und Keeton (2010)

5.3.2 Die Rolle des Bodens und Totholz

Neben der lebenden Biomasse befindet sich im Wald ein beträchtlicher

Teil des Kohlenstoffs im Boden sowie im stehenden und liegenden Totholz. Nord-Larsen et al. (2019) stellten mit 1,5 t/ha Kohlenstoff in einem dänischen Urwald etwa die 43-fache Totholzmenge im Vergleich zum durchschnittlichen dänischen Wald fest.

Bezüglich des Aufnahmepotenzials von Kohlenstoff im Boden ist in der Forschung noch wenig bekannt. Daher wird der Boden in der Klimabilanz und in der Methodik des IPCC prinzipiell als neutral geführt. Mehrere Studien weisen darauf hin, dass vor allem intensiv bewirtschaftete, gleichaltrige Wälder sinkende Bodenkohlenstoffwerte aufweisen (z. B. Grüneberg et al. 2013 zit. In Nord-Larsen et al., 2019). Nord-Larsen et al. hatten daher im dänischen Urwald höhere Bodenkohlenstoffwerte als in bewirtschafteten Wäldern (Nord-Larsen et al., 2019) erwartet, was aber nicht zutraf.

Totholz zerfällt über Jahrzehnte bis Jahrhunderte, wird zu Humus, der wiederum nach Jahrzehnten abgebaut wird, und setzt somit langsam wieder Kohlenstoff frei. Dieser Zersetzungsprozess dauert jedoch Jahrzehnte und ist zusammen mit dem Nachwachsen von jungen Bäumen in einem Urwald weitgehend CO₂-neutral (Suzuki et al., 2019). Es wird angenommen, dass Totholz eine längere Verweilzeit hat als etwa Holzprodukte (Beudert and Leibl, 2020). Zudem ist die Akkumulation von Humus im Waldboden nicht zu unterschätzen, wenngleich noch unzureichend erforscht. Weitere Studien zeigen zudem, dass biomassereiche alte Wälder resilienter gegenüber dem Klimawandel sind (Seidl et al., 2017; Thom et al., 2017).

5.4 Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten

Wenn weniger Holz geerntet wird, um den Vorrat an Holzbiomasse im Wald zu steigern, dann steht weniger Holz für die stoffliche und energetische Nutzung zur Verfügung. Durch stoffliche und energetische Substitution können jedoch auch Treibhausgasemissionen vermieden werden bzw. wird auch in Holzprodukten Kohlenstoff gespeichert. Die Berechnung dieser vermiedenen Treibhausgasemissionen bzw. die in Holzprodukten gespeicherten Kohlenstoffmengen basieren auf einer Reihe von Annahmen und zeigen in den Berechnungen daher eine relativ breite Streuung.

Der Holzproduktepool

Wird der Wald geerntet, wird der Kohlenstoff in (Holz)produkten weiterhin gebunden. Da Holzprodukte selbst keinen Kohlenstoff aus der Atmosphäre entnehmen, sind sie keine Kohlenstoffsenke, aber speichern einen Teil des Kohlenstoffs, der von den Bäumen sequestriert wurde. Holzprodukte sind also für die Dauer ihrer Verwendung ein Kohlenstoffspeicher. Nach Ablauf ihrer Verwendungsdauer wird der gespeicherte Kohlenstoff entweder durch thermische Verwertung oder durch Zersetzung (Kompostieranlage, Deponie) wieder der Atmosphäre zugeführt. Die Gesamtheit des zu einem bestimmten Zeitpunkt in Holzprodukten gespeicherten Kohlenstoffs stellt den Holzproduktepool dar. Wird die Verwendungsdauer (Halbwertszeit) oder die Menge der Holzprodukte insgesamt erhöht, vergrößert sich auch der Holzproduktepool (Rüter, 2016). Je nach Art der Verwendung oder Produktkategorie werden unterschiedliche durchschnittliche Lebensdauern (Halbwertszeiten) angenommen. Dadurch lässt sich die Größe des Pools und der darin gespeicherten Kohlenstoffmengen berechnen.

Bei der Berechnung werden entweder Halbwertszeiten (Tabelle 3) oder Lebens- bzw. Nutzungsdauern (Tabelle 4) von Holzsortimenten oder Produktkategorien angenommen.

Tabelle 3: Halbwertszeiten unterschiedlicher Quellen für verschiedene Sortimente

<i>Halbfertigprodukte</i>	<i>Quelle</i>	<i>Vergleichswerte (IPCC, 2014)</i>
Thermische Verwertung	1 Jahr (Wördehoff et al., 2011)	-
Schnittholz	9,5 Jahre (Braun et al., 2015) 16,6 Jahre (Mantau and Bilitewski, 2010)	35
Platten	9 Jahre (Braun et al., 2015) 11 Jahre (Mantau and Bilitewski, 2010)	25
Papier	2 Jahre (Wördehoff et al., 2011)	2

*Tabelle 4: Zu Grunde gelegte Nutzungsdauern in der CareforParis-Studie
Quelle: Fritz und Pölz (2019)*

<i>Nutzungsdauer in Jahren</i>	<i>Nadelholz</i>	<i>Laubholz</i>	<i>Holzplatten</i>
Bau/Konstruktion	50	50	50
Gestaltende Konstruktion	25	25	25
Möbel	50	50	50
Holzverpackungen	20	20	20
Andere Waren	50	50	

Die CareforParis-Ergebnisse (Weiss et al., 2020b) zeigen, dass im Holzproduktepool vor allem bis 2070 größere Senkenleistungen erzielt werden können. Allerdings stellt sich auch hier ab einem gewissen Zeitpunkt ein Gleichgewicht ein. Bei einem Baumartenwechsel hin zu mehr Laubholz fällt ab ca. 2100 vor allem ins Gewicht, dass Laubholz verstärkt einer energetischen anstatt einer stofflichen Nutzung zugeführt wird.

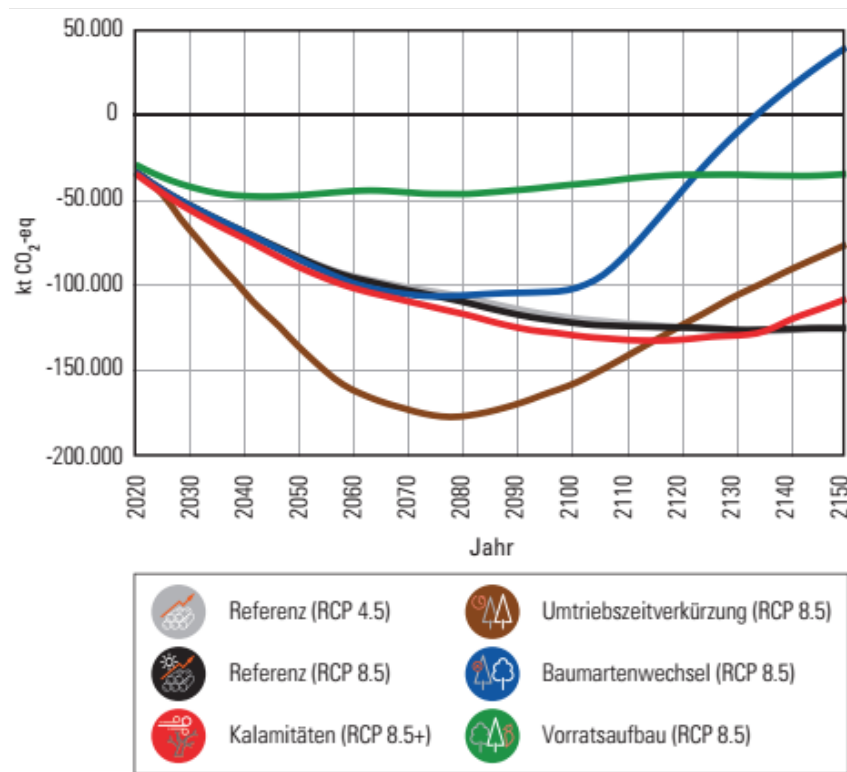


Abbildung 21: Entwicklung des Holzproduktepools in den CareforParis-Szenarien

Quelle: Braun et al. (2020)

5.4.1 Effizienz der Speicherung in Holzprodukten gegenüber der Speicherung im Wald

Wesentliche Stellgrößen in den Modellen sind vor allem Annahmen von Halbwertszeiten von Produkten, der Zeithorizont sowie die festgelegten Systemgrenzen.

Ausschlaggebend für die Effizienz der Speicherung ist die Nutzungsdauer, die direkt mit der Art der Produkte zusammenhängt. Werden Produkte wie Möbel um 20 % länger verwendet, erhöht sich die

Bedeutung dieses Pools enorm. Der Kohlenstoff vorwiegend kurzlebiger Produkte wird jedoch rasch wieder in die Atmosphäre freigegeben. Dies ist auch eine gesellschaftliche Frage und eng mit dem Thema Kreislaufwirtschaft, Wegwerfgesellschaft und Obsoleszenz von Produkten verknüpft. Die angenommene Halbwertszeit definiert das Endergebnis.

Die Berechnung der Kohlenstoffspeichermengen im Holzproduktepool erfolgt unter unterschiedlichen Annahmen.

Man kann die Erntemengen von Sägerundholz heranziehen (ca. 9 Mio. m³ pro Jahr in Österreich + ca. 7 Mio. m³ Import). Aus den 16 Mio. Sägerundholz werden ca. 10 Mio. m³ Schnittholz produziert (davon gehen 2 Mio. mehr in den Export, als importiert werden). Nur 4,3 Mio. m³ werden als Sägeprodukte schlussendlich auf den Markt gebracht. Dazu kommen noch 2,9 Mio. m³ aus der Plattenindustrie.

Oft wird angenommen, dass diese gefertigte Menge an Holzprodukten 1:1 als Kohlenstoffspeicher angerechnet werden könnte. Es ist aber nicht die Menge der hergestellten Holzprodukte relevant, sondern die Veränderung des gesamten Holzproduktepools. Ersetzt man nämlich ein altes Holzprodukt durch ein neues und wird das alte Holz thermisch entsorgt oder kompostiert, so verändert sich das Speichervolumen im Holzproduktepool nicht.

Braun et al. (2016) haben für den Zeitraum 2002–2011 ermittelt, dass sich der Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten um ca. 1,02 Mio. t vergrößert hat. Das entspricht einer jährlichen Menge von 102.200 t C pro Jahr, also der Menge von ca. 340.000 m³ Holz. Von den jährlich geernteten 25,9 Mio. m³ Holz, die aus dem österreichischen Wald entnommen werden, wird nur ein sehr kleiner Teil in einem Zuwachs des Holzproduktepools gespeichert. Braun et al. (2016) geben auch an, dass noch etliche Unsicherheiten über die Nutzung von Holz z. B. aus Baumärkten besteht oder wie lange Möbel wirklich in Verwendung sind.

Basierend auf aktuellen Erkenntnissen weist aber auch die EU-Waldstrategie darauf hin, dass die Kohlenstofffrage mit Holzprodukten allein nicht lösbar ist und in den nächsten 20–50 Jahren keine vorrangige Rolle spielen kann (Europäische Kommission, 2021). Zudem ist langfristig auch mit einem starken Rückgang des Effekts zu rechnen, da durch eine Sättigung des Marktes und zunehmender Nutzung von Holz

als Ersatz für Holzprodukte der CO₂-Speicher nicht weiter vergrößert werden kann.

Große Veränderungen im Holzproduktetepool sind nur zu erwarten, wenn Gebäude oder Konstruktionen aus Beton oder Ziegel durch Holzkonstruktionen ersetzt werden.

5.5 Energetische Nutzung und Substitutionseffekte (Gas-, Ölheizungen, Biomasse)

Große Mengen von Kohlenstoff sind in fossilen Brennstoffen wie Erdöl, Erdgas und Kohle gebunden und wurden und werden durch deren Verbrennung vom Menschen wieder in die Atmosphäre freigesetzt, was den Treibhauseffekt und die globale Klimaerwärmung maßgeblich antreibt.

Demgegenüber wird die Nutzung von Energie aus Biomasse als erneuerbare Energie eingestuft. Das Prinzip geht davon aus, dass z. B. Holz aus einem Wald zur energetischen Nutzung entnommen und verbrannt wird, der im Holz gebundene Kohlenstoff dabei zwar in die Atmosphäre freigesetzt wird, aber auf der Waldfläche durch die nachwachsende Holzmenge im gleichen Volumen, dieselbe Menge Kohlenstoff wieder gebunden wird.

Berücksichtigt man die Menge fossilen Kohlenstoffs nicht, die durch die Ernte und den Transport sowie die Aufbereitung vor der Verbrennung (Häckseln, Trocknen) freigesetzt wird, ist dieses Kreislaufkonzept grundsätzlich richtig und die Biomassenutzung kann einen Teil des vom Menschen benötigten Energiebedarfs langfristig decken (Kühmaier et al., 2019).

5.5.1 Anteil des thermisch verwerteten Holzes

In Deutschland wird derzeit ein Drittel des frisch geernteten Holzes verbrannt und damit unmittelbar wieder der Atmosphäre zugeführt (Ibisch et al., 2020). Ähnliches gilt auch für Österreich. Im Jahr 2019 entfielen rund 70 % der Erntemenge auf die stoffliche Nutzung und 30 % auf die energetische Nutzung (B.M.L.R.T., 2021).

Die Holzstromanalyse für Österreich zeigt jedoch, dass der effektive

Anteil der thermischen Nutzung am Ende der Verarbeitungskette wesentlich höher liegt. Auf Basis der Daten der österreichischen Holzstromanalyse für das Jahr 2015 (Strimitzer et al., 2017) wurde ermittelt, wie hoch die jeweiligen Anteile der unterschiedlichen Produktkategorien Schnittholz, Spanplatten, Pappe/Papier sowie Holz für die thermische Verwertung am Gesamtholzaufkommen sind (Getzner, 2018).

Demzufolge wird Sägerundholz zu 56 % zu Schnittholz und zu jeweils 5 % zu Platten und Papier/Pappe verarbeitet, 35 % werden schlussendlich jedoch ebenfalls thermisch verwertet. In der Sortimentskategorie Industrierundholz werden von der gesamten Rohstoffmenge 5 % zu Schnittholz, 24 % zu Platten, und 32 % zu Papier/Pappe verarbeitet; 40 % werden thermisch verwertet. Für die Sortimentskategorie „Brennholz“ wurde eine 100%ige thermische Verwertung angenommen.

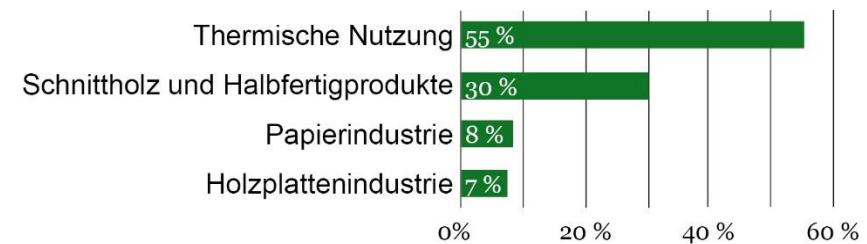


Abbildung 22: Holzverwendung in Österreich gemäß Holzstromanalyse.

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Strimitzer et al. (2017)

Das Aufsummieren dieser Teilströme zeigt, dass nach allen Verarbeitungskaskaden insgesamt nur etwa ein Drittel des in Österreich eingeschlagenen Holzes zu Schnittholz und Halbfertigprodukten verarbeitet wird und mehr als die Hälfte des Holzes thermisch verwertet wird. Rund 15 % des Holzes wird in der Platten- und Papierindustrie verarbeitet. Dabei werden ca. 7 % zu mehr oder weniger langlebigen Produkten aus Holzplatten und 8 % zu kurzlebigen Produkten aus Papier und Pappe weiterverarbeitet.

5.5.2 Wirkungsgrad und Kohlenstofffreisetzung

In der aktuellen Situation muss innerhalb kurzer Zeit die Konzentration

von Kohlenstoff in der Atmosphäre reduziert oder zumindest der Konzentrationsanstieg verringert werden, um das globale Klimaziel von 2 °C zu erreichen. Hierfür ist die Biomassenutzung für Österreich für die nächsten 20–30 Jahre kein sinnvolles Instrument, weil Biomasse im Vergleich zu anderen Energieträgern (z.B. Gas) einen schlechten Wirkungsgrad hat. Man benötigt mehr Holz, um die gleiche Energiemenge zu erzeugen. Pro Kilowattstunde Energie wird sogar mehr CO₂ emittiert als bei der Verbrennung von Stein- oder Braunkohle (Matthews et al., 2014; Searchinger et al., 2018). (siehe Tabelle 5).

Die thermische Verwertung von Holz kann zwar auf lange Sicht die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre verringern, aber kurz- bis mittelfristig würde sie den Klimawandel verschärfen. Es wird sogar angenommen, dass unter Berücksichtigung des ganzen Lebenszyklus sowie der unzähligen Unsicherheiten die Verbrennung von Holz zur Energiegewinnung in der Gesamtbilanz bis 2100 sogar schlechter als für Kohle ausfällt (Booth et al., 2020).

In Österreich liegen die Wirkungsgrade für die Umwandlung von Biomasse in Nutzenergie bei 34 % bei Strom und bei 88 % bei Wärme (Böhmer et al., 2014). Vom energetisch genutzten Holz in Österreich werden ca. 10 % zur Stromgewinnung und 90 % zur Wärmeengewinnung genutzt (Statistik Austria, Energiebilanzen 1970–2015 (Österreichischer Biomasse-Verband, 2017, p. 19)) Pro Gigawatt Energie aus Holzbiomasse werden ca. 365–388 t CO₂ freigesetzt, während im durchschnittlichen österreichischen aktuellen Energiemix nur 195,3 t CO₂ pro GWh für Wärmeengewinnung und 305 t CO₂ pro GWh für Stromgewinnung freigesetzt werden. Das bedeutet, dass für die Herstellung derselben Menge Energie, die Biomasse mehr Kohlenstoff in die Atmosphäre freisetzt als der Durchschnitt der anderen in Österreich genutzten Energiequellen.

Die Substitution von Erdgas durch Holz reduziert zwar die Freisetzung fossiler Kohlenstoffmengen in die Atmosphäre, es wird jedoch effektiv die doppelte Menge CO₂ für dieselbe Menge Energie in die Atmosphäre freigesetzt (Booth et al., 2020).

Die Biomassenutzung ist nur so lange als Klimaschutzmaßnahme sinnvoll, als Sägeabfälle und Abfälle aus der Holzverarbeitenden Industrie energetisch genutzt werden und nicht ganze Bäume für energetische Zwecke genutzt werden. Eine gezielte Entnahme von

Biomasse (lebend oder tot) für Biomassekraftwerke aus dem Wald ist nicht sinnvoll, weil der im Wald gespeicherte Kohlenstoff durch die Verbrennung sofort freigesetzt wird. Beim Einsatz anderer Energiequellen werden weniger Treibhausgase für die selbe Energiemenge freigesetzt und die im Wald verbliebenen Bäume können zeitgleich weiter Kohlenstoff aus der Atmosphäre aufnehmen bzw. bleibt der fixierte Kohlenstoff weiter in der Biomasse gebunden.

Auf den durch Holznutzung entstandenen Kahlfächen werden in den ersten 30 Jahren nur geringe Zuwachsraten erzielt. Wird ein 120-jähriger Fichtenbestand jetzt gefällt, wird auf dieser Fläche in den nächsten 30 Jahren bis 2051 nur ca. 145 Vorratsfestmeter pro ha heranwachsen. Bleibt jedoch der 120-jährige Fichtenaltbestand bestehen, so kann er laut Ertragsstafel von Eckmüller in den dreißig Jahren (bis er also 150 Jahre alt ist) mit 309 Vfm/ha mehr als doppelt so viel Vorrat aufbauen (vgl. Fichte Silikat – Ertragsniveau mittel, Siteindex 30,0. (Amt der Tiroler Landesregierung, 2004).

Diese Frage der Sinnhaftigkeit und Auswirkungen von Biomassenutzung wird grundsätzlich kritisch diskutiert und Kritiker:innen und Befürworter:innen führen eine Vielzahl von (oft nicht wissenschaftlich erwiesenen) Argumenten an (Ibisch et al., 2020). Oft wird die Annahme herangezogen, dass nicht genutztes Holz unmittelbar wieder der Atmosphäre zugeführt werden würde, obwohl hinsichtlich der Totholzersetzungsraten noch keine ausreichende Datenlage vorliegt.

Dennoch wird die Verbrennung von Biomasse zu energetischen Zwecken derzeit durch die öffentliche Förderung von Holz-, Pellets- oder Hackschnitzelheizungen zusätzlich befeuert (z. B. <https://www.umweltfoerderung.at/privatpersonen/holzheizungen-2020.html>).

Ein nicht unwesentliches Problem ist, dass die Ergebnisse vieler Studien je nach Zielsetzung stark voneinander abweichen. Während die einen die Vermeidung von Kohlenstofffreisetzung aus fossilen Lagerstätten priorisieren, stellen andere die Reduktion der Freisetzung von Treibhausgasen in die Atmosphäre (unabhängig von ihrem Ursprung) in den Mittelpunkt. Diese unterschiedlichen Zielsetzungen resultieren in verschiedenen Annahmen, da bilanzielle und tatsächliche Emissionen vermengt werden (Holzer and Hammer, 2016).

Einigkeit herrscht jedoch, dass eine Abkehr von fossilen Energieträgern, die Suche nach alternativen Energieträgern, insbesondere zur Wärmeengewinnung, sowie eine generelle massive Senkung des Verbrauches unausweichlich ist.

Tabelle 5: Direkte CO₂-Emissionen verschiedener Brennstoffe bezogen auf den Primärenergiegehalt.

Quelle: Quaschnig (2019)

Brennstoff	Emissionen in Gramm CO ₂ /kWh _{PE}
Holz	395
Torf	382
Braunkohle	364
Steinkohle	354
Heizöl	279
Diesel	267
Rohöl	264
Kerosin	257
Benzin	250
Flüssiggas	227
Erdgas	201

5.5.3 Beitrag der energetischen Nutzung zur Treibhausgasreduktion

Langfristig ist eine Nutzung von Holz als erneuerbarer Energieträger eine fast klimaneutrale Nutzungsmöglichkeit. In der Gesamtkohlenstoffbilanz ist es aber vor dem Hintergrund der ehrgeizigen kurz- bis mittelfristigen Klimaziele eine wichtige Frage, in welchem Umfang Emissionseinsparungen durch energetische Substitution von fossilen Energiequellen durch Holz bis 2050 erreicht werden können. In der CareforParis-Studie wurden die jährlich vermiedenen Emissionen durch energetische Holznutzung für Österreich in verschiedenen Szenarien modelliert (Abbildung 23). Hier zeigt sich für das Jahr 2050, dass die energetische Substitution zwischen 2,0 Mio t (Vorratsaufbau) und 3,5 Mio t (Umtriebszeitverkürzung) CO₂/Jahr beträgt und die Unterschiede

zwischen den Bewirtschaftungsszenarien gering sind. Bei einem Gesamtausstoß von rund 79,8 Mio. t CO₂/Jahr in Österreich (UBA, 2020), handelt es sich hier um 2,5–4,5 % des jährlichen Gesamtausstoßes.

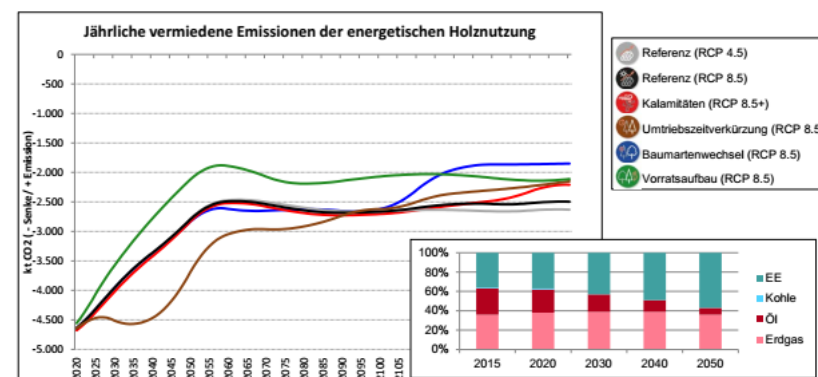


Abbildung 23: Jährlich vermiedene Emissionen der energetischen Holznutzung; Quelle: Fritz & Pölz 2019 in CareforParis (Weiss et al., 2020a)

5.6 Stoffliche Substitutionseffekte von Holzprodukten

5.6.1 Was ist stoffliche Substitution?

Neben dem Beitrag von geerntetem Holz zum Holzproduktepool werden in der Kohlenstoffbilanzierung auch stoffliche Substitutionseffekte angeführt. Damit ist gemeint, dass Holz andere Materialien wie Beton, Metall oder Ziegel ersetzt, die in ihrer Herstellung mehr Treibhausgase freisetzen. Dabei ist es wichtig zwischen dem Holzproduktepool und den Substitutionseffekten zu unterscheiden.

Durch die stoffliche Verwendung von Holz in Form von beispielsweise Produkten oder Baumaterialien können direkt Erzeugnisse aus anderen Rohstoffen, deren Herstellung oder Nutzung mit Emissionen verbunden ist, ersetzt bzw. substituiert werden (Rüter, 2016). Damit werden etwa zwei Fliegen mit einer Klappe geschlagen: Vermiedene Emissionen durch Vermeidung energieintensiver Materialien sowie Speicherung von Kohlenstoff in den Holzprodukten. Beide Aspekte müssen getrennt bewertet und berechnet werden.

Bezogen auf die stoffliche Holznutzung zeigt sich in der CareforParis-Studie, dass die stofflichen Substitutionseffekte umso größer werden, je mehr Holz geerntet und in Umlauf gebracht wird. Abbildung 24 zeigt anhand dieser Studie, dass im Szenario Umtriebszeitverkürzung (also kürzere Erntezyklen), die größten Effekte kurzfristig erzielt werden, und beispielsweise im Jahr 2050 bis zu 7.000 kt CO₂/Jahr vermieden werden können, während im Szenario Vorratsaufbau es zum selben Zeitpunkt nur ca. 4.000 kt CO₂/Jahr sind.

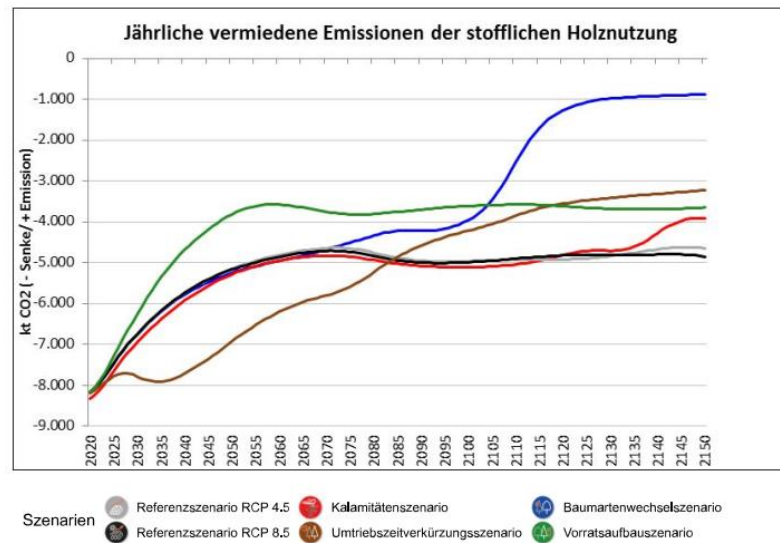


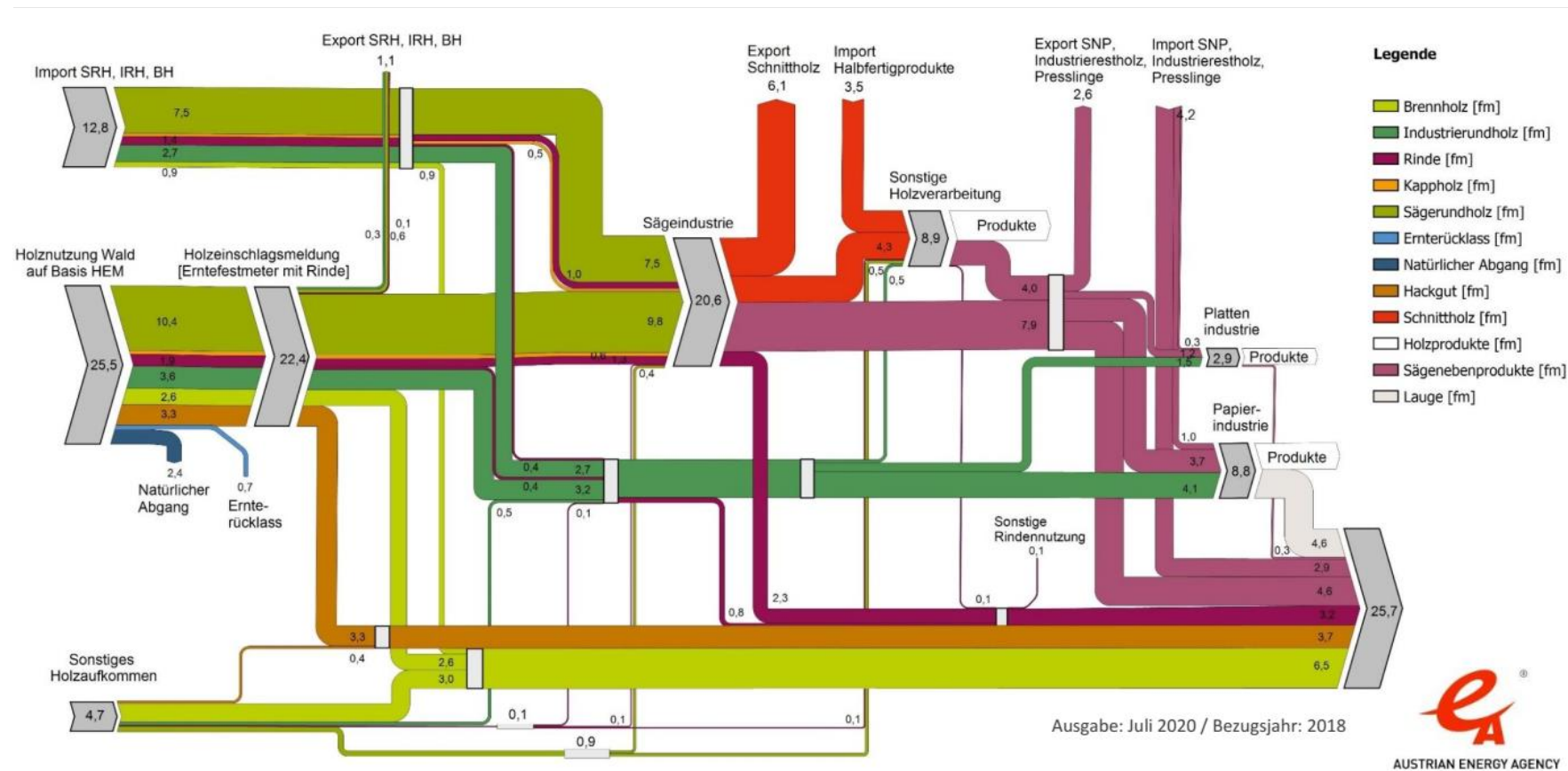
Abbildung 24: Ergebnisse CareforParis: Vermiedene Emissionen durch stoffliche Holznutzung

Quelle: (Weiss et al., 2020a)

Gemäß den Ergebnissen kann durch den Ersatz von CO₂-intensiven Materialien aus Holz und den dadurch vermiedenen Emissionen eine Reduktion der Treibhausgasemissionen erreicht werden (Weiss et al. 2020).

In einer vergleichenden Metastudie stellten Holzer und Hammer (2016) fest, dass die stoffliche Substitution anteilmäßig in allen untersuchten Szenarien das geringste Einsparungspotenzial zeigte.

In der KLIEN-Studie (BFW, 2015) wurde davon ausgegangen, dass jährlich 7.490.000 m³ Nadelholz, 110.000 m³ Laubholz und 2.690.000 m³ Holzplatten für die stoffliche Substitution wirksam werden. Insgesamt könnten jedoch die angenommenen Substitutionseffekte bei der Holznutzung um das 2- bis 100-fache überschätzt werden (Harmon, 2019).



Alle Werte in Mio. Erntefestmeter, Festmeter [fm], Kubikmeter [m³] angegeben; Ströme <0,1 Mio. fm sind nicht dargestellt; Rundungsdifferenzen rechnerisch stellt von DI Lorenz Strimitzer, DI Martin Höher, MSc., Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency, DI Kasimir Nemestothy, LKÖ

Abbildung 25: Holzstromanalyse 2018;
Quelle: Österreichische Energieagentur (2021)

5.6.2 Systemgrenzen: Räumliche Substitution – Importe und Exporte

Österreich darf bei den Stoffflüssen nicht isoliert betrachtet werden. Die Bewertung und Berechnung von Kohlenstoffflüssen in Szenarien werden durch Importe und Exporte erschwert. 2018 importierte Österreich rund 12,8 Mio. Efm Holz und 7,7 Mio. Efm Halbfertigprodukte oder Sägenebenprodukte und exportierte rund 7,2 Mio. Efm Holz sowie 2,6 Mio. Efm Sägenebenprodukte (Österreichische Energieagentur, 2021).

Im Jahr 2020 wurden rund 96 % des Holzeinschlages in Österreich verarbeitet sowie 12,3 Mio. m³ Rohholz und 2,7 Mio. t Hackschnitzel, Späne, Brennholz oder Pellets importiert (B.M.L.R.T., 2021).

Import- und Exportströme sind in die Kohlenstoffflüsse miteinzuberechnen und eng mit Nutzungsänderungen (etwa Vorratsaufbau, mehr oder weniger Holzprodukte) verknüpft. Dies ist eine zentrale Herausforderung in der Kohlenstoffbilanzierung. Ist etwa weniger Holz am Markt durch einen gezielten Vorratsaufbau verfügbar, kann der Materialeinsatz entweder sinken oder durch Nicht-Holzprodukte oder aber durch Importe von Holz substituiert werden. Daher lautet ein wiederkehrendes Argument, dass durch eine reduzierte Holzernte innerhalb des Landes, die Holzernte (inklusive der Wertschöpfung und der Auswirkungen auf die Kohlenstoffbilanz eines Drittlandes) ausgelagert wird. Hier spielen vor allem die Themen „CO₂-Bepreisung bzw. Besteuerung für Importgüter“ eine wichtige Rolle, um eine Marktverzerrung bzw. die Verlagerung von Emissionen in Länder mit niedrigeren Umweltstandards zu vermeiden. Zudem kann nicht ausgeschlossen werden, dass dort Holz aus Intensivplantagen mit wesentlich geringerem Biodiversitätswert zurückgegriffen wird. Um dennoch die Verwendung von Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft unabhängig von der geografischen Herkunft zu gewährleisten, ist die Nutzung von Zertifizierungssystemen wie etwa der FSC-Zertifizierung von grundlegender Bedeutung.

Stimmen aus Forschung: Zur Substitutionsleistung und zum Holzproduktepool

Zur Beurteilung der Substitutionsleistung ist die wichtige Frage, was mit dem Holz passiert. Ist das Holzprodukt kurzlebig oder langlebig? Dies ist zentral, um realistische Einschätzungen der Kohlenstoffspeicherung durch Holznutzung zu machen. Je nach Interessensgruppe wird hier oft der Eindruck erweckt 100 % ginge in Dachstühle oder andersherum 100 % in die energetische Verwertung. Beide Szenarien sind unrealistisch. Die Verhältnisse zwischen lang- und kurzlebigen Produkten sind veränderbar, zum Beispiel durch politische Entscheidungen und die Konsument:innen. Wenn der Druck von Bioenergie oder Papierindustrie nachlässt, würde das Potenziale für langlebige stoffliche Nutzungen schaffen.

Es spielt auch die Wahl der Vergleichsprodukte eine Schlüsselrolle. Vergleiche ich den Dachstuhl mit einem Betonflachdach, einem Dachstuhl aus Stahl oder gar keinem Haus. Dadurch kommt man zu vollkommen unterschiedlichen Aussagen, ob die Nutzung von Holz für einen Dachstuhl einen positiven Effekt hat. Dasselbe gilt für Bioenergie. Vergleiche ich einen Pelletsofen mit einer 20 Jahre alten Ölheizung sind die Ergebnisse anders, als wenn ich eine solarbetriebene Wärmepumpe für den Vergleich heranziehe. Für eine seriöse Berechnung ist es wichtig, einen realistischen Produktmix für die Gegenwart anzunehmen und Veränderungen in der Zukunft zu berücksichtigen.

5.7 Entwicklungsszenarien im Vergleich

Um die einzelnen Variablen miteinander in Verbindung zu setzen und eine zeitliche Dimension mitzubedenken, sind komplexe Modelle nötig. Hier ist eine Modellreduktion auf wesentliche Elemente des Systems erforderlich (Rüter, 2016).

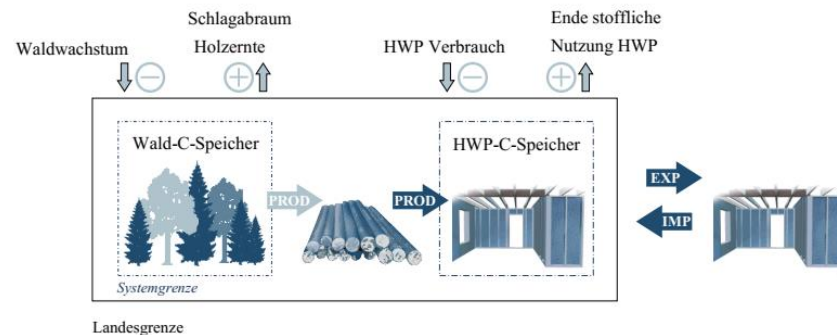


Abbildung 26: Exemplarische Darstellung des Stock-Change-Ansatzes

Anmerkung: ohne energetische Nutzung; HWP = Holzprodukte.

Quelle: Rüter (2016)

In Österreich wurden in den vergangenen 10 Jahren eine Reihe von unterschiedlichen Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen berechnet. In einer Metastudie wurden einzelne Schlüsselstudien hinsichtlich Vergleichbarkeit analysiert (Holzer and Hammer, 2016).

Die bedeutendste Studie der letzten Jahre stellt die 2020 publizierte CareforParis-Studie dar, die auf früheren Ergebnissen, wie dem Projekt KLIEN (BFW, 2015; Weiss et al., 2015) aufbaut.

Im Projekt KLIEN wurden unterschiedliche Waldbewirtschaftungskonzepte in fünf Szenarien miteinander verglichen (BFW, 2015). In der Studie werden auch die Anreicherung der Biomasse im Wald mit der Speicherung im Holzproduktepool und der stofflichen und energetischen Substitution (also der Ersatz von fossilen Energieträgern oder stofflichen Baumaterialien (Beton, Stahl, Aluminium) durch Holz) gegenübergestellt.

Wald, Waldbewirtschaftung und Klimawandel sind untrennbar miteinander verbunden. Um Klimaveränderungen und mögliche

Anpassungsstrategien für den Wald abschätzen zu können, wurden im Projekt CareforParis in Zusammenarbeit von BfW, BOKU, Wood K plus und dem Umweltbundesamt verschiedene Bewirtschaftungsszenarien und Entwicklungen bis ins Jahr 2150 untersucht (Weiss et al., 2020a, 2020b). Die Szenarien berücksichtigen dabei neben verschiedenen Klimawandelmodellen das System Wald sowie die damit verbundenen Auswirkungen auf den Holzproduktepool, sowie die energetische und stoffliche Substitution.

Wald, Waldbewirtschaftung und Klimawandel sind untrennbar miteinander verbunden. Um Klimaveränderungen und mögliche Anpassungsstrategien für den Wald abschätzen zu können, wurden im Projekt CareforParis in Zusammenarbeit vom Umweltbundesamt, BfW, BOKU, und Wood K plus verschiedene Bewirtschaftungsszenarien und Entwicklungen bis ins Jahr 2150 untersucht (Weiss et al., 2020a, 2020b). Die Szenarien berücksichtigen dabei neben verschiedenen Klimawandelmodellen das System Wald sowie die damit verbundenen Auswirkungen auf den Holzproduktepool, sowie die energetische und stoffliche Substitution.

Stimmen aus der Forschung: Zum systemischen Gesamtblick

Es ist wichtig, die Rolle des Waldes in der Klimathematik richtig abzubilden. Ich entziehe zwar den Rohstoff aus dem Wald, aber es ist ein regional nachwachsender CO₂-neutraler Rohstoff, sofern er aus nachhaltiger Bewirtschaftung kommt. Der Wald liefert den optimalen Rohstoff für den Aufbau von Kohlenstoffreservoirs außerhalb des Waldes. Damit können auch viele Rohstoffemissionen eingespart werden, weil die Vergleichsmaterialien oft wesentlich höhere CO₂-Fußabdrücke haben.

Es ist wichtig, das gesamte System zu betrachten. Man darf es nicht zu sektoral betrachten, muss die Wechselwirkungen quantifizieren, um negative Effekte zu vermeiden. Je nach Wechselspiel und Interaktionen im System kann es besser sein, dass der Rohstoff Holz gezielt eingesetzt wird, um Reservoirs aufzubauen oder auch den Vorrat im Wald zu erhöhen. In CareforParis zeigt sich, dass, wenn die Nutzung reduziert wird, es dennoch Rohstoffe/Ersatzstoffe braucht. Das würde die Nutzung fossiler Rohstoffe erhöhen. Das ist für Klimaschutz als auch für die ressourcenmäßige Transformation kontraproduktiv. Es muss uns aber gelingen, alle Elemente gleichzeitig zu steigern: den Zuwachs, den Vorrat, die Nutzung, die Holzprodukte und die Substitutionsleistung. Wenn wir diese Schrauben optimieren, haben wir die höchste Klimaschutzwirkung.

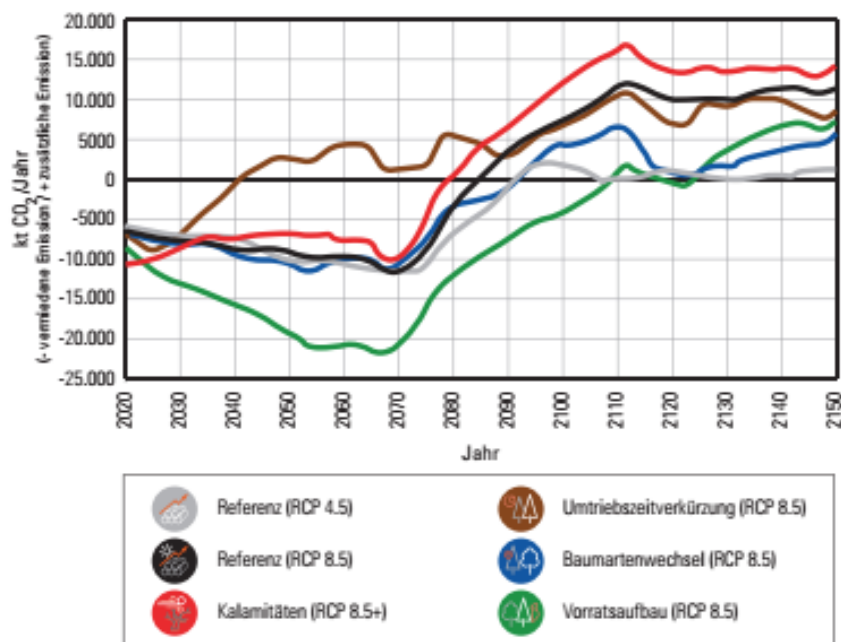


Abbildung 27: Jährliche Emission (+) oder Senke (-) durch Wald unter Berücksichtigung des Holzprodukt pools in den Szenarien

Quelle: Weiss et al. (2020a)

Als zentrale Anpassungsstrategien wurde eine Umtriebszeitverkürzung, ein Baumartenwechsel sowie ein moderater Vorratsaufbau im Wald näher untersucht und deren Auswirkungen auf die Kohlenstoffspeicherung ermittelt.

Dabei wurde im Szenario „Vorratsaufbau“ die beste Senkenwirkung erzielt, wenn man die Speicherung im Wald und in den Holzprodukten zusammenzählt. Allerdings wird dieser Effekt teilweise wieder reduziert, da die entfallenden Holzprodukte durch Nicht-Holz-Produkte im selben Ausmaß ersetzt werden müssten.

Die Wirkung der Szenarien verändern sich im Laufe der Zeit. Für das Jahr 2050, das für die Erreichung der Pariser Klimaziele relevant ist,

wurde eine näherungsweise Abschätzung des möglichen Beitrags ermittelt (Tabelle 6).

Tabelle 6: Kohlenstoffsinkenwirkung von drei Szenarien aus der CareforParis-Studie für das Jahr 2050

(Zahlen aus den Diagrammen entnommen und gerundet in kt CO₂/Jahr; Negative Zahlen = größerer Senkeneffekt, positive Zahlen = Treibhausgasquelle. (Weiss et al., 2020a))

	Ref 8.5	UZV	VRA
Näherungswerte für das Jahr 2050	Referenz-szenario	Umtriebszeit-verkürzung	Vorratsaufbau
Wald & Holzprodukt pool (Abbildung 27)	-9.000	2.000	-19.000
Stoffliche Substitutionseffekte (Abbildung 24)	-5.100	-7.000	-3.800
Energetische Substitutionseffekte (Abbildung 23)	-2.800	-3.600	-2.100
Summe aller drei Effekte	-16.900	-8.600	-24.900
Gesamtemissionen in Österreich 2019 (UBA, 2020)	79.8 Mt (79.800 kt)		
Anteil an den österr. Gesamtemissionen	21,2%	10.8 %	31,2 %

Vergleicht man den Summeneffekt von Kohlenstoffspeicherung im Wald und in Holzprodukten gemeinsam mit den energetischen und stofflichen Substitutionseffekten, so zeigt sich sehr klar, dass der Vorratsaufbau im Jahr 2050 den größten Kohlenstoffsinkeneffekt erreicht.

Während im Referenzszenario („Business as usual“) knapp 17 Mio. t CO₂ eingespart werden können, sind es im Szenario Vorratsaufbau knapp 25 Mio. t pro Jahr. Bei einer Intensivierung der forstlichen Nutzung sinkt der Senkeneffekt auf 8,6 Mio. t pro Jahr.

5.8 Potenzielle Gesprächspartner:innen und Expert:innen

- Dr. Hanns Kirchmeir, E.C.O. Institut für Ökologie
- Dr. Robert Jandl, Bundesforschungszentrum für Wald
- Dr. Peter Weiss, Umweltbundesamt
- Dr. Peter Schwarzbauer, Universität für Bodenkultur

6 ROLLE VON WALDÖKOSYSTEMEN IN ÖSTERREICH UND EUROPA HINSICHTLICH DER ERREICHUNG DER PARISER KLIMAZIELE

6.1 Kernbotschaften

- Europa ist zu 43,5 % von Wäldern bedeckt, Österreich sogar zu 48 %. Der Wald wird als natürlicher Verbündeter und wichtiges Element zur Erreichung der europäischen Klimaziele gesehen (EU-Waldstrategie 2021, S.1).
- Durch eine holzbasierte Bioökonomie, vor allem auf Basis langlebiger Holzprodukte und eine Stärkung der natürlichen Senkenwirkung des Waldes soll der Wald einen wesentlichen Beitrag zum Reduktionsziel von -310 Mio. t CO₂-Äquivalente der EU beitragen (EU-Waldstrategie 2021, S. 2).
- Rund 10 % der Waldökosysteme, vorrangig die rund 3 % existierenden Urwälder sowie weitere Naturwälder sollen als Beitrag zur EU-Biodiversitätsstrategie 2030 sowie als wesentliche Kohlenstoffsенke zur Erreichung der EU-Klimaziele streng geschützt werden.
- In der Erreichung der Ziele steht vor allem die Reduktion von Treibhausgasen in der Luft im Vordergrund. Wälder können Kohlenstoff unmittelbar aus der Luft binden und diesen in der Biomasse (lebend und tot) durch Mineralisierung in Humus und Boden speichern.
- Wenn die Maxime weniger CO₂ in der Atmosphäre gilt, stellt eine Nichtnutzung der Wälder eine unmittelbar mögliche temporäre Zwischenlösung dar, vor allem in der Phase der Umstellung der technologischen Infrastrukturen in der Energiebereitstellung (Solar-, Wind-, Wasserenergie, Speichersysteme).
- Wälder können nur auf begrenzte Zeit als zusätzliches Speicherpotenzial genutzt werden, weil in 50–100 Jahren eine biologisch bedingte Sättigung erreicht wird.
- Die Möglichkeit, einen Teil der Treibhausgasemissionen durch

die gesteigerte Kohlenstoffspeicherung im Wald zu kompensieren, soll den Ausstieg aus der Nutzung fossiler Brennstoffe nicht verlangsamen.

- Die Verbrennung von Holz bringt mehr CO₂ in die Atmosphäre als beispielsweise Erdgas. Vor diesem Hintergrund ist vor allem die Förderung von Biomassekraftwerken kritisch zu sehen. Biomassenutzung ist auf die Zeitspanne der nächsten 30 Jahre als nicht klimaneutral zu sehen, da die Bindung des durch die Verbrennung freigesetzten Kohlenstoffs weitaus länger dauert (Haberl, 2017; Körner, 2020).
- Die stoffliche Nutzung von Holz und ihre langfristige Verwendung gerade in Gebäuden leistet einen positiven Beitrag zur Kohlenstoffspeicherung. Allerdings können nur lebende Bäume Kohlenstoff aus der Atmosphäre absorbieren, und wir haben derzeit keine technischen Alternativen für diese Funktion (Haberl, 2017; Körner, 2020).

6.2 Der Wald und die Klimaziele

6.2.1 Das Pariser Klimaabkommen und seine Umsetzung

Das Pariser Übereinkommen (2015) ist ein völkerrechtlich verpflichtendes Abkommen (von Österreich bzw. der EU ratifiziert), das darauf abzielt, die globale Erderwärmung auf maximal 2 °C gegenüber vorindustriellen Werten zu begrenzen. Anstrengungen sollen unternommen werden, den Anstieg auf 1,5 °C zu begrenzen (Art. 2(1)a). Hierzu sollen die globalen Treibhausgasemissionen so bald wie möglich ihr Maximum erreichen und bis 2050 auf (netto) null gesenkt werden. Alle Staaten müssen ihre nationalen Beiträge (NDC) alle fünf Jahre vorlegen und umsetzen. Das Pariser Klimaabkommen wurde am 5.10.2016 von Österreich ratifiziert. Gemäß Art. 5 (1) sollen die Staaten aktiv Kohlenstoffsенken und Reservoirs sichern. Hierbei finden Wälder explizit Erwähnung (Art. 5(1), S. 6).

Neben der Emissionsreduktion wird seit dem Kyoto-Protokoll die Rolle der Landnutzung und der Wälder (LULUCF) betont. Weltweit waren Landnutzung und Wälder von 1990 bis 2010 eine Kohlenstoffquelle (1.3 ± 1.1 Gt CO₂ Äquivalente pro Jahr) (v. a. durch Versiegelung oder

Abholzung). Bis 2030 sollte LULUCF aber zu einer Kohlenstoffsénke werden und so einen beträchtlichen Teil zu den Pariser Klimazielen beitragen (Grassi et al., 2017).

Ontl et al. (2020) unterstreichen die Bedeutung des Waldes: Wälder stellen 68 % des Kohlenstoffpools der USA und 90 % der Sequestrierungskapazität des Landnutzungsbereichs dar.

6.3 Speichervolumen und Speicherleistung der heimischen Wälder

Österreich ist ein Waldland. Knapp 48 % bzw. 4,02 Mio. ha der Landesfläche sind mit Wald bedeckt. Seit 1961 nimmt die Waldfläche als auch der in den Wäldern vorhandene Gesamtvorrat beständig zu. Die Auswertung der österreichischen Waldinventur (Gschwantner 2019) gibt einen Gesamtvorrat von 1.173 Mio. Vorratsfestmeter im Wirtschaftswald an. Das ergibt einen durchschnittlichen Vorrat von 351 Vorratsfestmeter pro Hektar. Verglichen mit den Vorräten von Urwäldern weisen die bewirtschafteten Wälder ca. die Hälfte des Holzvolumens von Naturwäldern auf. Auch die CareforParis-Studie zeigt, dass mit einer stufenweisen Reduktion der Nutzung um 5–15 % im Wirtschaftswald ein potenzieller Vorrat von bis zu 560 Vfm/ha möglich wäre.

Die österreichische Waldinventur weist einen jährlichen Zuwachs von ca. 30 Mio. Vorratsfestmeter aus. Dem steht eine Holznutzung von 26,2 Mio. Vorratsfestmeter gegenüber und es akkumuliert daher nur ein geringer Teil (ca. 4 Mio. Vfm/a) des im Holz gebundenen Kohlenstoffs im Wald. Dieser Wert entspricht auch dem durchschnittlichen Vorratszuwachs, der in 9 Jahren von 2008 (1.135 Mio. Vfm) bis 2017 (1.173 Mio. Vfm) um 38 Mio. Vfm zugenommen hat.

Die Ursachen der Zuwachsleistung der heimischen Wälder sind aber schwierig zu beurteilen. Die bisherig hohen Speicherleistungen gehen vor allem auf Wiederaufforstungen nach dem Zweiten Weltkrieg, etwa von Fichtenaufforstungen auf Grenzertragsflächen oder durch Aufgabe der Streunutzung zurück (Thom et al., 2018). Dieser Effekt wurde durch Stickstoff- und Kohlenstoffdüngung aus der Luft beschleunigt. Zudem zeichnet sich ab, dass die Zuwachsleistungen bereits rückläufig sind, was mitunter auf die steigenden Holzerntemengen oder auch auf das

Alter der Bestände zurückzuführen ist, die ihre maximale Zuwachsleistung erreicht haben. Gleichzeitig basieren viele Modelle auf den sogenannten forstlichen Ertragstafeln, die die Ertragsfähigkeit und den Holzzuwachs für jeden Standort in Ertragsklassen einteilen. Jedoch ist diese forstliche Grundlage nicht unumstritten, da sie vor allem den Zuwachs im Alter stark unterschätzen (Eckmüllner, 2003; Senitza, 2017), auf der Standortproduktivität der 1960er und 70er basieren und damit Aspekte wie verlängerte Vegetationsperiode oder Kohlenstoff- bzw. Stickstoffdüngung nicht berücksichtigen.

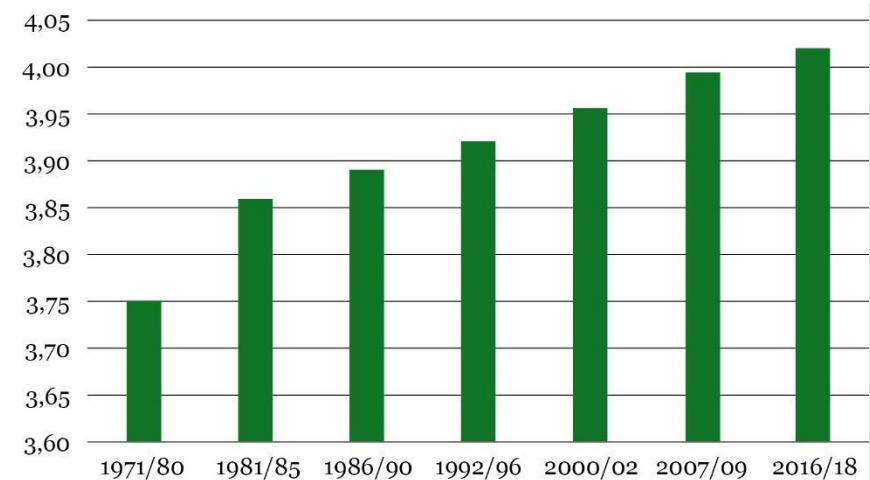


Abbildung 28: Zunahme der Waldfläche seit 1971 in Millionen Hektar

Quelle: verändert nach BFW (2018)

Auf 97 % der österreichischen Waldfläche wird oder wurde Holzbiomasse entzogen. Seit mehreren Jahrhunderten sammelt sich dadurch auch nur geringfügig Totholz in den Waldbeständen an. Das ist leicht nachvollziehbar, da durch die Altersklassenbewirtschaftung bei der Ernte fast der gesamte Holzvorrat entnommen wird und sich erst langsam über 100 Jahre ein neuer Waldbestand aufbaut. Nach dem Kahlschlag dauert es 10–20 Jahre, bis der Wald wieder zur Nettosenke wird (Knapp et al., 2021).

Betrachtet man die Kohlenstoffspeicherkapazität im Laufe der Zeit, spielt die jeweilige Altersklasse bzw. das Alter des Bestandes eine besondere

Rolle. Je nach Baumart erreichen die Bäume ihre maximale Zuwachsleistung meist im Alter von 50–90 Jahren, bevor sie wieder abnimmt. Hier zeigt die Auswertung der Waldinventur, dass sich ein großer Teil des Vorrats zunehmend in Richtung Hiebsreife bewegt, wodurch zukünftig womöglich mit einem Gesamtrückgang des laufenden Zuwachses zu rechnen sein könnte.

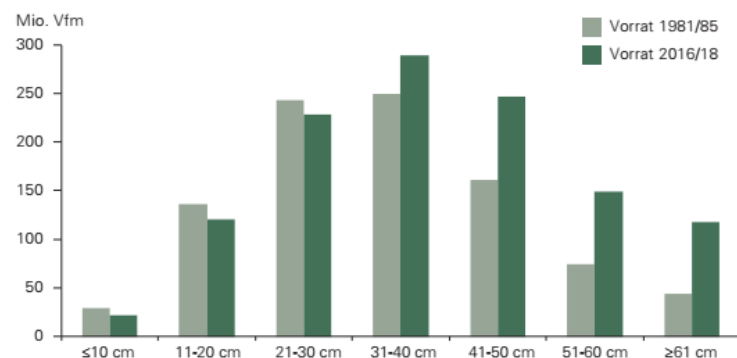


Abbildung 29: Vorrat im österreichischen Wald nach BHD-Klassen (Brusthöhendurchmesser)
Quelle: BFW (2018)

Seit den 1980er Jahren sinkt der Anteil von Nadelholz- und insbesondere Fichtenreinbeständen kontinuierlich, während der Anteil von Laub- und Mischwäldern steigt. Dennoch stellen Nadelwälder nach wie vor den am weitesten verbreiteten Waldtyp dar. Da die Speicherkapazitäten auch vom jeweiligen Waldtyp abhängen, kann zusätzlich auch die Zusammensetzung der Waldgesellschaften einen Einfluss auf das Speicherpotenzial haben.

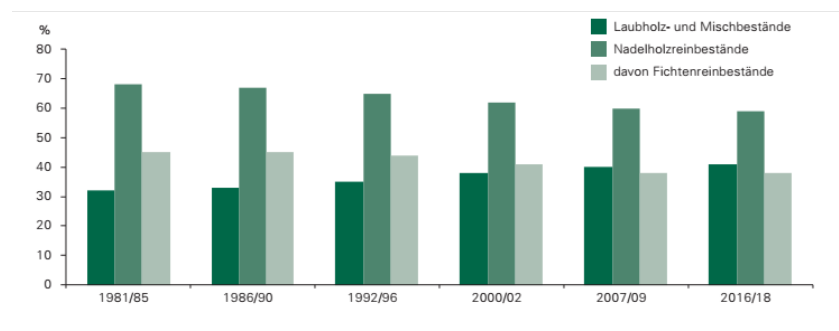


Abbildung 30: Anteil von Fichtenreinbeständen, Laub- und Mischwäldern und Nadelholzbeständen in Österreich
Quelle: BFW (2018)

Im Vergleich der Holzvorräte pro ha zeigt sich, dass die Vorräte in Österreich bereits vergleichsweise hoch, im benachbarten Bayern oder der Schweiz aber noch höher sind.

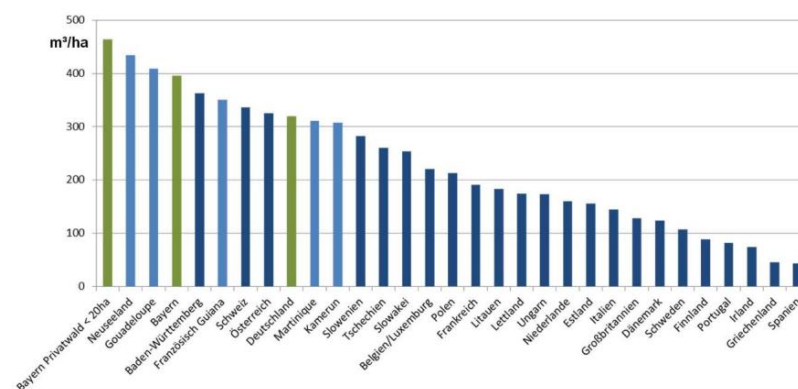


Abbildung 31: Österreichische Holzvorräte/ha im globalen Vergleich
Quelle: Röder (2017)

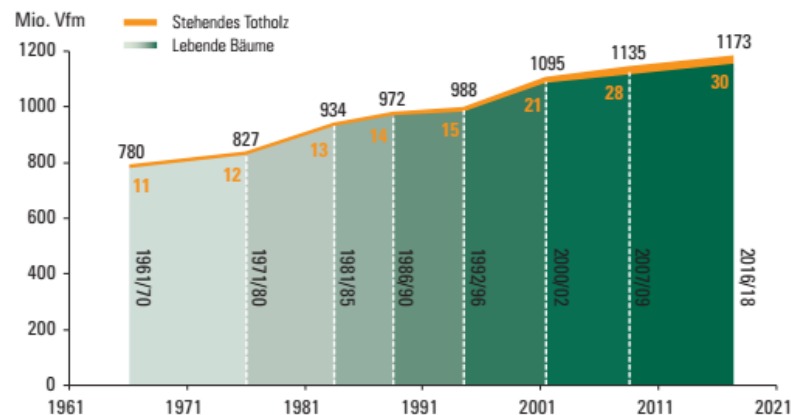


Abbildung 32: Vorratsentwicklung im österreichischen Wald seit den 1960er Jahren
Quelle: BFW (2018)

Derzeitige Nutzung

In Österreich werden derzeit zwischen knapp 76 % und 100 % des jährlichen Zuwachses genutzt (Abbildung 33). Dabei gilt es zu bedenken, dass die jährliche Nutzung sehr stark – vor allem je nach Auftreten von größeren Schadereignissen – variiert. So folgen Jahren mit hohem Schadholzanteil mit erhöhter Nutzung Jahre mit deutlich geringerer Nutzung. Die Österreichische Forstinventur dokumentiert für die Erhebungsperiode 2016/2018, dass ca. 88 % des Zuwachses durch forstliche Nutzungen entnommen werden (Gschwantner, 2019). Gegenüber der vorangegangenen Inventurperiode 2007–2009 bedeutet das einen Anstieg der Nutzungsintensität um 3 %. Dies zeigt auch das limitierte Steigerungspotenzial auf, insbesondere wenn man bedenkt, dass ein beträchtlicher Teil des Zuwachses auf Zuwächse im Kleinwald und unzugängliche oder schwer bringbare Lagen zurückgeht.

Eigentumsart	2000 - 2009			2007 - 2018		
	Zuwachs	Nutzung	Nutzungs- prozent (%)	Zuwachs	Nutzung	Nutzungs- prozent (%)
	Mio. Vfm/Jahr			Mio. Vfm/Jahr		
Kleinwald bis 200 ha	19,4	14,3	73,7	19,0	16,2	85,4
Betriebe über 200 ha	7,8	8,1	103,4	7,5	7,5	100,2
Österr. Bundesforste	3,2	3,5	110,8	3,3	2,5	75,6
Gesamt	30,4	25,9	85,2	29,7	26,2	88,0

Abbildung 33: Anteil des Zuwachses und der jeweiligen Nutzung nach Eigentumsart
Quelle: BFW (2018)

Zusammenfassend lässt sich Folgendes feststellen:

- Der Vorrat von derzeit 351 Vfm/ha könnte durch eine Nutzungsreduktion und gezielten Vorratsaufbau weiter erhöht werden. Auch die CareforParis-Studie modellierte eine mögliche Steigerung auf bis zu 560 Vfm/ha (Weiss et al., 2020b).
- Derzeit werden bereits 88 % des laufenden Zuwachses genutzt. Es besteht also nur sehr begrenztes Potenzial zusätzliches Holz für Substitution und den Holzprodukt pool bereitzustellen.
- Die Verschiebung in Richtung Laub- und Mischwaldbestände sowie der relativ große Vorrat in den heute zuwachsstarken Altersklassen können auf ein verringertes Kohlenstoffspeicherungspotenzial in Zukunft hinweisen.
- Der hohe Schadholzanteil der letzten Jahre könnte darauf hinweisen, dass mögliche Vorratsaufbauziele durch Kalamitäten unterminiert werden könnten.

6.4 Potenziale und Dimensionen zur Optimierung der Senkenwirkung des Waldes

Um das Potenzial des Waldes und dessen aktiven Beitrag (abseits indirekter Beiträge wie Albedo, Kühleffekte etc.) zu den Klimazielen zu beschreiben, gibt es im Wesentlichen nur drei Optionen:

- Vorratsaufbau im Wald
- Vergrößerung des Holzprodukt pools

- Energetische und stoffliche Substitution fossiler Energieträger

Für ein optimales Senkenmanagement gilt es einen ausgewogenen, breit akzeptierten Mix zu definieren, da diese drei Optionen untrennbar miteinander verwoben sind und interagieren. Während in der gesellschaftlichen und politischen Debatte diese drei Optionen grundsätzlich akzeptiert sind, herrschen über deren Gewichtung unterschiedliche Meinungen.

Der Vorratsaufbau im Wald kann netto den größten Effekt erzielen, da Totholz im Wald auch gespeicherter Kohlenstoff ist und durch den Zuwachs der nächsten Jahrzehnte große Mengen unmittelbar gebunden werden, während die durch Nutzungen entstehenden Schlagflächen vorerst für 10-20 Jahre eine Netto-Kohlenstoffquelle darstellen (Knapp et al. 2020) und die Erreichung der Klimaziele bis 2050 erschweren. Auch die EU-Waldstrategie weist darauf hin, dass nur durch Produktsubstitution die Klimaziele nicht erreicht werden können (EC 2021).

Die im Indikatorenset des Österreichischen Walddialogs (Linser, 2017) für die Österreichischen Waldstrategie 2020+ angeführten 691 kt CO₂-eq pro Jahr entsprechen etwa der Kohlenstoffmenge, die durch die Waldfläche des Bezirkes Spittal an der Drau (Kärnten) in einem Jahr aus der Atmosphäre gebunden und in Holz gespeichert wird. Nur zu dieser minimalen jährlichen Steigerung des Holzvorrats hat sich Österreich im Kyoto-Protokoll verpflichtet. Da der Wert so niedrig ist, kann er trotz des ständigen Sinkens der Vorratssteigerungsquote (Abbildung 32) noch immer um das 10-fache überschritten werden.

Im Folgenden werden, basierend auf den Ergebnissen der CareforParis-Studie (Weiss et al., 2020b) im Groben die einzelnen Potenziale in Bezug auf die nationalen Gesamtemissionen und den in den Pariser Klimazielen definierten Zielraum 2050 beleuchtet. Dadurch sollen die Potenziale der einzelnen Optionen anschaulich quantifiziert dargestellt werden.

Wie die Zahlen aus der CareforParis-Studie zeigen (siehe Tabelle 6), zeigt das Vorratsaufbauszenario den mit Abstand höchsten Beitrag zur Klimazielerreichung bis zum Jahr 2050.

Im Vergleich zum Szenario „Business as usual“ (RCP 8,5) kann das Vorratsaufbauszenario pro Jahr bis 2050 um 4 Mio. t CO₂ mehr

aufnehmen. Das würde 5 % des jährlichen Treibhausgasausstoßes entsprechen. Im Vergleich zu einem Szenario „Umtriebszeitverkürzung“ beträgt der Unterschied sogar 8 Mio. t CO₂/Jahr.

Dabei sind in diesem Szenario nur moderate Nutzungsreduktionen hinterlegt. Die Schutzgebietsfläche mit Nutzungsverzicht wird im Szenario von derzeit 1,2 % schrittweise auf 5 % erhöht und würde damit noch deutlich unter den Zielen der Europäischen Biodiversitätsstrategie (10 % strenger Schutz, 30 % Schutzgebiete mit klaren Naturschutzzielen) liegen. Die Nutzungsreduktion im Vergleich zum Status Quo würde im Wirtschaftswald zuerst 5 % betragen und würde dann schrittweise auf 10 % und 15 % gesteigert (Weiss et al. 2020).

Würde theoretisch die Nutzungsreduktion noch deutlicher von derzeitig 88 % auf 50 % des Gesamtzuwachses erfolgen, könnte die Anreicherungsphase von Kohlenstoff im Wald, gerechnet auf eine Periode von 80–100 Jahren, jährlich ca. 13 Mio. t CO₂-eq in Waldökosystemen binden, bis die Speicherkapazitäten im Wald erreicht wären und der Vorrat von den derzeit 351 Vfm/ha Werte von 500–700 Vfm erreicht hat, wie wir sie in Naturwäldern finden (vgl. Tabelle 2 auf Seite 44). Das entspricht immerhin in etwa 16 % der jährlichen österreichischen Treibhausgasemission. Eine Anreicherung der Holzvorräte im Wald hätte zudem auch einen sehr positiven Effekt auf die Biodiversität.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es für die Netto-Treibhausgasbilanz - solange die Kapazitäten der Österreichischen Wälder zur Aufnahme von CO₂ nicht erschöpft sind - wesentlich effektiver ist, das Holz und damit den Kohlenstoff im Wald zu belassen, als (vor allem energetische) Substitutionseffekte zu generieren. Die bioenergetische Nutzung sollte sich daher maßgeblich auf eine kaskadische Verwertung von Säge-, Holz- oder Ernteabfällen, die nicht stofflich anderweitig genutzt werden können, konzentrieren. Der Ausstieg aus den fossilen Energieträgern ist extrem wichtig, sollte aber vor allem durch Effizienzsteigerungen und Bereitstellung anderer kohlenstoffarmer Energiequellen wie Sonnen- oder Windenergie prioritär verfolgt werden und nicht einfach durch Ersatz mit Holzbiomasse erreicht werden.

Stimmen aus der Forschung: Zum Vorratsaufbau im Wald

Um die Frage zu beantworten, wie lange es dauert, bis ein Wald seinen maximalen Vorrat erreicht, sind vor allem der Zuwachs, die Mortalität und die Zersetzungsraten von Totholz wichtig. Ohne verlässliche Informationen dazu ist eine informierte Aussage schwierig. In Bezug auf Totholz und dessen Zersetzung in Österreich wissen wir nach wie vor sehr wenig.

Ein zentraler Punkt in Österreich sind Störungen, vor allem, ob es sich um ein Waldökosystem mit natürlichen großflächigen Störungen handelt oder nicht. Es gibt Ökosysteme, die sind relativ stabil und weisen nur kleinflächige kleine Störungen auf (wie beispielsweise gemischte Wälder wie der Rothwald). Andere weisen großflächige Störungen auf (wie beispielsweise die fichtendominierten Wälder im Böhmerwald).

Je nach Ökosystem und dessen Störungsregime ergeben sich unterschiedliche Gleichgewichtszustände, eine unterschiedliche Zeit bis zum Erreichen des maximalen Vorrats und damit unterschiedliche Kohlenstoffbilanzen.

Stimmen aus der Forschung: Zum Senkenpotenzial

Gemäß unseren Simulationen schätzen wir für den Nationalpark Kalkalpen, dass es rund 70–100 Jahre bis zur Ausschöpfung des Senkenpotenzials dauert. Würden wir alle Wälder stilllegen, wäre das Senkenpotenzial in Österreich wohl in ca. 100 Jahren weitgehend ausgeschöpft. Hierbei muss man die Einflüsse von Störungen und Klimawandel berücksichtigen, die das Senkenpotenzial gefährden können. Ob die Kohlenstoffspeicherung bei Wäldern in späteren Entwicklungsphasen anhält, bleibt ungewiss. Wir haben nur punktuelle Informationen, denn nur wenige Wälder sind tatsächlich so alt. Hier ist auch von Bedeutung, dass Waldgesellschaften unterschiedlich viel Kohlenstoff speichern. So speichern Eichen-Hainbuchenwälder wesentlich weniger Kohlenstoff als Fichten-Tannen-Buchenwälder.

In Wirtschaftswäldern spielt auch der Faktor (Umtriebs)Zeit eine große Rolle. Eine Fichtenmonokultur ist in den ersten Jahrzehnten nach Kahlschlag eine Quelle aufgrund von Zersetzungsprozessen, allerdings folgt danach eine maximale Sequestrierungsleistung für ein paar Jahrzehnte, die in den letzten Jahrzehnten der Umtriebszeit wieder abnimmt. Es gibt wenig Informationen, ob in einem Dauerwald nach 100 Jahren mehr sequestriert wird als in einer Fichtenmonokultur. Vermutlich würde es im Endeffekt ohne den Einfluss von Störungen ähnlich aussehen.

6.5 Potenzielle Gesprächspartner:innen und Expert:innen

- Dr. Hanns Kirchmeir, E.C.O. Institut für Ökologie (Vorratsaufbau)
- Mag. Karin Enzenhofer, WWF (Vorratsaufbau)
- Dr. Robert Jandl, BFW (CareforParis; Waldforschung)
- Dr. Peter Weiss, Umweltbundesamt (CareforParis, Szenarienmodellierung, Kohlenstoffbilanzierung)
- Dr. Rudolf Freidhager, Österreichische Bundesforste (Umsetzungsmöglichkeiten auf der Fläche; Nutzung)
- DI Felix Montecuccoli, Land & Forstbetriebe Österreich (Perspektive der Waldbesitzer:innen)

7 AUSWIRKUNG DES KLIMAWANDELS AUF DEN WALD, WALDTYPISCHE BIODIVERSITÄT UND KOHLENSTOFFSPEICHERUNG

7.1 Kernbotschaften

- Durch den Klimawandel ändern sich die Rahmenbedingungen für Waldwachstum und Waldbewirtschaftung rapide.
- Änderungen in Temperatur und Niederschlag führen zu Hitze- und Trockenstress sowie zu Massenvermehrungen von Insekten, Waldbränden und setzen vor allem nicht-standortgerechte Wälder und geschwächte Waldökosysteme zusätzlich unter Druck.
- Die wirtschaftliche derzeit bedeutendste Baumart Fichte ist wenig trocken- und hitzetolerant.
- Windwürfe durch Stürme treffen vor allem gleichaltrige Bestände (Altersklassenwald) und Wirtschaftswälder ab einem Alter von 90 Jahren.
- Der Klimawandel stellt gängige Vorstellungen der Waldbewirtschaftung basierend auf Erfahrungen der Vergangenheit in Frage, da sich Wuchs- und Standortbedingungen ändern. Die Auswirkungen und Dynamiken sind vor allem bei einer Erwärmung über 1,5 °C noch unklar.

7.2 Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald

Durch den Klimawandel ändern sich die Rahmenbedingungen für den Wald und die Waldbewirtschaftung rapide. Vor allem höhere Temperaturen, Trockenperioden etwa im Osten Österreichs, Stürme, und Massenvermehrungen von Insekten setzen die heimischen Wälder und die vielen Waldbesitzer:innen unter Druck (Niedermair et al., 2007; B.M.L.R.T., 2021). Dies ist bereits großflächig sichtbar: Waldbewirtschaftler beklagen regelmäßig riesige Schadholzmengen

aufgrund von Windwurf, Borkenkäfer und Waldbränden. Dies ist aber nicht nur auf den Klimawandel zurückzuführen. Vielmehr werden durch den Klimawandel auch Bewirtschaftungsfehler der Vergangenheit unmittelbar sichtbar (etwa Fichtenaufforstungen im Tiefwald, Altersklassenwälder, Monokulturen, ungünstiger struktureller Aufbau der Wälder). Dies ist besonders gut im Waldviertel sichtbar, wo in den letzten Jahren fast 50 % des Schadholzanteils aufgrund von Borkenkäferkalamitäten auftrat (Hoch and Perny, 2019).

Künftig wird mit zunehmenden Schadereignissen wie Trockenperioden, Stürmen, Waldbränden sowie steigenden Borkäferschäden in Europa (Seidl et al., 2017) und in Österreich (Markart et al., 2017; Thom et al., 2017) gerechnet.

Da sich die Baumartenzusammensetzung und die Altersstruktur nur langfristig ändern lässt, sind die Anpassungsmöglichkeiten an den Klimawandel nur sehr eingeschränkt bzw. langfristig möglich. Während die Landwirtschaft sehr kurzfristig angebaute Arten und Sorten wechseln kann oder die Bewirtschaftungsmethode (Mahdfrequenz, Erntezeitpunkt, Bewässerung u.a.) an die Klimasituation anpassen kann, sind Änderungen im Wald nur über mehrere Jahrzehnte hinweg möglich.

Zusammenfassend werden folgende Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald gelistet:

- Höhere Temperaturen und damit eine Verlängerung der Vegetationsperiode sowie Stickstoff- und Kohlenstoffdüngung aus der Luft erhöhen die Wachstumsleistung von Wäldern und erhöhen so die Senkenwirkung des Waldes (Keenan et al., 2014; Keenan and Williams, 2018; Ols et al., 2019; Pretzsch et al., 2014).
- Durch den Klimawandel ist verstärkt mit Störungen (v.a. Borkenkäfer, Wind) zu rechnen (Seidl et al., 2017; Thom et al., 2017). Dadurch kann die Vitalität der Bestände und damit die CO₂-Aufnahme aus der Atmosphäre kurzfristig vermindert werden und so die Senkenwirkung innerhalb kurzer Zeit reduziert werden. Vor allem auf Brandflächen kann es zur kurzfristigen Freisetzung von gebundenem Kohlenstoff kommen (Seidl et al., 2017; Thom et al., 2017).
- Die sich in den Tieflagen verschlechternden Wuchsbedingungen für die Brotbaumart Fichte und ihre Exposition gegenüber

Borkenkäferkalamitäten führen zu geringeren Zuwächsen (Hoch et al., 2016; Thom et al., 2017) und die Fichte gerät bis in Mittelgebirgslagen stark unter Druck.

- Störungsereignisse können zu einer höheren Diversität der Waldstrukturen führen und so Wälder anpassungsfähiger machen (Thom et al., 2018).
- Durch den Klimawandel könnten sich durch sehr hohe Temperaturen bei gleichzeitiger Niederschlagsreduktion weniger biomassereiche Waldtypen etablieren und so die Fähigkeit des Waldes zur Kohlenstoffspeicherung reduzieren (Thom et al., 2018).
- In Gebieten mit zunehmender Trockenheit im Osten Österreichs werden trockenheitstolerante Baumarten wie z. B. Eichenarten stark an Bedeutung gewinnen, um die erwünschten Waldfunktionen dauerhaft sicherstellen zu können (Niedermair et al., 2007). In diesen Gebieten ist von einem generellen Ansteigen der Klimastressbelastung für den Wald auszugehen.
- Störungen durch Schadorganismen werden generell ein zunehmendes Problem für die nachhaltige Waldbewirtschaftung darstellen (Seidl et al., 2009). Zudem werden durch die Globalisierung immer wieder neue Schadorganismen wie Pilze und Insekten eingeführt.
- Größere Störungen könnten die Schutzwirksamkeit der Bergwälder gegenüber Naturgefahren beeinflussen (Seidl et al., 2009). Insbesondere wenn Windwürfe und Borkenkäferkalamitäten wie bisher rasch aufgearbeitet werden, verliert der Bestand an Schutzwirkung gegen Steinschlag und Lawinen. Um unter neuen Rahmenbedingungen die Funktion der Schutzwälder aufrecht erhalten zu können, müsste die Bewirtschaftung neu gedacht werden. Auf der Fläche verbleibendes Totholz bietet etwa nach großflächigen Störungsereignissen einen konsequenten Schutz vor Muren, Lawinen, Steinschlag und Hochwässern und schützt zudem Naturverjüngung.
- Klimabedingte Einschränkungen im Gebirge werden für viele Baumarten durch den Klimawandel aber auch reduziert. Dadurch wird die Anzahl der potenziell geeigneten Baumarten für den Gebirgswald vergrößert.
- Im Gebirge wird es zu einem Ansteigen der klimabedingten

Waldgrenze kommen (Thom et al., 2018).

Durch diese Auswirkungen und damit verbundene Anpassungsmaßnahmen wie Baumartenwechsel, Störungen, Änderungen im Zuwachs kann sich auch die nachhaltig verfügbare Holzmenge (in Art, Qualität, Sortiment) ändern. Dadurch wird sich auch der Beitrag des Waldes und seiner Holzprodukte zur österreichischen Treibhausbilanz ändern (BFW, 2020). Vor allem Wälder an Standorten mit knapper Wasserversorgung im Osten Österreichs werden zunehmend unter Druck kommen (Jandl et al., 2017). Die heutigen Problemregionen sowie das Mühlviertel, das Klagenfurter Becken, das Grazer Becken oder die östlichen Randalpen werden voraussichtlich größer. Die durchschnittliche Verdunstungsrate hat sich in diesen Regionen aufgrund von Temperaturerhöhungen bereits um rund 70 mm in den letzten 30 Jahren erhöht (Blöschl et al., 2018). Durch die Klimaveränderung werden zusätzlich das Nährstoffangebot und die Wasserspeicherkapazität im Boden (Nutzbare Feldkapazität) beeinflusst, was insbesondere in Tieflagen massiven Trockenstress verursachen kann.

Auch wenn höhere Temperaturen, sofern das Wasserangebot ausreichend ist, zu schnellerem Wachstum führen, begünstigt dies gleichzeitig Massenvermehrungen von (Schad)Insekten (Hoch et al., 2016). Zudem wird durch höhere Temperaturen die Mikroorganismenaktivität im Boden angeregt, wodurch Wälder zwar schneller wachsen, gleichzeitig aber auch mehr Kohlenstoff durch Bodenorganismen freigesetzt wird, die organischen Kohlenstoff im Humus oder Boden durch Veratmung abbauen. So wurde im Laborversuch beobachtet, dass bei einer Erwärmung von 4 °C der Bodenkohlenstoff auf Karbonatböden um ca. 1t/ha und Jahr abnimmt (Robert Jandl et al., 2015; Schindlbacher et al., 2011).

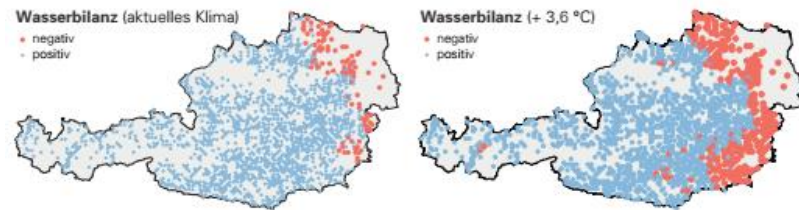


Abbildung 34: Klimatische Wasserbilanz im österreichischen Wald im aktuellen Klima (links) und bei einer Erwärmung um 3,6 Grad Celsius (rechts)

Quelle: Jandl et al. (2017)

Das Jahr 2018 war ein Extremjahr in Mitteleuropa mit dem extremsten Sommer seit 500 Jahren. Neben extremer Trockenheit war die Durchschnittstemperatur um 3,3 °C zu hoch. Dies hatte massive Auswirkungen auf die mitteleuropäischen Wälder und gibt einen kleinen Ausblick darauf, wie sich Waldökosysteme in extremeren Klimawandelszenarien verhalten könnten. Schuldt et al. (2020) analysierten die Auswirkungen auf den Wald und auch wie sich dieser 2019 wieder erholte. Dabei wurde vor allem frühzeitiger Laubfall bei der Buche sowie Nadelverfärbungen bei Fichte und Kiefer beobachtet, das zu großflächigen Absterben von Einzelbäumen, Baumgruppen aber auch ganzen Beständen führte. Während eine erhöhte Mortalität von der Fichte erwartet wurde, wurden aber vor allem die Buche, Kiefer, Weißtanne sowie Eichen beträchtlich in Mitleidenschaft gezogen.

Gemäß den meisten Klimaszenarien wird in Österreich in Zukunft verstärkt mit Dürreperioden und Hitzetagen im Sommer kombiniert mit Extremniederschlägen bei gleichzeitig weniger Frosttagen im Winter zu rechnen sein (ZAMG, 2021, 2015). Dies wird den Wald und die Forstwirtschaft massiv beeinflussen.

7.2.1 Zuwachs und Artenzusammensetzung

Durch eine Änderung in den klimatischen Umweltbedingungen werden Standorteigenschaften und Vegetationsdynamik stark beeinflusst. Konkurrenzverhältnisse der Baumarten untereinander können sich verschieben, Baumarten an gewissen Standorten nicht mehr konkurrenzfähig sein.

Lexner und Seidl (2007) modellierten Auswirkungen des Klimawandels auf den österreichischen Wald und mögliche Verschiebungen anhand der potenziell natürlichen Waldgesellschaft (PNWG), also der Waldtypen, die an Standorten natürlich vorkommen (würden). Die Studie zeigt, dass sich die PNWG ab einer Temperaturerhöhung von 2 °C und einer Abnahme der Sommerniederschläge um 15 % auf fast 78 % der Fläche verändern würde. Die Modelle weisen darauf hin, dass artenreiche Laubwaldtypen ihr potenzielles Verbreitungsgebiet vergrößern werden (Kienast et al., 1998; Thrippleton et al., 2020). Wenn an mehr als 120 Tagen pro Jahr eine Mitteltemperatur von 10 °C überschritten wird, haben Laubbäume (bei ausreichender Wasserversorgung) einen ökophysiologischen Vorteil gegenüber Nadelbäumen und sind konkurrenzfähiger. Dies spielt vor allem in fichtendominierten Lagen eine Rolle und wird vermutlich zu einer deutlichen Erhöhung des Laubwaldanteils in Höhenlagen über 1.000 m Seehöhe führen (Kromp-Kolb et al., 2014). Voraussichtlich werden weite Gebiete Oberösterreichs, Niederösterreichs, der Steiermark und des Burgenlandes für die Fichte weitestgehend ungeeignet (Kromp-Kolb et al., 2014).

Seit 1870 in Mitteleuropa ist der Vorratzzuwachs im Wald konstant gestiegen. Im Vergleich zwischen 1960 und 2000 beschleunigten Buche und Fichte ihr Wachstum um rund 32 % – 77 % und der Volumenzuwachs stieg um rund 6–7 % (Pretzsch et al., 2014).

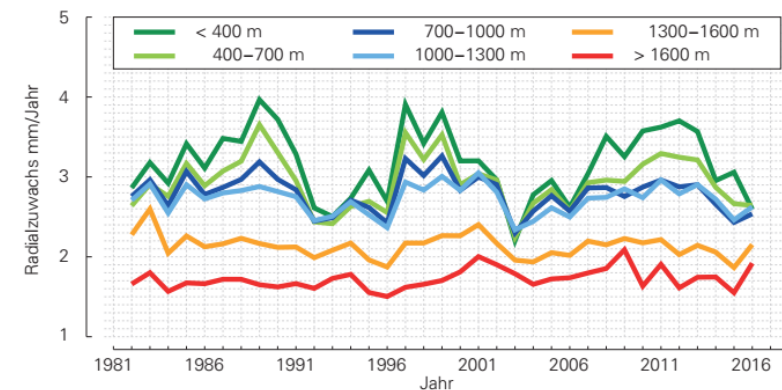


Abbildung 35: Zuwachsentwicklung der Fichte in unterschiedlichen Höhenlagen
Quelle: (Ols et al., 2019)

Allerdings zeigen die Ergebnisse der Waldinventur 2016/18, dass sich etwa bei der Fichte dieser Trend vor allem in Lagen unter 700 m nach unten zeigt (Abbildung 35).

Unabhängig von den verschiedenen in der CareforParis-Studie diskutierten Entwicklungsszenarien wird langfristig mit einer Verringerung des mittleren jährlichen Zuwachses pro Hektar Waldfläche gerechnet. Dies berücksichtigt das derzeitige Alter der Bestände, einen Rückgang der Stickstoffdüngungseffekte und eine Änderung der Standortbedingungen. Interessant ist, dass in der CareforParis-Studie davon ausgegangen wird, dass bei einer Reduktion der forstlichen Holzentnahme (Szenario VAU – Vorratsaufbau) der durchschnittliche Zuwachs (und damit die Bindung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre in Holz) höher ist als in allen anderen angenommenen Szenarien (siehe Abbildung 36).

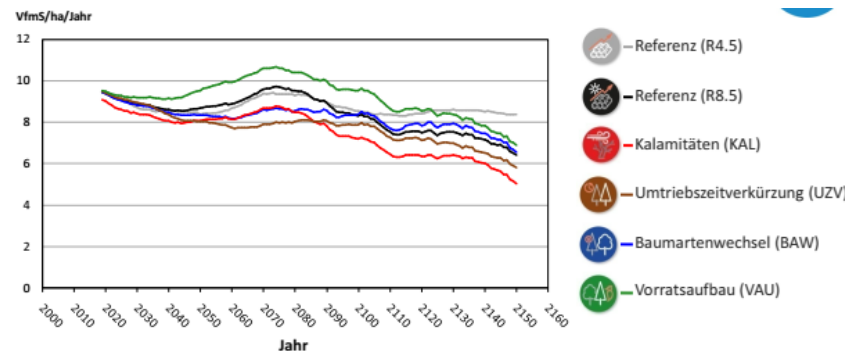


Abbildung 36: Erwartete Veränderungen des jährlichen Zuwachses
Quelle: Weiss et al. (2020b)

Während die Buchen- und Eichenwaldgesellschaften als klarer Gewinner hervorgehen würden, zeigt dies auch klar, dass die österreichische Hauptbaumart Fichte stark unter Druck gerät, vor allem dort, wo die Fichte nicht standortgerecht ist oder in Zukunft nicht mehr standortgerecht sein wird. Dies würde auch bedeuten, dass die Zuwachseleistungen von derzeit auf Buchen- und Eichenstandorten wachsenden Fichten vermehrt Störungen ausgesetzt werden und der Zuwachs (und damit das C-Speicherpotenzial) massiv verringert wird.

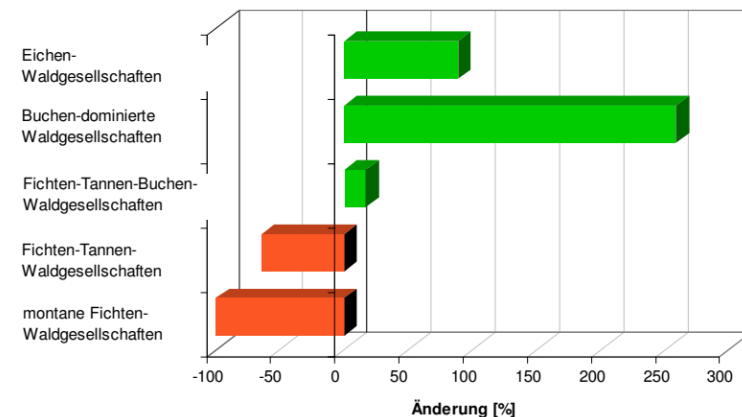


Abbildung 37: Relative Veränderung potenziell natürlicher Waldtypen unter einem Klimaänderungsszenario
Quelle: Lexer 2001 in Lexer und Seidl (2007)

Hauptproblem der Fichte ist nicht die abnehmende Produktivität, sondern ihre extreme Kalamitätsanfälligkeit (Lexer and Seidl, 2007).

Laubbaumarten profitieren durch längere Vegetationsperiode mit höheren Zuwächsen, während etwa die Fichte durch zunehmenden Stress (Trockenheit und Borkenkäfer) unter Druck gerät.

Durch Eintrag von Nährstoffen über die Luft (CO₂-Düngung und Stickstoffdüngung) kann das Baumwachstum sogar zeitlich begrenzt beschleunigt werden (Keenan and Williams, 2018). Jedoch stellt sich auch hier nach einer gewissen Zeit ein Gleichgewicht ein. Seidl et al. (2017) sehen den Höhepunkt der Stickstoffdüngung in den 1980er Jahren und eine Stabilisierung ab dem Jahr 2000. Die Bäume passen sich an und zeigen keinen verstärkten Zuwachs mehr (Körner and Bader, 2010). Allerdings könnte dies auch ein temporärer Ausgleichseffekt zu früheren Störungen (und Biomasseentnahmen) sein (Erb, 2004; Loudermilk et al., 2013; Thom et al., 2018).

In Gebirgslagen wird mit erhöhter Biomasseproduktivität durch höhere Temperaturen und damit verbunden längeren Vegetationsperioden gerechnet. Bereits der Hitzesommer 2003 zeigte, dass Hochlagen im Zuwachs profitieren, aber in Mittel- und Tieflagen aufgrund von Hitze-

und Trockenstress Wachstumsrückgänge auftraten (Jolly et al. 2005 in (Kromp-Kolb et al., 2014)). Da durch erhöhte Temperaturen auch mehr Wasser durch Evapotranspiration verdunstet, steigt gleichzeitig das Risiko von Trockenstress, wenn zu höheren Temperaturen auch gleichbleibende oder rückläufige Niederschlagsmengen hinzukommen (Rebetez, Dobertin 2004, in (Kromp-Kolb et al., 2014)). Studien stellten aber ebenso fest, dass es bei der Biomasseproduktion von Ökosystemen ein Maximum gibt: Das Brutto-Photosyntheseoptimum liegt bei unter 30 °C. Darüber stellen die meisten europäischen Baumarten ihr Wachstum ein (Kromp-Kolb et al., 2014). Mittelfristig wird flächendeckend in Österreich eher mit einem Rückgang des Zuwachses gerechnet (Kromp-Kolb et al., 2014; Weiss et al., 2020b).

In einer globalen, viel zitierten Studie über Temperatur- und Trockenstress und die Auswirkungen auf das Waldwachstum wird mit einer deutlich höheren Ausfallrate und damit verbunden einer weltweiten Etablierung neuer, lichter Waldökosysteme mit geringerer Biomasse gerechnet (Allen et al., 2015). Neue Waldtypen mit geringerem Kohlenstoff-Speicherpotenzial könnten sich zukünftig auch in Österreich etablieren (Hypothese basierend auf den Interviews).

Im Klimawandel, insbesondere unter erhöhten Temperaturen und Trockenstress ist eine erhöhte – und bislang unterschätzte – Sterblichkeitsrate unter Bäumen zu erwarten (Allen et al., 2015). Dies könnte daran liegen, dass unter erst verbesserten Wuchsbedingungen (z. B. längere Vegetationsperiode) Wälder verstärkt in Zuwachs (Primärmetabolismus) investieren, aber wenig Reserven (Sekundärmetabolismus) anlegen, die essenziell für den Umgang mit Störungen bzw. Stress sind. Auch derzeit sind im Wald Bäume auf Standorten mit hoher Bonität anfälliger für Störungen als Bäume auf mittleren Standorten. Jüngere Wälder scheinen dabei ebenfalls anfälliger gegenüber klimabedingten Störungen zu sein als alte Wälder (Thom et al., 2019). Franklin et al. (2002) und Fritz et al. (2009) weisen darauf hin, dass Wälder mit alten Bäumen eher die Fähigkeit aufweisen, ein günstiges Mikroklima aufrecht zu erhalten als junge gleichaltrige

Bestände. Das weist darauf hin, dass zur Erzielung resilienter Wälder ein hoher Altholzanteil vorteilhaft ist. Getrieben durch großflächige Windwürfe, Hitze- und Trockenheitswellen und Borkenkäfer wird diese Verschiebung bereits sichtbar und wird bereits in den Bestockungszielen⁶ und Wiederaufforstungen etwa der Österreichischen Bundesforste oder der Bayerischen Landesforste sichtbar.

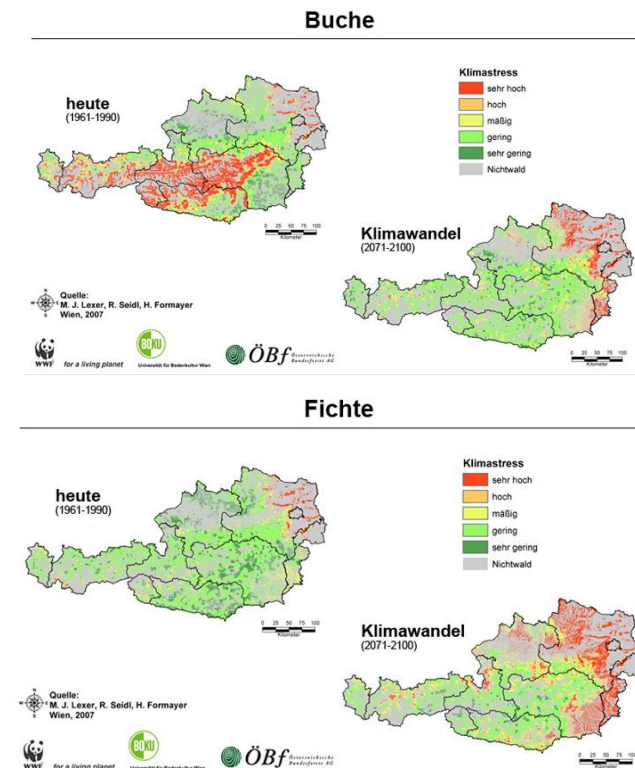


Abbildung 38: Die Hauptbaumarten Fichte und Buche im Klimawandel
Quelle: Niedermair et al. (2007)

⁶ Bestockungsziel (BZ): Erwartungen und Zielsetzungen hinsichtlich des Aufbaus und der Artenzusammensetzung eines Althbestandes

Obwohl die Grundlagendaten der Karten den Zeitraum 1961–1990 umfassen, zeigt sich deutlich, dass sich der Kältestress der Buche im inneralpinen Raum stark verringert, während der Osten für das Waldwachstum für die Buche, aber insbesondere für die Fichte schlechter wird (Abbildung 38).

Durch Klimaextreme traten in der Vergangenheit auch zunehmend Stresssituationen bei Buchen auf (Buchensterben), obwohl diese Baumart grundsätzlich wesentlich klimatoleranter und resilienter als die Fichte ist. Nach der Sommertrockenheit in der Schweiz im Jahr 2018 zeigte sich, dass verfrühter Laubfall als Schwächesymptom auftreten kann und von den Buchen mit vorzeitigem Laubfall 1,4 %–4,7 % abstarben und eine mittlere Kronenmortalität von 17 %–35,6 % beobachtet wurde (Wohlgemuth et al., 2020).

Eine Untersuchung von Nadelbaumarten zeigte, dass vor allem die Douglasie und die Tanne die beste Resistenz gegenüber Trockenheit haben (also wenig Reduktion des Zuwachses während der Trockenperiode), aber Fichte und Tanne die beste Erholung zeigten (also Verhältnis Wachstum in der Trockenphase und im Jahr danach) (Abbildung 39). Vor allem die Fichte und die Tanne zeigten je nach Herkunft des Baumes unterschiedliche Werte, was auf eine höhere genetische Anpassungsfähigkeit hindeuten und so eine gute Basis für klimaresistente Züchtungen bilden kann (Schüler et al., 2017).

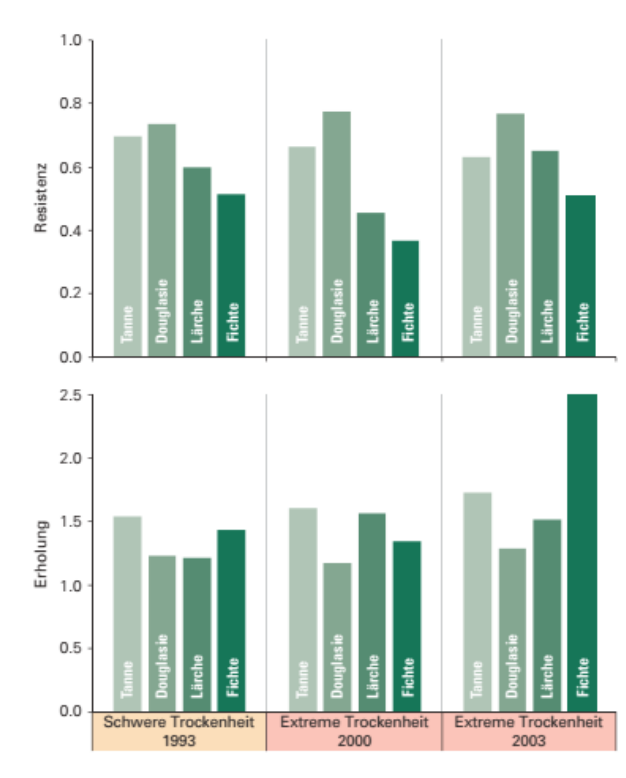


Abbildung 39: Vergleich der Trockenreaktion von Nadelbaumarten als Mittelwert aller getesteten Herkünfte in drei Trockenjahren 1993, 2000, 2003.

Die Erholung der Fichte 2003 muss mit Vorsicht interpretiert werden, denn tatsächlich hat die Trockenheit 2000 einen nachhaltigen Wachstumsrückgang bewirkt, der sich erst nach 2003 wieder normalisiert hat
Quelle: Schüler et al. (2017)

7.2.2 Verschiebung der Waldgrenze

Es wird auch eine Verschiebung der Baum- und Waldgrenze nach oben erwartet. Dies wird durch Nutzungsaufgaben auf Almflächen zusätzlich beschleunigt. Auf diesen Höhen sind auch die größten Zuwachsgewinne zu erwarten (Thom et al., 2018).

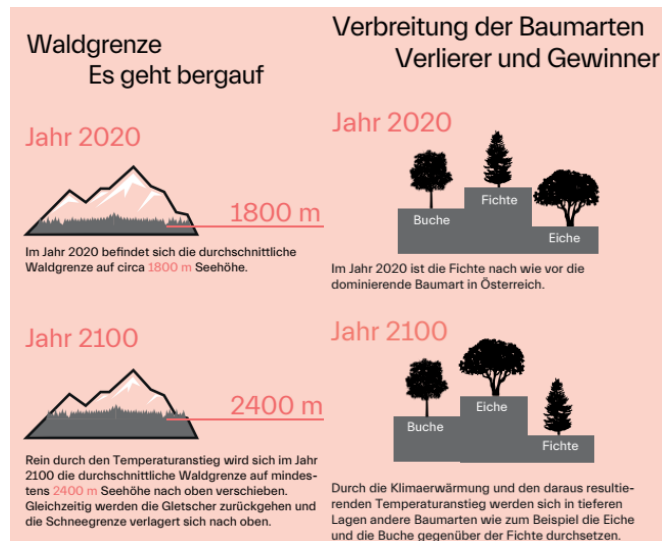


Abbildung 40: Verschiebung der Waldgrenze
Quelle: BFW (2019)

7.2.3 Kalamitäten und Störungseignisse

Großflächige Katastrophenereignisse stellen eine große Herausforderung für den Kohlenstoffspeicher im Wald und die Waldbewirtschaftung dar.

- Waldschäden durch Wind und Borkenkäfer haben in Europa in den letzten Jahrzehnten deutlich zugenommen (Schelhaas et al., 2003). Schmalzl und Weiß (2020) haben einen deutlichen Zusammenhang zwischen sekundären Nadelwaldbeständen (d.h. nicht natürlichen, sondern aufgeforsteten Beständen) und einer gesteigerten Schadenshäufigkeit für den Südkärntner Raum stellvertretend für die Tieflagen unter 1.000 m Seehöhe

nachgewiesen. Bereits 2007 wurden Kalamitätsnutzungen von rund 8 %–12 % im Fichtenaltersklassenwald festgestellt und in unterschiedlichen Szenarien ein Anstieg auf über 30 % prognostiziert (Lexer and Seidl, 2007). Österreichweit lag dieser Anteil 2019 gemäß Holzeinschlagsmeldung (HEM) bei 62 % (B.M.L.R.T., 2020).

Waldbrände

Durch lange und intensive Trockenperioden (insbesondere im Frühjahr) ist mit einer Zunahme an Waldbränden zu rechnen. 2011, 2012 und 2020 wurden bereits viele Frühjahrsbrände, im Juli und August 2013 eine Rekordzahl an Sommerbränden dokumentiert, wenngleich auch ausgehend von einem sehr niedrigen Niveau (Glade et al., 2020).

Waldbrände spielen aber derzeit (noch) eine untergeordnete Rolle. Die Waldbrandstatistik, die von der Universität für Bodenkultur seit 1993 geführt wird, weist in den vergangenen 29 Jahren eine durchschnittliche jährliche Waldbrandfläche von ca. 57 ha/a aus. In der Zeitreihe 1993–2021 ist kein Trend zu einer Steigerung der jährlichen Brandfläche erkennbar (vgl. Abbildung 41 bzw. [Waldbranddatenbank der BOKU](#)).

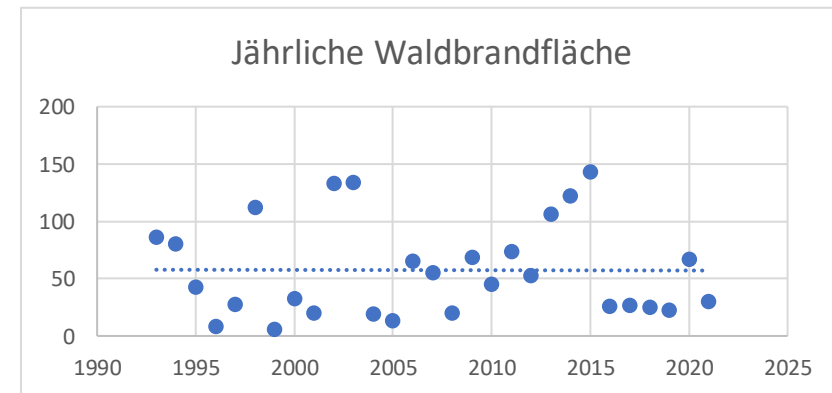


Abbildung 41: Waldbrandstatistik Österreich (1993–2021)
Quelle: fire.boku.ac.at

Verglichen mit anderen Störungseinflüssen spielt Waldbrand in Österreich derzeit und voraussichtlich auch zukünftig eine sehr

untergeordnete Rolle (European Commission. Joint Research Centre., 2020). Da zu erwarten ist, dass der Anteil an Laubholzbeständen in Zukunft zunehmen wird, ist auch nicht mit einer rapiden Zunahme der Brandhäufigkeit zu rechnen. Zwar ist die Buche durch die dünne Rinde, die das Kambium schwer schützen kann, empfindlich gegenüber Bränden (Gehring et al., 2019), aber Laubwaldgesellschaften sind insgesamt weniger anfällig für Waldbrände, da geringerer Unterwuchs weniger Zündstoff liefert und das Feuer durch die Waldstruktur schwerer in den Kronenraum aufsteigen kann.

Borkenkäfer, Krankheiten und andere Schadinsekten

Europaweit wird mit stärkeren Störungseinflüssen insbesondere durch Schadinsekten und Wind gerechnet (European Commission. Joint Research Centre., 2020). Auch Seidl et al. (2017) erwarten basierend auf Modellierungen in den Kalkalpen verstärkte Störungsregime mit dem Klimawandel (Seidl et al., 2017). Diese Störungen treffen vor allem Altersklassen ab 90 Jahren durch den Borkenkäfer und höhere Windgeschwindigkeiten sowie deren Interaktionen (z.B. verstärkte Borkenkäfervermehrung nach Windwürfen). Dieser Trend wird auch von Dokumentationen des BfW unterstützt, die zugleich einen Trend von einem winddominierten Störungssystem hin zu einem käferdominierten Störungssystem illustrieren (Abbildung 42).

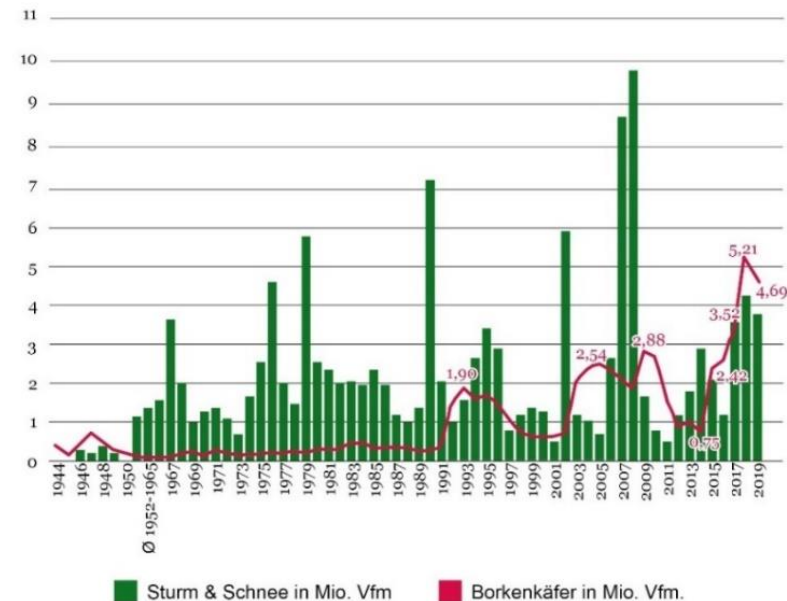


Abbildung 42: Schadholzmengen durch Sturm, Schnee und Borkenkäferbefall in Österreich 1944–2019

Quelle: verändert nach Steyrer et al. (2020)

Betrachtet man die erwarteten Schadholzmengen aus den Modellierungen der CareforParis-Studie, wird vor allem im Szenario Vorratsaufbau mit den höchsten Schadholzmengen gerechnet (Weiss et al., 2020b). Darin begründet liegt die Annahme, dass ältere, nutzungsextensivere Wälder generell störungsanfälliger sind als Wirtschaftswälder. Diese Annahme steht jedoch im Widerspruch zu Beobachtungen in Südkärnten (Schmalzl and Weiß, 2020). Vielmehr könnten weitläufige Kalamitäten auf das waldbauliche Modell der Vergangenheit zurückgeführt werden, da größere, gleichaltrige und nur von wenigen Baumarten dominierte Wälder, wie etwa die Altersklassenwälder besonders anfällig sind (Wermelinger and Jakoby, 2019).

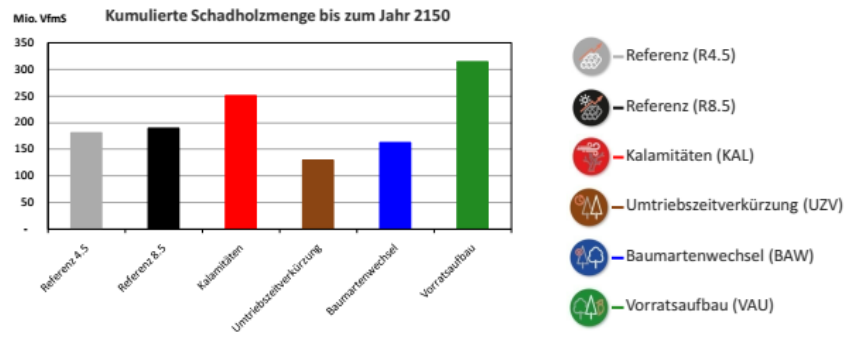


Abbildung 43: Annahmen zur kumulierten Schadholzmenge je Szenario in der CareforParis-Studie

Quelle: BFW (2020)

- Annahmen zu Schadholzmengen liegen mitunter darin begründet, dass die Hauptbaumart Fichte vor allem ab einem Alter von rund 90 Jahren zunehmend anfällig für Windwurf und Borkenkäfer wird (Thom et al., 2018). Zudem wird vermutet, dass in fichtendominierten Wäldern von Natur aus regelmäßig großflächige Störungen – in Mitteleuropa vorwiegend Wind und Borkenkäfer – auftreten (Čada et al., 2016).

Die Hauptherausforderung stellt der Borkenkäfer dar. Ab einer Temperatur von 8,3 °C bis ca. 30 °C nimmt seine Entwicklungsgeschwindigkeit linear zu (Wermelinger and Seifert, 1998). Je wärmer es wird, je früher diese Temperaturen auftreten, umso mehr Borkenkäfergenerationen pro Jahr sind möglich. So dauert es bei 20 °C Dauertemperatur 48 Tage von der Eiablage bis zum Schlupf der voll entwickelten Käfer, bei 25 °C verkürzt sich diese Zeitspanne auf 33 Tage (Hoch et al., 2017). Durch diese Dynamik ist ein enormes Populationswachstum möglich. Treffen die Käfer dann auf durch Windwurf, Trockenheit oder Hitze geschwächte Bäume, sind riesige Schadholzflächen möglich.

- Anders verhält sich etwa der Pinienprozessionsspinner. Seine Larven verbringen den Winter im Larvenstadium. Unter –7 °C frieren die Larven ein. Dies ist für sie nicht tödlich, verlangsamt aber ihre Entwicklung. Wann immer es wärmer ist, schreitet ihre Entwicklung fort (Battisti et al. 2005 in Hoch et al. (2017)). Auch

hier ist die Temperatur ein kritischer Entwicklungsfaktor.

Des Weiteren wurden durch Pflanzenimporte weitere Schädlinge wie der Citrusbockkäfer, die Esskastanien-Gallwespe oder der Asiatische Laubholzbockkäfer eingeschleppt (Hoch et al., 2017). Dazu kommen eine Vielzahl neuer, auch unbekannter Pilz- und Bakterienkrankheiten, die große Schäden verursachen können (z. B. Eschentriebssterben).

Wind

Immer wieder auftretende Sturmereignisse und damit verbundene Windwürfe werfen die Frage der zukünftigen Entwicklung auf. Gemäß der ZAMG hat die durchschnittliche Windgeschwindigkeit in den letzten 30 Jahren grundsätzlich abgenommen, ab etwa 1.500 m Seehöhe aber etwas zugenommen. Vorhandene Klimamodelle prognostizieren in den nächsten Jahrzehnten eine Verschiebung von Großwetterlagen und Zugsystemen von Tiefdruckgebieten. Damit verbunden wird mit einer Reduktion von Tiefdruckgebieten, aber bei Auftreten starker Tiefdruckgebiete mit erhöhten Windgeschwindigkeiten gerechnet (etwa durch höheres Energiepotenzial und höheren Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre). Für Mitteleuropa rechnet die ZAMG mit einer steigenden Windgeschwindigkeit von 5 % (ZAMG, o.J.). Treffen solche Ereignisse auf geschwächte Wälder, sind gerade die punktuell hohen Windgeschwindigkeiten wesentliche Verursacher von Windwürfen.

Stimmen aus der Forschung: Zu Störungsregimes

Störungen werden stark zunehmen. Die Fichte hat ein besonders hohes Gefährdungspotenzial. Die Fichte wird weiterhin eine tragende Rolle in hochmontanen bis subalpinen Stufen spielen. Hier können sogar Zuwachsgewinne durch den Klimawandel möglich sein, auch wenn zugleich Störungen, vor allem über den Borkenkäfer, zunehmen werden. Insgesamt wird eine zunehmende Verschiebung von einem winddominierten Störungsregime hin zu einem vom Borkenkäfer dominierten Störungsregime beobachtet. Wir erwarten aber auch zunehmende Windstörungen. In unseren Simulationen ist die Windgeschwindigkeit einer der wesentlichsten Faktoren mit potenziell großen Auswirkungen, jedoch herrscht große Unsicherheit, wie stark Windgeschwindigkeiten zunehmen werden. Diese beiden Störungsagenten bleiben wahrscheinlich in Zukunft dominant, auch wenn Feuer zunehmend ein Problem werden könnte, da unsere Wälder nicht an Feuer angepasst sind.

7.2.4 Auswirkungen auf Naturgefahren

Fast alle Klimamodelle weisen auf eine höhere Frequenz und Intensität von Naturkatastrophen hin. Hochwässer, extreme Niederschlagsereignisse sowie Stürme treten bereits jetzt verstärkt auf wie etwa beim Hochwasser in Hallein oder Mittersill im Sommer 2021. Einem vitalen Wald kommt in Österreich eine tragende Rolle beim Schutz vor Muren, Steinschlägen und Hochwässern zu. Daher spielt die Funktionalität von Schutzwäldern in der Klimawandeldiskussion eine wichtige Rolle und rund 30 % der Waldfläche weist eine Schutzwaldfunktion (für Objekt- oder Standortschutz) auf. Eine wichtige Frage ist, wie diese Funktion unter geänderten Rahmenbedingungen erhalten werden kann. Auch im Wald rechnet man zunehmend mit diesen Effekten (Markart et al., 2017). Steigen die Schäden durch Borkenkäfer oder Sturm und verlangsamt sich die Wiederbewaldung durch Hitze und Trockenheit vergrößern sich die Risiken des Klimawandels und nachfolgender Erosion, Rutschungen oder Steinschlag (Markart et al., 2017). 2018 zog Sturm Vaia durch Osttirol und warf rund 700.000 Festmeter Holz in steilen Lagen. Im Bezirk Völkermarkt in Kärnten wurden auf einen Schlag rund 84 % des jährlichen Gesamteinschlages (526.000 Efm) geworfen.

7.2.5 Kohlenstoffspeicherungspotenzial

Bisherige Studien zeigen grundsätzlich ein sehr hohes Kohlenstoffspeicherungspotenzial durch Wiederbewaldung und Vorratszuwachs (Aufnahme von 60 % des kumulativen fossilen Kohlenstoffausstoßes 1990–2007, (Pan et al., 2011; Weiss et al., 2020b)).

Das Potenzial ist also grundsätzlich hoch. Jedoch wird angenommen, dass der Kohlenstoffpool in Waldökosystemen durch vergangene Nutzungen und Störungen künstlich niedrig gehalten wurde (Erb et al., 2018; Seidl et al., 2014) und diese hohen Senkenraten nur temporär sind, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt. Dies ist insbesondere für Mitteleuropa mit seiner intensiven Nutzungsgeschichte relevant (Thom et al., 2018). So wurden etwa durch die Steigerung und Intensivierung der Agrarproduktion, Aufgabe der Waldweide, Aufforstung vieler Grenzertragsflächen ein „Nachholeffekt“ gestartet (Bebi et al., 2017). Sobald diese Sättigung eintritt, könnte etwa der Wald innerhalb von 100–

150 Jahren von der Senke zur Quelle bzw. klimaneutral werden. Insbesondere auf Fichtenwaldstandorten, die zwar große Mengen Kohlenstoff speichern, könnte der beschriebene Nachholeffekt bei sich verschlechternden Standortbedingungen relativ rasch eintreten (Thom et al., 2018). Der Speicher könnte diese Hypothese allerdings auch durch stehendes Totholz, optimalere Wuchsbedingungen für Naturverjüngung sowie eine mögliche Humusanreicherung widerlegen. Dieser sogenannte Legacy Effect (Thom et al., 2018) könnte viele zukünftige Modellierungen beeinflussen, da Modelle von vergangenen Zuwachs-/Senkenraten ausgehen. Die Autoren zeigten in den Kalkalpen, dass, sofern keine Störungen eintreten, sich der Kohlenstoffpool im Wald von 1905 bis 2013 um 41 % erhöht hat. Zudem zeigte sich, dass Störungen zu einer erhöhten Heterogenität der Flächen und damit einer autonomen Anpassung führen. Dadurch werden Wälder widerstandsfähiger gegenüber Klimastress. Allerdings geben Thom et al. zu bedenken, dass der Effekt des Waldspeichers niedriger sein könnte als gedacht. Vor allem, da Störungen bzw. Änderungen des Störungsregimes das grundsätzlich hohe Senkenpotenzial des Waldes empfindlich beeinflussen können – wesentlich stärker als der Klimawandel selbst.

7.3 Wald der Zukunft: Ausblicke

7.3.1 Funktionen des Waldes

Um die multifunktionalen Anforderungen der Menschen an den Wald auch in Zukunft erfüllen zu können, braucht es resiliente Bestände. Diese müssen in der Lage sein, auch unter sich ändernden Umweltbedingungen die erwarteten Leistungen wie Holzproduktion, Schutz vor Naturgefahren, Erholungsraum, Sicherung einer hohen Biodiversität und viele andere bereitstellen zu können. Bestände mit einer hohen Artenvielfalt (Alpha-Diversität) und hoher genetischer Variabilität innerhalb einzelner Baumarten sowie Landschaften mit einer hohen Vielfalt an unterschiedlichen Waldbeständen (Ökosystem-Diversität) können Störungen und Veränderungen besser abpuffern als großflächige Monokulturen aus wenigen Baumarten, die aus genetisch ähnlichen Ausgangsbeständen aufgeforstet wurden. Ein großer Pool an Arten und genetischer Varianten bringt eine erhöhte funktionale Diversität mit sich und über Naturverjüngung und Auswahlprozesse der

neuen Standortbedingungen (natürliche Selektion) können sich Waldbestände schrittweise an neue Klimabedingungen anpassen. Dies ist jedoch nur innerhalb einer gewissen Amplitude der Veränderung möglich. Sollte sich das Klima deutlich über die in den Pariser Klimazielen definierten 1,5 °C hinausbewegen, ist eine Abschätzung der Anpassungsprozesse schwer möglich. Es könnten neue Waldbilder oder Baumartenkombinationen entstehen, die wir heute nicht kennen oder es könnten sich überhaupt andere Ersatzgesellschaften wie Strauch- oder Grassteppen bilden. Probleme resultieren daraus nicht für die Natur per se, weil diese keine stabilen Zielzustände kennt, sondern für die Menschen, deren Erwartungen an die Waldfunktionen nicht erfüllt werden können.

7.3.2 Artenzusammensetzung

Die Artenzusammensetzung der Zukunft wird von der potenziellen natürlichen Vegetation (PNV) bzw. potenziellen natürlichen Waldgesellschaften (PNWG) der Zukunft definiert. Die Baumarten der Zukunft werden bereits intensiv diskutiert, insbesondere da die Planungshorizonte in der Forstwirtschaft weit über die mittelfristigen Klimamodelle hinausgehen. Für den heute gepflanzten Wald und die heutigen Verjüngungsziele sollte daher schon der erwartete Zustand im Jahr 2100 mitgedacht werden. Jasser geht davon aus, dass Stieleiche, Tanne, Buche und Douglasie die zentralen Baumarten sein werden (Jasser, 2017).

Die Stieleiche ist besonders für tiefere Lagen bis 500 m Seehöhe und bei höheren Temperaturen geeignet und wird auf schweren Böden des Alpenvorlandes als alternativlos angesehen. Mit dieser Baumart ist es möglich starkes Eichenwertholz innerhalb von 90–100 Jahren zu ernten.

Die Tanne verträgt höhere Temperaturen, hat beträchtliches ökonomisches Potenzial und hat sich als relativ klimawandelresistent erwiesen, ist aber sehr verbissanfällig. Die hohen Wildbestände verhindern den natürlichen Verjüngungserfolg dieser Baumart und stellen damit den natürlichen Klimaanpassungsprozess der Wälder in Frage.

Die Buche wurde durch forstwirtschaftliche Eingriffe stark in ihrer ursprünglichen Verbreitung eingeschränkt und großflächig in den vergangenen 200 Jahren durch Fichte ersetzt (Grabherr et al., 1998;

Kirchmeir et al., 1999; Koch et al., 1999). Durch ein Umdenken der Waldbewirtschaften und eine stärker an der Natur orientierte Förderpolitik bei Aufforstungsmaßnahmen nimmt der Anteil der Buche langsam zu (Russ, 2019). Von der Inventurperiode 2007/2009 bis zur 2019 publizierten Zwischenauswertung der Inventurperiode 2016/2018 (ca. 10 Jahre) hat die mit Buchen bestockte Fläche um 22.000 ha zugenommen (0,7 % der österreichischen Waldfläche). Das potenzielle Verbreitungsgebiet vergrößert sich durch die steigenden Temperaturen, da die Buche auch auf höheren Standorten gegenüber der Fichte einen Konkurrenzvorteil hat. Obwohl einzelne Studien auch Klimastress bei der Buche beobachteten (Schuldt et al., 2020), Stichwort Buchensterben, wird die Buche voraussichtlich als Hauptbaumart in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Von Waldbesitzer:innen wird die Buche allerdings eher mit Skepsis betrachtet, insbesondere im Hinblick auf ihre ökonomische Verwertbarkeit. Dennoch ist diese Baumart sehr klimatolerant und wirkt stabilisierend auf vielen Standorten. So erwartet etwa Jasser (2017), dass auf flachgründigen Kalk- und Dolomitstandorten zumindest 40 % Buche für eine Sicherung der Standortproduktivität notwendig sind.

Die Douglasie wird als mögliche neue Brotbaumart der Zukunft viel diskutiert. Gemäß Jasser ist sie für Teile des Mühlviertels besonders interessant, sollte aber nur in Mischbeständen mit Tanne und Buche (auch zusammen mit Birke, Kirsche oder Nuss) gepflanzt werden. Die Baumart ist ökonomisch neben Tanne, Lärche und Kiefer durchaus interessant, ist aber im Alter ebenso windwurfgefährdet wie die Fichte.

Auszug aus der BFW Praxisinformation 44 (Kleinszig, 2017): Klimawandel aus Sicht des Waldbewirtschafters: Beispiel Forstrevier Wolschart:

Ursprünglich wuchsen am Standort Kiefern-Eichenwälder, die sukzessive in Fichtenmonokulturen umgewandelt wurden. 1990 bestand der Wald zu 95 % aus Fichte. Infolge eines extremen Schneebruchs 1995/96 erfolgte eine Bestandesumwandlung in einen Mischwald. 2010 erreichte der Anteil der Laubhölzer der ersten Altersklasse, vor allem Buche, 30 %. Es zeigte sich, dass durch Laubhölzer Mehrkosten in der Ernte und Bewirtschaftung entstehen. Der DB3⁷/ha erreicht nur zwischen 10 und 20 % eines Fichtenholzbetriebes. Dennoch wurde in den Bestockungszielen 30–35 % Laubholz festgelegt. Als Ergänzung erfolgen Fichtennaturverjüngung sowie Anreicherungen mit Lärche, Tanne, Douglasie, und Küstentanne. Insbesondere die Tanne erwies sich als unkompliziert, Douglasie und Lärche nur mit Einschränkungen. Für die Naturverjüngung ist Wild das größte Problem.

7.3.3 Nutzung

Es ist zu erwarten, dass Dauerwaldkonzepte wie etwa die Einzelstammentnahme oder die Plenterwaldbewirtschaftung an Bedeutung gewinnen werden, da diese Konzepte stark mit Naturverjüngung arbeiten und die Selbstanpassungskraft der Waldökosysteme an den Klimawandel besser ausnützen und weniger kostenintensiv in der Wiederbewaldung sind wie etwa eine Kahlschlagbewirtschaftung mit künstlicher Aufforstung. Dauerbestockte, ungleichartige Waldbestände können sich nach Windwurf- oder Schneebruchereignissen schneller regenerieren, da bereits Verjüngungshorste auf der Fläche vorhanden sind und strukturierte Bestände bessere Höhe-Durchmesser-Verhältnisse aufweisen und dadurch stabiler sind. Höhere Vorräte und ein größerer Totholzanteil können auch größere Feuchtigkeitsmengen aufnehmen und wirken

günstig auf ein kühleres Mikroklima im Wald (Ibisch et al., 2019).

Auch die EU-Waldstrategie (Europäische Kommission, 2021) unterstützt naturnahe Waldbilder und spricht sich für eine Förderung von Dauerwaldmodellen aus. Der Vorteil liegt darin, dass hier alle Sukzessionsstadien sowie größere Totholzinseln vorhanden sind

Plenterwald benötigt grundsätzlich mehr Personal und erfordert mehr forstliches Wissen, könnte dann aber durch eine gezielte Nutzung von Wertholzbäumen sogar rentabler als ein Altersklassenwald sein. Hier steckt auch eine der größeren Herausforderungen: Oft ist die Entscheidung zur kahlschlagbasierten Altersklassenwaldbewirtschaftung im Mangel an geeignetem Forstpersonal zu suchen.

Vor allem eine rechtzeitige Durchforstung, eine richtige Herkunftswahl und eine Lösung des Schalenwildproblems zum Schutz des Bodens sind Grundlage für eine zukunftsfähige Waldbewirtschaftung (Jasser, 2017).

7.3.4 Überlegungen zum Wald der Zukunft

Wie der Wald in Österreich künftig aussehen wird, wird nur die Zukunft zeigen, da unzählige Variablen zusammenwirken. Die bestehenden Studien vermitteln eine grobe Vorstellung dessen. Sollten jedoch die Temperaturen weiter steigen, wird auch die Entwicklung des Waldes ungeahnte Dynamiken entwickeln. Im Folgenden sind Ausschnitte aus Interviews mit Stakeholdern des Waldes und ihren Erwartungen und Perspektiven kurz dargestellt:

⁷ DB 3 (Deckungsbeitrag 3): Deckungsbeitrag unter Berücksichtigung von Ernte-, Bringungs- und Waldbaukosten.

Stimmen aus der Forschung

Wald der Zukunft

Ein vitaler Wald im Jahr 2050 für mich ist eine Mischung aus unbewirtschafteten und bewirtschafteten Wäldern inklusive der Zwischenstadien. Diese Diversität der Bewirtschaftung wie auch eine diverse Besitzstruktur führt zu Diversität des Waldzustandes. Die Waldbewirtschaftung erfolgt durch den/die Grundeigentümer/in. Wichtig erscheint mir jedenfalls, dass Wald nicht vermehrt in großen wenigen Betrieben zusammengefasst wird, so wie es in der Vergangenheit bei der Landwirtschaft geschehen ist. Das Forstgesetz definiert die Rahmenbedingungen der Waldbewirtschaftung und welche Funktionen der Wald zu erfüllen hat. Hier erwarte ich in den nächsten 30 Jahren wenig Veränderung.

Hinsichtlich Artenzusammensetzung erhoffe ich mir, dass wir die Artendiversität noch weiter erhöhen. Unsere Waldökosysteme sind Heimat vieler Arten und daraus können wir schöpfen. Die Fichte wird nicht die einzige Baumart sein, die unter dem Klimawandel leidet. Auch Buche und Eiche sind in dem Zusammenhang kritisch zu beurteilen. Es ist unklar, welche Arten tatsächlich die Gewinner durch den Klimawandel sein werden. Vor allem ältere Buchen scheinen unter Sommertrockenheit zu leiden. Linde, Ahorn und Tanne halten sich da besser. Kiefer und Lärche werden in der Literatur oft als trockenresistente Baumarten beschrieben, ich habe in der Praxis aber auch schon von schlechten Erfahrungen mit diesen Baumarten gehört. Tanne, Hainbuche, Linde und Ahorn (und mit Abstrichen Eiche) sind aus meiner Sicht zukunftssträchtige heimische Baumarten.

Wald der Zukunft

Der Wald der Zukunft sollte multifunktional und divers sein. Das bedeutet er hat mehrere Arten pro Bestand (Alpha-Diversität), aber auch eine hohe Beta-Diversität (von Beständen) und ist in Teilen zusammengesetzt aus der PNV der Zukunft. Exoten können beigemischt sein, wenn sie unter zukünftigen Klimabedingungen geeignet sind und wichtige Ökosystemleistungen (z. B. Holzproduktion und Kohlenstoffspeicherung) erfüllen. Zur Klimaanpassung sind insbesondere funktionale Diversität und funktionale Netzwerke wichtig. So kann z. B. bei Störungen ein benachbarter Bestand eine schnelle angepasste Naturverjüngung sichern. Auch sollten mehrschichtige Dauerwälder verstärkt gefördert werden. Außerdem sollten alle Sukzessionsstadien auf Landschaftsebene vertreten und Totholzinseln vorhanden sein. Insgesamt ist es ein diverser, durchaus aktiv gestalteter Wald, der vielleicht sogar diverser ist, als er sich von Natur aus entwickeln würde. Dadurch kann er die vielfältigen Funktionen erfüllen und eine hohe Resistenz und Resilienz hinsichtlich Klimawandel und Störungen bieten. Hierfür braucht es aber generell mehr Personal im Forstsektor sowie kleinere Reviere.

Stimmen aus der Forstwirtschaft

Wald der Zukunft

Die Wälder werden in Zukunft durchgängig bis zur Waldgrenze wesentlich laubholzreicher sein. Auch wenn an der Waldgrenze immer Nadelholz dominieren wird, wird dort, wo wir heute sehr nadelholzdominierte Bestände haben, etwa bis ca. 1800 m, auch dort wird mehr Laubholz vorkommen.

Je nachdem, können auch Dürrephasen wie im Waldviertel auftreten. Das hätte massive Auswirkungen, vor allem auch im Gebirge. Gerade Kalkstandorte sind in Bezug auf Trockenheit vulnerabel. Dort wird es völlig neu verjüngte, komplett anders zusammengesetzte Bestände geben. Wir dürfen nicht damit rechnen, dass die Gebirgswälder so bleiben wie sie sind. Im Osten glaube ich, dass die Wälder mit neuen Baumarten angereichert sein werden. Ob wir wollen oder nicht. Hier werden auch invasive Arten aus dem städtischen Raum oder den Gärten kommend eine Rolle spielen.

Ich sehe, dass in Gesamtösterreich die Senkenleistung des Waldes eher abnimmt, weil wir aus der Phase der mittelalten, zuwachsstarken Bestände rausfallen. Wenn Zuwächse kulminieren, dann sollten wir an eine Nutzung denken, um den Zuwachs wieder anzukurbeln. Insgesamt müssen wir in der Forstwirtschaft danach trachten, mit gezielter Bewirtschaftung möglichst viel Zuwachs zu generieren, um einen maximalen Klimaeffekt (= CO₂-Aufnahme) zu generieren.

In der Forstwirtschaft sehe ich eine politisch hervorgerufene Segregation. Die integrierte Forstwirtschaft, wie wir sie jetzt haben, bei der alles gemeinsam auf der Fläche umgesetzt wird, sehe ich gefährdet. Ich befürchte etwa, dass bei großflächigen Außernutzungsstellungen, andere Standorte intensiviert werden müssen, um den Holzbedarf decken zu können.

Wald der Zukunft

Ein vitaler Wald 2050 wird aus mehreren Baumarten bestehen, eine vielfältige Textur und Struktur aufweisen. Laub- und Nadelholz, Licht- und Schattenbaumarten sind gemischt. Im Jahr 2050 erfüllt der Wald dieselben Funktionen wie heute. Er wird bewirtschaftet sein, hoffentlich intensiv. Es wird Holz geerntet, weil bis dahin die Bioökonomie Fuß gefasst hat.

Der Wald steckt in einer Zwickmühle. Er leidet durch den Klimawandel, weil sich die Standortbedingungen und Wachstumsvoraussetzungen ändern. Daher muss ich die PNWG immer neu anpassen. Wir müssen vielleicht bisherige Erfahrungen auch fallen lassen und mehr vom Rückblick in die Vorausschau kommen, um zu erkennen, was das potenziell Richtige ist. Es tauchen auch neue Bedrohungen

für den Wald wie das Eschentriebsterben auf. Gleichzeitig muss der Wald aber auch zukünftig Rohstoffe für die Bioökonomie liefern.

Der Wald ist immer Instrument wie z. B. für Biodiversitätsziele oder für Klimaziele. Für die Erfüllung der unzähligen Funktionen ist die diverse Bewirtschaftung durch die vielen Kleinwaldbesitzer zentral. Der Wald wird auch in Zukunft ein Multitalent bleiben und beispielsweise Rohstoffe und Lebensmittel liefern, Schutz vor Naturgefahren bieten oder Biodiversität sichern. Das macht Forstpolitik so herausfordernd.

Stimmen aus der Politik

Es wird zentral sein, dass man die Rahmenbedingungen so gestaltet, dass der Wald auch in Zukunft noch existieren kann. Hierzu muss alles unternommen werden, um den Klimawandel zu bremsen. Der Wald kann seinen Beitrag zum Klimaschutz leisten, aber allein schafft er es nicht. Und die Zeit ist sehr knapp. Daher investieren wir auch intensiv in Forschungsprojekte rund um den klimafitten Wald, damit der Wald auch in Zukunft all seine Funktionen erfüllen kann. Dies gilt insbesondere für die in Österreich wichtige Schutzfunktion. Diese zu gewährleisten, ist vielleicht die größte Herausforderung. Die Kräfte der Naturgefahren sind extrem, die bewirtschaftete wie auch nicht bewirtschaftete Wälder gleichermaßen treffen. Das ist dann auch eine massive Bedrohung für die Schutzwälder. Aber die wichtigste Rahmenbedingung wird sein, aus den fossilen Brennstoffen auszusteigen.

Im globalen Vergleich sehe ich in Österreich eine vergleichsweise nachhaltige Waldbewirtschaftung und viele Waldbesitzer:innen, denen der Wald ein wirkliches Anliegen ist. Es gibt ein großes Verantwortungsgefühl bei den Waldeigentümern, aber auch so viele Nutzungen und Vorgaben und Wünsche, die von außen kommen. Sollten solche Leistungen auch geliefert werden, dann muss das auch fair abgegolten werden. Natürlich gibt es immer Verbesserungspotenzial. Auch Holz leistet einen wichtigen Beitrag, aber der Wald sollte nicht als „Müllschlucker“ fungieren. Der Wald hat so viele Nutzungen, so viele Wirkungen.

Ich habe aber große Sorge, dass wir den Wald überbeanspruchen. Dass alles zu schnell geht und sich der Wald nicht schnell genug anpassen kann. Es wird auch in Zukunft immer irgendeinen Wald geben. Aber für ein Ökosystem, das so träge reagiert, wir aber in Zukunft auch weiter nutzen wollen, müssen wir vorausplanen. Gleichzeitig wissen wir aber nicht genau, was „voraus“ ist. Das ist die größte Herausforderung.

Stimmen aus dem Naturschutz

In den Wäldern gibt es bereits viel Dynamik. Etwa durch Kalamitäten durch Borkenkäfer und Stürme. Wälder wie der Kobernaußerwald sind im Umbruch. Das war ein fast reiner Fichtenforst. Nun geht es dort über starke Naturverjüngung in Richtung Buchenwald.

Wie auch in der Landwirtschaft muss ich beim Boden und beim Wasserhaushalt anfangen. Ich brauche Maßnahmen, wie ich die Wasserretention im Wald erhöhen kann. Etwa ein alter Förster im Stift Schlägl, der Gräben so ausgeformt hat, dass immer Wassertümpel bleiben. Dadurch steigt auch die Feuchtigkeit im Wald, erhöht sich die Versickerung vor Ort, und das ist auch gut für die Biodiversität (Amphibien). Für mich ist die Frage des Bodenlebens und des Landschaftswasserhaushalts – und damit des Wassers vor Ort – entscheidend, ob wir in Zukunft Hochwald oder macchienartige Waldbereiche haben. Ein gutes Beispiel, wie die Zukunft aussehen könnte, ist die Wachau an den südlichen Bereichen des Donauufers. Das sind jetzt Extremstandorte, da sehen die Eichenwälder ein bisschen wie in Kalifornien aus. Es könnte durchaus in diese Richtung gehen und die Frage ist, wie ich hier entgegenwirken kann. Wenn ich Waldbrände in anderen Regionen ansehe, stellt sich mir die Frage des Landschaftswasserhaushalts, der Retention von Wasser in der Landschaft. Diese Frage wird in Verfahren nie gestellt, wenn es um die kumulative Wirkung der Zerschneidung der Landschaft durch Forststraßen geht. Wie kann ich das Wasser in der Landschaft, im Boden halten. Das werden Hauptthemen sein, auch um den Spagat zwischen Klima- und Biodiversitätskrise zu schaffen.

Zusätzlich kommt hinzu, dass wir ein massives Wald-Wildproblem haben. Ohne die Lösung der Wildfrage kommen wir zu keiner Lösung der Waldfrage.

Stimmen aus der Zivilgesellschaft

Es wird auch 2050 oder 2070 Wald geben. Österreich wird nicht waldfrei sein. Es wird aber ein Wald sein, der womöglich sehr anders aussehen wird. Die Fichte wird vielleicht weniger verbreitet sein. Sie wird vielleicht auch gebietsweise kränkeln. Vital wird der Wald aber weitgehend sein, weil er sich anpasst.

Der Wald wird auch bewirtschaftet sein. Die Artenzusammensetzung wird sich in Richtung angepasster Arten verändert haben. Fraglich ist, ob der Wald noch alle von ihm erwarteten Funktionen in der Zukunft erfüllen kann. Katastrophen

werden zunehmen. Die Schutzwälder sind zum Teil überaltert. Daher sehe ich die Schutzfunktion teilweise gefährdet. Die Biodiversitätsfunktion muss gestärkt werden. Der Wald hat so viele Funktionen zu erfüllen. Derzeit glauben wir an den Wald als allumfassenden Problemlöser, aber in Wirklichkeit ist er auch „Patient“. Wir müssen Wälder differenzierter, teilweise gar nicht nutzen. Wir sollten nicht flächendeckend noch höheren Druck durch die Holznutzung auferlegen. Wir glauben, den Wald gibt es ohne uns Menschen nicht. Das stimmt nicht, denn Urwälder gab es – bis auf wenige Sonderstandorte – unter verschiedensten klimatischen Bedingungen immer schon. Wir erwarten uns ein gewisses Bild vom Wald, müssen aber akzeptieren, dass der Wald der Zukunft vielleicht ganz anders aussieht.

Stimmen aus der Forschung

Die größte Herausforderung für den Wald ist sicher der Klimawandel selbst. Wir haben keine Ahnung, wie viele Stürme in welchem Ausmaß auftauchen werden. Wir wissen nicht, was mit Schädlingen passiert. Das kann sehr schnell gehen – etwa das Eschentriebsterben gefährdet eine ganze einheimische Baumart (auch wenn dieses Beispiel nicht durch Klimawandel verursacht ist, zeigt es, wie rasch weitreichende Gefährdungen durch Katastrophen möglich sind). Wir haben zwar ungefähre Vorstellungen, wo es hingehet, aber es gibt so viele Eventualitäten, die man vielleicht noch gar nicht am Schirm hat. Daher ist der Wald der Zukunft ein Wald, der dem Klimawandel standhält, der gewappnet ist, sodass weniger Katastrophen auftreten und er all seinen Anforderungen gerecht wird. Also auch, dass er zum Arten- und Biodiversitätsschutz beiträgt, und dass er ausreichend Rohstoffe, Zuwachs bereitstellt für langlebige Produkte und fossile Substitution.

Stimmen aus der Zivilgesellschaft

Wir werden uns von gewissen Waldbildern verabschieden müssen. Ausschließlich Hochwald im pannonischen Bereich wird es so vielleicht nicht mehr geben. Es wird vielmehr ein Mix aus Gesellschaften sein. Es wird immer Vegetation vorhanden sein. Ich denke nicht, dass es die Lösung ist, künstliche Ökosysteme zu schaffen. Man kann einen Idealwald nicht pflanzen. Das Waldökosystem ist eine zu komplexe Lebensgemeinschaft aus unzähligen Puzzleteilen. Viele Theorien haben sich teilweise durch den Klimawandel auch überholt. Nun macht man Prognosen, ohne genau zu wissen, wie es sich entwickeln wird. Ich kenne Forstpraktiker, die gar nicht mehr aufforsten, sondern schauen, was in der Naturverjüngung aufkommt. Hier muss aber die

Wildproblematik gelöst werden, denn das Wild kann die schönsten Pläne zunichtemachen.

Ich glaube, die heimischen Baumarten, auch die Fichte, bewältigen den Klimawandel. Für jede Baumart, die auf einem Standort ausfällt, gibt es eine andere in der Sukzessionsabfolge. Hier wird sich aber einiges verschieben. Damit verbunden ist auch das Aufforstungsproblem. Daher plädieren wir für Naturverjüngung. Ich denke in Zukunft werden die Eiche und die Tanne eine viel größere Rolle spielen, bin aber sicher, dass die Einbringung neophytischer Baumarten keine Lösung ist.

7.4 Potenzielle Gesprächspartner:innen und Expert:innen

- Dr. Hanns Kirchmeir, E.C.O. Institut für Ökologie (Waldökologie)
- Mag. Karin Enzenhofer, WWF (Waldökologie, NGO Perspektive)
- Dr. Robert Jandl, Bundesforschungszentrum für Wald (Wald- und Klimawandelforschung)
- Dr. Rudolf Freidhager, Österreichische Bundesforste (Umsetzungsmöglichkeiten auf der Fläche; Nutzung)
- DI Felix Montecuccoli, Land & Forstbetriebe Österreich (Perspektive der Waldbesitzer:innen, Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald und die Waldbewirtschaftung)
- DI Martin Höbarth, Landwirtschaftskammer Österreich (Interessensvertretung der Forstwirtschaft)
- Dr. Dominik Thom, TU München (Störungsdynamiken im Wald im Klimawandel)

Mögliche Fallbeispiele:

- Sturmflächen Vaia in Osttirol
- Dreiländereck Deutschland – Tschechien – Österreich (unterschiedliche Auswirkungen und Reaktionen auf massive Borkenkäferkatastrophe)
- ÖBF Forstbetrieb Waldviertel Voralpen (Herausforderung Wiederbewaldung in tiefen Lagen)
- Nationalpark Oberösterreichische Kalkalpen und Wildnisgebiet Dürrenstein (Naturnahe Wälder und Urwälder im Klimawandel)

8 ANPASSUNGSMABNAHMEN FÜR EINEN KLIMAFITTEN WALD

8.1 Kernbotschaften

- Ein Baumwachstum braucht viele Jahrzehnte – rasche Anpassungen sind daher nicht möglich.
- Es bleibt unklar, wie Eingriffe in das derzeitige System sich im Klimawandel auswirken, da die Erkenntnisse auf vergangenen Entwicklungen basieren (Allen et al., 2015).
- Jeder Eingriff ist ein Risiko. Es gilt das Risiko zu minimieren und den Wald durch Reduktion von Stressfaktoren zu entlasten (Niedermair et al., 2007).
- Naturverjüngung ist der Schlüssel zu einer angepassten Waldentwicklung.
- Die Baumartenkombinationen werden sich in den nächsten 50 Jahren massiv verändern.
- Totholzinseln und eine hohe Diversität an Bewirtschaftungsformen und Beständen sind der Schlüssel für eine hohe Resilienz der Wälder.
- Es herrscht Übereinkunft, dass eine Steigerung der Resilienz der Wälder und mehr Mischwald absolut erforderlich sind.
- Eine Neueinführung von Baumarten kann eine Handlungsoption darstellen, ist aber mit vielen Unwägbarkeiten und Risiken verbunden. Arten wie die Douglasie werden vermutlich rasch an Bedeutung gewinnen. Vom Menschen konstruierte Ökosysteme haben sich in der Vergangenheit als instabil herausgestellt (vgl. den aktuellen Zustand von Fichten-Altersklassenwäldern).

8.2 Anpassungsmaßnahmen für einen klimafitten Wald

Bäume, die heute gesetzt werden oder keimen, werden aufgrund des Klimawandels laufend mit einem sich ändernden Klima leben (müssen). In Anbetracht der langen Umtriebszeiten und Entwicklungsdauer von Wäldern sind Klimawandelanpassung mit großen Herausforderungen verbunden.

Der Klimawandel im Wald läuft so schnell ab, dass in Frage gestellt wird, ob dieser sich überhaupt mit oder ohne Eingriff des Menschen anpassen kann (Pluess et al., 2016). Ab einer Erwärmung von 2 °C wird es schwierig, zukünftige Umweltbedingungen abzuschätzen und zu prognostizieren, welche Baumarten oder Genotypen erfolgreich Waldbestände aufbauen können. Und in den letzten 30 Jahren wurde es bereits um rund 1,0–1,5 °C wärmer (ZAMG, 2021).

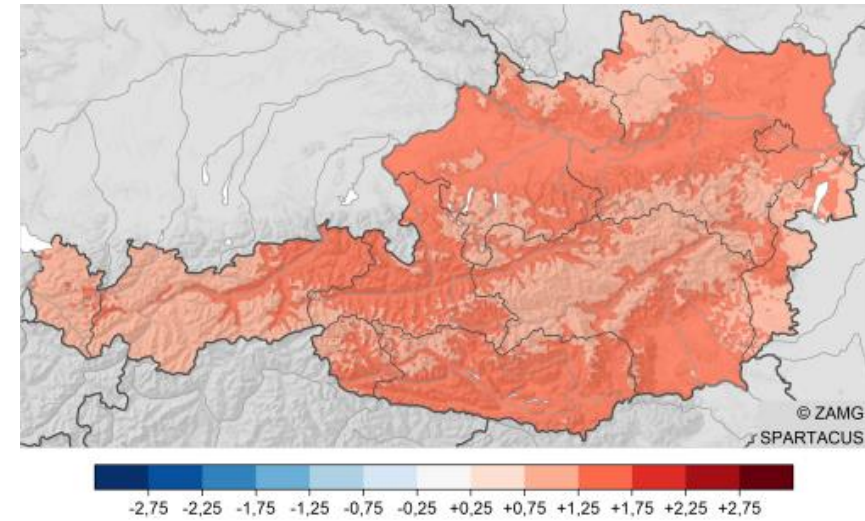


Abbildung 44: Erwärmung der letzten 30 Jahre in Österreich: Dargestellt ist die Differenz der Klimaperiode 1991–2020 zur Klimaperiode 1961–1990.

Quelle: ZAMG (2021)

Die österreichischen Wälder spielen im Klimaschutz, wie auch durch die Bereitstellung von Ökosystemleistungen und ihre wirtschaftliche Bedeutung, eine wichtige Rolle in Österreich. Die Erfüllung dieser gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Leistungen kann nur durch eine Anpassung der Waldbewirtschaftung gelingen.

Der steigende Druck und die steigenden Ansprüche sind aber auch eine Möglichkeit, forstwirtschaftliche Fehlentwicklungen der Vergangenheit zu korrigieren, neue waldbauliche Konzepte voranzutreiben und Planungsansätze, Steuerungsinstrumente und Fördermechanismen neu zu denken. Entwicklungen wie die Forcierung der Fichte außerhalb ihrer

natürlichen Wuchsgebiete, kahlschlagbasierte Altersklassenwaldbewirtschaftung, forstliche Monokulturen und zu hohe Wildstände haben zu instabilen, struktur- und biodiversitätsarmen sekundären Waldbeständen geführt, die unter den geänderten Klimabedingungen etliche Waldfunktionen nur unzureichend erfüllen können.

Dementsprechend unterstreicht beispielsweise auch das Bundesamt für Naturschutz in Deutschland, dass *„die bisherigen waldbaulichen Bewirtschaftungskonzepte, die noch weitestgehend auf Ideen der Plan- und Berechenbarkeit walddökosystemarer Prozesse beruhen und homogene Planungs- und Bewirtschaftungseinheiten sowie eine eher ökonomische Ausrichtung der Forstwirtschaft begünstigen, einer grundsätzlichen Neuorientierung zu unterziehen, welche den Aspekten der Unvorhersehbarkeit und der Vielfalt heute und zukünftig von Wäldern bereitzustellender Ökosystemleistungen, z. B. über mehr Partizipation, stärker Rechnung trägt.“* (BfN, 2020), S. 5).

Dabei ist die zentrale Herausforderung, widerstandsfähige (resiliente) Wälder zu fördern, damit diese auf noch unbekannte Auswirkungen des Klimawandels bestmöglich reagieren und sich anpassen können, ohne ihre ökologische Funktionstüchtigkeit zu verlieren. In Deutschland wird daher gefordert, die Wälder zu diversifizieren und Diversität aktiv zu fördern. Dies umfasst etwa die Artenzusammensetzung, den Strukturreichtum, Funktionsvielfalt, aber auch Vielfalt der Bewirtschaftungsverfahren). Hierzu sind Wälder *„wieder stärker als Ökosysteme zu betrachten, die neben der Holzerzeugung vielfältige und wichtige ökologische Leistungen für Natur und Gesellschaft erbringen.“* (BfN, 2020)

Auch in Österreich werden zunehmend Klimawandelanpassungsstrategien entwickelt und umgesetzt. Dies umfasst etwa eine Anpassung der Bestockungsziele im Wald, die Senkung der Umtriebszeiten zur Reduktion des Kalamitätsrisikos, den

strukturierten Bestandesaufbau bei der Buche sowie eine Zielstärkennutzung⁸ zur Standsicherheitserhöhung. Ein wesentliches Element stellen die Förderung von Mischbeständen, idealerweise mit Naturverjüngung dar (Wieshaider, 2017).

Dies findet sich auch im aktuellen Förderprogramm des Waldfonds (etwa in Maßnahme 8: Forschungsschwerpunkt Klimafitter Wald) wieder.

Zur Waldbewirtschaftung in Zukunft – Perspektive des UWD

Je mehr unterschiedliche Altersstadien, je mehr Strukturen und je näher an der natürlichen Waldgesellschaft orientiert, umso besser. Es gibt in Österreich eine breite Palette an waldbaulichen Methoden, die man nutzen kann. Durch die Umsetzung gewisser Naturschutzmaßnahmen wie der Förderung von Totholz kann sehr viel bewegt und die Stabilität des Waldes gesichert werden. Wir stehen zum bewirtschafteten Wald, aber mit dem Ziel, die Biodiversität und so die Widerstandsfähigkeit zu steigern.

8.2.1 Stabilisierende Maßnahmen

Naturverjüngung und natürliche Waldentwicklung fördern

Naturverjüngung, also eine nicht aktive Aufforstung, führt in der Regel zu standortangepassten Beständen. Durch Naturverjüngung entstandene Bestände weisen eine höhere genetische Vielfalt innerhalb einer Baumart auf als aufgeforstete Bestände, deren Setzlinge aus einem Forstgarten stammen. Für die Forstpflanzenproduktion in Forstgärten wird das Samenmaterial aus einzelnen zertifizierten Saatgut-Erntebeständen verwendet. Die Auswahl der Erntebestände erfolgt getrennt nach klimatischen Waldwuchsgebieten. Bestände mit hoher Wuchseistung und wirtschaftlich optimalen Schaftformen werden zertifiziert. Im Forstgarten werden unter standardisierten Wuchsbedingungen (gute Böden und Wasserversorgung) und unter Ausschaltungen der Konkurrenz große Mengen genetisch sehr ähnlicher

⁸ D.h. eine Einzelstammweise Nutzung von Stämmen, die bereits den Zieldurchmesser erreicht haben unter gleichzeitiger Pflege und zur Förderung der jüngeren Stämme

Jungpflanzen aufgezogen und mit 2–4 Jahren in den Wald verpflanzt.

Bei der Naturverjüngung wird eine Vielzahl unterschiedlicher Genotypen von den Mutterbäumen durch Wind, Schwerkraft oder Vögel ausgebracht und natürliche Selektionsmechanismen wie Konkurrenz, Trockenheit oder Frost beeinflussen den Keimungs- und Wuchserfolg der Samen.

Durch eine natürliche Selektion kann sich eine diverse und gut angepasste Folgegeneration etablieren (Thom et al. 2017). Durch genetische Diversität bringt dies bessere Voraussetzungen für die Etablierung angepasster Bäume (standortortbezogene Selektion), während bei aktiver Aufforstung dies erst im Rahmen von Durchforstungen erfolgt. Naturverjüngung hat große Bedeutung für größere genetische Vielfalt, ungestörte Wurzelentwicklung, oft niedrigere Kosten, absehbare Entwicklung und geringere Verbißgefährdung. Da bei der reinen Naturverjüngung die resultierende Baumartenzusammensetzung von der wirtschaftlich gewünschten Zielbestockung abweichen kann, wird aber empfohlen, Naturverjüngung mit künstlichen Aufforstungen zu kombinieren (Ruhm, 2017).

Der Erhalt genetischer Diversifizierung und natürlicher Anpassungsprozesse funktioniert allerdings nur dort, wo die Ausgangsbestände noch eine hohe genetische Vielfalt aufweisen. Da jedoch am Beginn des vorigen Jahrhunderts bei der forstlichen Begründung von Waldbeständen durch Aufforstung oder Saat auf unterschiedliche genetische Herkünfte noch weniger Rücksicht genommen wurde, weisen solche künstlich begründeten Bestände heute eine sehr eingeschränkte genetische Vielfalt auf und haben damit ungünstige Voraussetzungen für eine Klimaanpassung durch Naturverjüngung.

Beschränkte Räumung bzw. keine Räumung

Stehendes und liegendes Totholz sowie Altbäume nach Störungen können das Waldmikroklima aufrechterhalten, natürliche Verjüngung durch Schutz vor Hitze und Trockenheit fördern (Enzenhofer and Schrank, 2019; Lachat et al., 2019; Marangon et al., 2021). Wird das Windwurfholz nicht aufgearbeitet (geräumt), können Bodenschäden durch Holzernte oder Befahrung mit schwerem Gerät mit den damit verbundenen Erosions- und Bodenverdichtungsrisiken minimiert

werden. Zudem speichert das belassene Totholz weiterhin langfristig Kohlenstoff im Wald (Magnússon et al., 2016) und bietet Lebensraum und Mikrohabitate für seltene Tier- und Pilzarten. In Österreich ist das Belassen von Schadholz im Wald aufgrund der rechtlichen Regelungen zur Waldhygiene sehr eingeschränkt möglich. Im Schadholz, insbesondere bei Fichte, können Massenvermehrungen von Borkenkäfern entstehen, die auch benachbarte Waldbestände befallen können.

Förderung von Lichtbaumarten

Durch Kalamitäten entstehen unweigerlich große Freiflächen. Diese können zur raschen Wiederbewaldung über Lichtbaumarten (z. B. Eiche, Kiefer, Lärche) oder Pionierbaumarten wie Esche, Birken und Weiden genutzt werden (Ruhm, 2017). Dies trägt auch zu einer Erhöhung der Lebensraumvielfalt im Wald bei. Pioniergehölze haben oft einen geringen wirtschaftlichen Wert und werden oft aktiver zugunsten von Wertholzarten wie Fichte, Tanne oder Lärche zurückgeschnitten. Das Laub der Pionierbaumarten hat aber eine bodenverbessernde Wirkung, sie führen rasch zu einer Überschirmung und Beschattung des Bodens und reduzieren damit die Bodenerwärmung und den Humusabbau und damit die CO₂-Freisetzung aus der Bodenatmung.

Stressfaktoren reduzieren

Der WWF führte in seiner Klimastudie bereits 2007 an, dass Klimawandel für den Wald nur eine zusätzliche Stresskomponente ist, da die Wälder Österreichs bereits durch Immissionen, intensive Nutzung sowie überhöhte Wildstände belastet sind. Eine Reduktion dieser Stressfaktoren könnte auch die Resilienz der Wälder erhöhen.

Pohjanmies et al. (2021) zeigen recht eindrücklich, dass intensive Forstwirtschaft sich negativ auf die Multifunktionalität von Waldbeständen auswirkt und je länger eine intensive forstwirtschaftliche Nutzung ausgeübt wurde, umso geringer ist auch die Resilienz der Bestände, um die ursprünglichen multifunktionalen Fähigkeiten wieder zu erlangen.

DI Felix Montecuccoli zur Waldbewirtschaftung im Betrieb:

Ich habe in den 90er Jahren den Dunkelsteiner Wald mit 70 % Nadelanteil übernommen. Innerhalb von 25 Jahren ist der Nadelanteil drastisch gesunken. Das Altholz wurde reduziert. Wir haben nun 61 unterschiedliche Baumarten. Darauf bin ich sehr stolz, ist aber auch eine große Herausforderung etwa in der Einschulung der Arbeiter. Außer auf großen Störungsflächen verfolgen wir das Konzept der Naturverjüngung mit gezielter Anreicherung, um eine ideale Mischung aus Laub- und Nadelholz sowie Licht- und Schattenbaumarten zu erreichen und so die Resilienz des Waldes zu stärken. Auch was die Fichte betrifft, bin ich mir sicher, dass es in meinem Betrieb auch in 30 Jahren noch Fichten geben wird. Vielleicht aber nur noch 10 %. Es wird immer passende Genotypen, Kleinstandorte oder Bestände mit idealem Mikroklima geben.

Bewirtschaftungsänderungen: Vom Altersklassenwald zum Dauerwald

Grundsätzlich führen Dauerwaldbewirtschaftungskonzepte (bzw. Plenterwaldbewirtschaftung) zu resilienteren Beständen, da diese Praxis des Waldbaus eine standortangepasste gleichgewichtsorientierte Bewirtschaftung forciert (Ammann and Junod, 2012). Da ein Waldbestand in der Dauerwaldbewirtschaftung von Bäumen unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Baumarten aufgebaut wird, reduziert sich das Risiko, dass bei einem Windwurf die gesamte Fläche entwaldet wird. Während im Altersklassenwald durch die schlagweise Nutzung nach jeder Ernte besonnte Schlagflächen ohne Baumbestockung entstehen, bleibt im Dauerwald eine kontinuierliche Waldbedeckung erhalten. Dadurch erhöht sich die Bodentemperatur nicht so stark und führt damit zu keiner verstärkten Freisetzung von CO₂, wie dies bei erwärmtem Boden der Fall ist (Schindlbacher et al., 2011). Diese Bewirtschaftungsform wird auch in der neuen EU-Waldstrategie angestrebt (Europäische Kommission, 2021). Auch die Forschungsergebnisse von Lexer & Seidl (2007) sehen eine Dauerwaldbewirtschaftung in Kombination mit (Laub-)Mischbaumarten als zukunftsfähige Bewirtschaftungsform an. Durch die damit verbundene stärkere (natürliche) Verjüngungsdynamik würden Waldumbaukosten gesenkt. Zugleich sinkt das Kalamitätsrisiko beträchtlich. Die große Herausforderung sind hier allerdings die hohen Wildstände und der damit verbundene Verbiss, der zu Hemmnis in der

Naturverjüngung führt. Zudem erfordert eine Umstellung vom Altersklassenwald zu einem Plenterwald viel waldbauliche Kenntnisse sowie lange Zeiträume von mehreren Jahrzehnten.

Beispiel Dauerwald: Waldbetrieb Ligist in der Steiermark

Der Waldbetrieb Ligist im Besitz des souveränen Malteser-Ritterordens auf der Hebalm bewirtschaftet rund 3.000 ha in Dauerwaldbewirtschaftung und hat sich dem naturnahen Waldbau verschrieben. Bäume werden auf einzelstammweise beurteilt, markiert und geerntet (etwa auf Basis der aktuellen Marktsituation). Die Verjüngung der Bestände erfolgt natürlich durch die Samenbäume im Bestand. Durch gezielte Ausleseprozesse werden ausgewählte Bäume gefördert.

Der für den Betrieb verantwortliche Oberforstmeister Clemens Spörk sieht die Dauerwaldbewirtschaftung als Weg der Zukunft im Klimawandel, auch wenn es eine fachlich qualifizierte Bewirtschaftung erfordert, und sieht auch viele Vorteile (etwa ist ein Dauerwald ästhetisch vorteilhafter in der Erholungsnutzung).

Auch bei Windwurf zeigt sich im Vergleich zum Altersklassenwald ein Vorteil: Im Dauerwald fallen nur einzelne wenige Bäume um, zudem ist im Unterwuchs bereits ausreichend Verjüngung vorhanden, die die Lücke rasch wieder schließt. In einem Altersklassenwald fallen Bäume großflächig und es muss erst aufgearbeitet und aufgeforstet werden. Kommen im Klimawandel Hitze und Trockenheit hinzu, ist zudem aufgrund der prallen Sonne und Trockenheit eine rasche Wiederaufforstung schwierig und der wirtschaftliche Verlust höher.

<https://www.kleinezeitung.at/steiermark/weststeier/5879996/Interview-Oberforstmeister-Clemens-Spoerk-Wald-ist-mehr-als-die>

<https://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=8137>

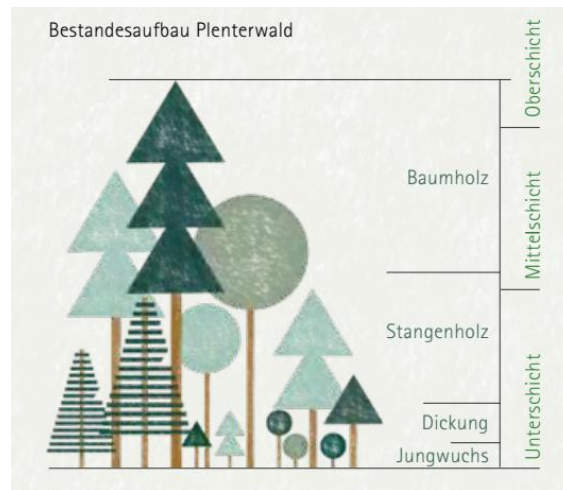


Abbildung 45: Plenterwald Aufbau

Quelle: Plenterwaldfibel, S. 20, Land Vorarlberg.

Österreich hat etwa 3 % Plenterwälder, mit Schwerpunkt im Bregenzerwald, dem oberösterreichischen Alpenvorland und in Teilbereichen des Mühlviertels.



Abbildung 46: Altersklassenwälder aus einer schlagweisen Bewirtschaftung werden hauptsächlich aus gleichaltrigen Bäumen aufgebaut.

Foto: Kirchmeir

Plenterwald als Lösung? KLAR!-Region Vorderwald-Egg im Bregenzerwald

Durch artenreiche Strukturen, eine andauernde Bewaldung und optimale Ausnutzung des Standorts sind Plenterwälder stabiler gegenüber Naturkatastrophen, erfüllen eine permanente Schutzfunktion und verjüngen sich selbst. Zudem kann durch eine regelmäßige Holzernte flexibel auf Marktpreise reagiert werden und es steht eine Vielfalt an Holzsortimenten zur Auswahl. Allerdings erfordert die Bewirtschaftung viel Fachwissen.

Im Klimawandel kann ein Plenterwald Veränderungen besser abfedern. Eine Vorzeigeregion hierfür ist die KLAR!-Region Vorderwald-Egg im Bregenzerwald, wo viele Wälder traditionell so bewirtschaftet werden und dies nun im Klimawandel aktiv forciert wird. Allerdings sind dieser Bewirtschaftungsform je nach Standort und Fachwissen enge Grenzen gesetzt. Über die Plattform „Wald im Klimawandel“ werden Waldbesitzer in diesen Fragen unterstützt.

<https://www.klimawandelanpassung.at/nl43-1/plenter>

<https://www.waldverein.at/bundespraesident-im-aesthetischen-plenterwald/>

Stimmen aus der Forschung: Dauerwälder

Dauerwälder werden zunehmend populärer. Sie bieten eine gute Balance zwischen langfristiger Kohlenstoffspeicherung und Holzproduktion und bieten somit eine wichtige Wirtschaftsoption für die Zukunft. Dauerwald hat mehrere Vorteile: Er bietet eine hohe Resistenz und Resilienz gegenüber Umweltänderungen, hat verschiedene Arten mit diversen Funktionen und eine hohe strukturelle Vielfalt. Zudem eignet sich der Dauerwald für die Starkholzproduktion sehr gut, welches für langlebige Produkte verwendet wird, die langfristig Kohlenstoff speichern.

8.2.2 Außernutzungsstellungen

Wälder speichern tagtäglich durch die Photosynthese der Blätter und Nadeln Kohlenstoff und stellen damit eine naheliegende und effiziente Form des Klimaschutzes (Ibisch et al., 2020). Durch eine Vorratserhöhung wird mehr Kohlenstoff gespeichert und nutzungsfreie Wälder sind biodiversitäts- und struktureicher und somit oft resilienter als schlagweise genutzte Altersklassenwälder. Die derzeitigen Holzvorräte in Österreichs Wirtschaftswäldern sind mit rund 351 Vorratsfestmetern pro Hektar (Österreichische Waldinventur, (Russ, 2019)) deutlich geringer als die Holzvorräte in Naturwäldern (Kirchmeir et al., 2020). Dies unterstreicht die Hypothese eines zusätzlichen Biomassepotenzials durch Vorratsaufbau im Wald von bis zu 34 % (Erb et al., 2018).

Außernutzungsstellungen aus Sicht einer NGO

Die letzten Ur- und Naturwälder in Österreich sind die Schatzkammer der Wald-Artenvielfalt. Kaum noch anzutreffen sind es diese Wälder, die Lebensraum und Nahrung bieten für Arten, die stark gefährdet sind. Etliche Studien zeigen, dass diese alten, extensiv oder nicht genutzten Wälder mit all ihrer Vielfalt an Strukturen und ihren Böden viel Kohlenstoff speichern.

Aufgrund der Bedeutung für die Biodiversität und für den Klimaschutz sollten diese letzten Naturwälder erhalten werden. Als Instrumente stehen Vertragsnaturschutz oder Schutzgebiete zur Verfügung. Außerdem könnte eine neue Waldfunktion im Forstgesetz Erfolge erzielen: eine Klimaschutzfunktion für Naturwälder. Aktuell werden im Forstgesetz vier Funktionen unterschieden: Erholungs-, Wohlfahrts-, Schutz- und die Wirtschaftsfunktion. Diese werden im WEP, dem forstlichen Raumplanungsinstrument ausgewiesen.

Je nach Beurteilung der Waldfläche werden die prioritären Funktionen zugewiesen und diese spielen bei waldbezogenen Planungen eine große Rolle. Mit einer Klimaschutzfunktion würden diese Wälder auch im Waldentwicklungsplan dargestellt werden und ihnen ein öffentliches Interesse an ihrer Erhaltung zugesprochen. Mit den zwei Parametern Kohlenstoffvorrat und Naturnähe könnten diese Wälder definiert werden.

8.2.3 Waldumbau

Ökologischen Waldumbau hin zu mehrschichtigen Laubwald-Mischwäldern forcieren

Wälder, die in ihrer Zusammensetzung, Struktur und Dynamik am ehesten der potenziell natürlichen Waldgesellschaft (PNWG) entsprechen, sind grundsätzlich am anpassungsfähigsten und widerstandsfähigsten gegenüber dem Klimawandel. Allerdings werden sich die PNWG-Grenzen im Laufe des Klimawandels verschieben (Lexer and Seidl, 2007). Wälder mit hohem Laubwaldanteil sind zudem meist weniger anfällig für Windwürfe (Hanewinkel et al., 2015) und leisten einen höheren Beitrag zur Grundwasserneubildung (Ellison et al., 2017). Zudem ist das Innenklima feuchter und reduziert so die Gefahr von Waldbränden (Schelhaas et al., 2003). Fichtenreinbestände bzw. Fichtenmischwälder sollten abgesehen von ihrer natürlichen Verbreitung (montan-subalpine Lagen) nicht mehr außerhalb ihres natürlichen Wuchsgebietes forciert werden. Die Erhöhung des Laubbaumanteils, das für den Holzproduktepool weniger nutzbar ist, hat allerdings dementsprechend Auswirkungen auf die forstwirtschaftliche Wertschöpfungskette, die auf Nadelholz ausgerichtet ist.

Die Tanne hätte zukünftig sicherlich ein großes Potenzial als Nadelholzlieferant. Nadelholz wird auch in Zukunft benötigt – und sollte regional verfügbar bleiben. Die Tanne hat eine sehr breit ökologische Amplitude und kann auf unterschiedlichen Böden und Seehöhen gedeihen, allerdings ist sie sehr verbissanfällig und erreicht ihr Zuwachsoptimum erst mit 90 Jahren, was aus forstwirtschaftlicher Perspektive zu einer späten Hiebsreife führt. Die Tanne kann bis zu 600 Jahre alt werden, was sie zu einem hervorragenden lebenden Kohlenstoffspeicher macht. Aber auch Lärche und Kiefer sind forstwirtschaftlich interessante Alternativen zur Fichte und können zu einer Erhöhung der Artenvielfalt im Wald beitragen.

Viele Projekte fokussieren derzeit also darauf, den Wald der Zukunft zu finden, wie etwa das Beispiel Klimafitter Bergwald Tirol, wo ein Fichtenwald in einen Mischwald umgebaut wurde (<https://www.klimaalps.eu/klimatope/bergwald-im-klimawandel>).

Auch die Bayrischen Staatsforste forcieren einen Waldumbau entlang

eines 4-Baum-Konzeptes für klimastabile Zukunftswälder und um auf den Druck auf die Fichte zu reagieren. Bis 2035 sollen alle nicht natürlichen Nadelholzbestände gezielt umgebaut werden (ca. 100,000 ha). Ziel sind resiliente und stabile Wälder mit verschiedenen Mischbaumarten, hohem Strukturreichtum, wertvollen ökologischen Elementen, die in Dauerwaldkultur bewirtschaftet werden. In den allgemeinen Bestockungszielen wird neben einer Reduktion des Fichtenanteils von 43 % auf 35 % und des Kiefernanteils von 16 % auf 9 % gleichzeitig die Erhöhung des Tannenanteils von 2 % auf 5 % und der Buche von 18 % auf 26% angestrebt. Die Ernte erfolgt im Femelschlag (also horstweise innerhalb des Bestandes) (Mages, 2017).

Einführung neuer Baumarten

Die Einführung neuer Baumarten als Ergänzung/Ersatz ist häufig, aber mit großen ökologischen Risiken, behaftet. Vor allem die Douglasie wird oft als klimaresistente Alternative zur Fichte genannt, da dieser Nadelholzbaum trocken- und hitzeresistenter als die Fichte ist und zugleich forstlich günstige Wuchseigenschaften zeigt. Derzeit sind rund 0,2 % der Waldfläche mit Douglasien bestockt. Die aus Nordamerika stammende Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) wird versuchsweise seit über 100 Jahren in Mitteleuropa auf kleineren Flächen angebaut. (Andere) Douglasienarten verschwanden in Mitteleuropa mit der letzten Eiszeit. Douglasien weisen auch in Mitteleuropa eine sehr erfolgreiche Naturverjüngung auf. Daher sieht das deutsche Bundesamt für Naturschutz, potenziell problematische ökologische Folgen sowie noch unbekannte Verdrängungseffekte. So könnte sie in direkte Konkurrenz zur heimischen Rotbuche treten. Mögliche Herausforderungen lassen sich dennoch nicht abschätzen, da die Wechselwirkungen vielfältig sind. So ist die Douglasie in ihrem Ursprungsgebiet sehr windwurfresistent, in Mitteleuropa unter Beimischung von Buche aber nicht. Hier wird vermutet, dass hier etwa durch eine Wurzelkonkurrenz eine geringere vertikale und horizontale Ausdehnung und somit die Windstabilität verringert wird (Kownatzki et al., 2011). Zudem können Schadorganismen aus dem Herkunftsgebiet wie der Douglasienborkenkäfer oder Anpassungen heimischer Schadinsekten wie der Kiefernprozessionsspinner (Roques et al., 2006) auftreten. Dies unterstreicht vor allem, dass Interaktionen einer solchen ökosystemaren Veränderung unvorhersehbar sind. Aus diesem Grund sind neue

Baumarten, auch wenn Standort- und Klimaeignung optimal erscheint, auch immer als Risiko zu sehen. Englisch (Englisch, 2021) warnt zudem bei Douglasienreinbeständen und einer Umtriebszeit unter 80 Jahren vor einer Standortdegradierung.

Von der Forstwirtschaft und in Fachkreisen wird die Douglasie wie auch die Roteiche und Strobe durchaus als Alternative gesehen, da es bereits jahrzehntelange Erfahrungen gibt.

Damit unweigerlich ist auch die Diskussion um invasive Neobiota verknüpft, in Österreich etwa rund um Robinie, Götterbaum, Douglasie und Blauglockenbaum). In Deutschland ist die Douglasie auf der Schwarzen Liste der invasiven Arten gelandet, während sie aus forstwirtschaftlicher Sicht aber vorteilhaft eingestuft wird (Englisch and Starlinger, 2021).

Grundsätzlich ist es fast unmöglich, Eingriffe in das komplexe Ökosystem Wald in allen Facetten zu erfassen, und es ist ein Risiko. Ein historisches Beispiel war etwa die Zirbenaufforstung in Fribourg in der Schweiz, wo 1885–1952 450,000 Zirben als Erosionsschutz gepflanzt wurden, Anfang des 21. Jahrhunderts waren aber davon nur noch 650 Zirben vorhanden (0.15 %) (Fragrière et al., 2021) (Fragrière et al., 2021) Ein weiteres Beispiel ist der Blasenrost/Strobenrost, eine Pilzart, die eine Johannisbeerart als Wirt benötigt und der ursprünglich nur im Verbreitungsgebiet der resistenten Zirbe vorkommt. Mit Verbreitung des Anbaus der Strobe (*Pinus strobus*) verbreitete sich dieser Pilz allerdings intensiv in Europa und in weiterer Folge in den USA. Heute ist Strobenrost die bedeutendste Krankheit fünfnadeliger Kiefernarten in den USA (Geils and Vogler, 2011).

Erfahrungen mit eingeschleppten Krankheiten und Schädlingen wie dem Erreger des Eschentriebsterbens oder dem Asiatischen Eschenprachtkäfer zeigen, dass so auch ungewollt heimische, eigentlich gut angepasste Arten, rasch existenziell bedroht werden können (Krumm and Vitkova, 2016). Auch gegen Krankheiten und Schadinsekten sind ungleichaltrige, gemischte Bestände weniger schadensanfälliger als gleichaltrige Monokulturen.

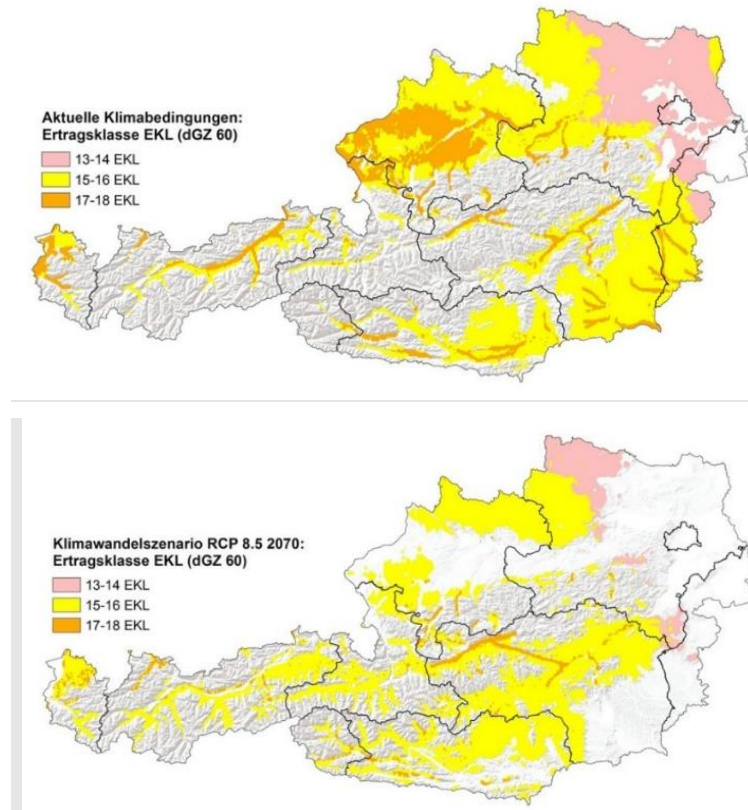


Abbildung 47: Wachstumspotenzial der Douglasie gegenwärtig sowie im Szenario RCP 4.5 und RCP 8.5

Quelle: Eckhart und Hasenauer (2019)

Forcierung trockenresistenter Genotypen einheimischer Baumarten

Die intraspezifische Variabilität der wichtigsten Baumarten ist ein großes, noch zu wenig genutztes Potenzial. Dies könnte von der Forstwirtschaft noch stärker genutzt werden (etwa für trockenresistente Genotypen).

Großes Potenzial bieten heimische Eichenarten, Hainbuche, Linde und Edellaubbaumarten, da diese hohe Trocken- und Temperaturleranz und relativ großes Anpassungspotenzial haben (Ruhm, 2017).

8.3 Einfluss auf Klimaanpassungsmaßnahmen auf andere Ökosystemleistungen

In einer Bewertung von drei Bewirtschaftungsszenarien für die Österreichischen Bundesforste konnte gezeigt werden, dass ein Naturschutz-orientiertes Bewirtschaftungskonzept in Summe deutlich höhere volkswirtschaftliche Ökosystemleistungseffekte erzielt als eine Intensivierung der forstwirtschaftlichen Nutzung (Getzner, 2018; Getzner et al., 2016).

Ergebnisse einer Computermodellierung für vier europäische Beispielsbestände zeigen, dass sich eine Nutzungsaufgabe in 50 % der Bestände positiv auf die summarische Bereitstellung der Ökosystemleistungen Holzproduktion, Kohlenstoffspeicherung, Biodiversität und Schutz vor Steinschlag und Lawinen auswirkt (Langner et al., 2017).

Für den Beispielsbestand im Montafon zeigte die Außernutzungsstellung zwar den Ausfall der Holzproduktion, aber die höchste Kohlenstoffspeicherung verglichen mit den sechs anderen Bewirtschaftungsszenarien. Bei Steinschlag- und Lawinenschutz liegt die Außernutzungsstellung auf Platz 2 im Vergleich der Bewirtschaftungsszenarien und liegt damit nur 2,5 Prozentpunkte unter dem höchsten Wert, der durch ein Bewirtschaftungsszenario mit unregelmäßigen, großen Nutzungsflächen in einer Umtriebszeit von 250 Jahren erreicht wird. Überraschend ist, dass die Außernutzungsstellung bei der Ökosystemleistung Biodiversität ebenfalls nur auf Platz 2 liegt, was eventuell dem Modellansatz geschuldet ist.

Auch eine Studie für Ostösterreich zeigt, dass das Bewirtschaftungsszenario Nutzungsaufgabe im Vergleich zu „Business as usual“ auf einem größeren Flächenanteil die vier untersuchten Ökosystemleistungen bereitstellen kann (Irauschek et al., 2017).

Diese Ergebnisse korrelieren auch mit der Studie von Pohjanmies et al. (2021), die zeigt, dass intensive Forstwirtschaft sich negativ auf die Multifunktionalität von Waldbeständen auswirkt.

Aus gesellschaftspolitischen Überlegungen ist es für Österreich kein realistisches oder anzustrebendes Modell, auf der gesamten Waldfläche die Nutzung einzustellen. Die Zielsetzung der Europäischen

Biodiversitätsstrategie, 10 % der Landfläche als strenge Schutzgebiete auszuweisen, steht nicht im Widerspruch zur Multifunktionalen Waldwirtschaft und unterstützt die Erreichung der Klima- und Biodiversitätsziele. Derzeit sind allerdings erst ca. 1 % der Österreichischen Waldfläche unter einem strengen Naturschutzregime ausgewiesen (Schwarzl and Aubrecht, 2004).

8.4 Potenzielle Gesprächspartner:innen und Expert:innen

- Dr. Eckhart Senitza, Waldbewirtschafter aus Kärnten mit Dauerwaldbewirtschaftung
- DI Felix Montecuccoli, Waldbewirtschafter in Niederösterreich und Vorstand der Land & Forstbetrieb Österreich
- Dr. Rudolf Freidhager: Vorstand der Österreichischen Bundesforste
- Dr. Hanns Kirchmeir, E.C.O. Institut für Ökologie (Waldmodellierung)
- DI Martin Höbarth, Landwirtschaftskammer Österreich (Interessensvertretung Forstwirtschaft)
- Dr. Martin Donat, Landesumweltanwalt Oberösterreich (Forststraßen, Erschließung)

9 NOTWENDIGE POLITISCHE ENTSCHEIDUNGEN UND GESELLSCHAFTLICHE VERÄNDERUNGEN

9.1 Kernbotschaften

- Die Klimaziele in der Österreichischen Waldstrategie 2020+ sind sehr niedrig, da sie das Kohlenstoffsinkenpotenzial des Waldes nicht adäquat in Betracht ziehen.
- Die auf neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen basierende europäische Waldstrategie 2030 spricht diese Senkenfunktion an. Eine Integration dieser neuen Zielsetzungen auf österreichischer Ebene in Strategien, Gesetze und Förderschienen ist dringlich.
- Um die Waldeigentümer:innen für die Kohlenstoff-Speicherleistung von Wäldern adäquat zu entgelten, sind Kohlenstoffzertifikate zu entwickeln, die am Kohlenstoffmarkt handelbar sind.
- Parallel braucht es Mechanismen, die sicherstellen, dass eine Reduktion der Holzernte in Österreich nicht durch Holzimporte egalisiert wird.
- Die Förderung der öffentlichen Hand von Biomasseanlagen muss zugunsten von anderen treibhausgasfreien Energiequellen (Solar, Wind, Wasser) deutlicher reduziert werden, um den Treibhausgasausstoß effektiv zu senken.
- Der in der EU-Biodiversitätsstrategie 2030 geforderte gesetzliche Schutz von 30 % der Landfläche, 10 % davon mit strengem Schutz (Außernutzungsstellung) als Klima- und Biodiversitätsschutzwälder, ist rasch umzusetzen.
- Allgemein muss das Bewusstsein gestärkt werden, dass Wald Teil der Lösung ist, aber keinen Ersatz für andere Maßnahmen zu einer massiven Reduktion der Treibhausgasemissionen darstellt.

9.2 Klimawandel und Biodiversitätskrise – zwei globale Herausforderungen

Sowohl der Klimawandel als auch die globale Biodiversitätskrise lassen sich isoliert auf nationaler Ebene nicht mehr lösen. Die Kohlenstoffspeicherstätten in Ozeanen, Wäldern und der Atmosphäre stehen im permanenten Austausch, der keine nationalen Grenzen kennt. Die wirtschaftlichen Verflechtungen sind auf globaler Ebene so eng, dass Entscheidungen über Produktionsbedingungen oder Besteuerung von Umweltbelastungen in einem Land leicht zur Verlagerung der Produktion in ein anderes Land führen. Daher ist es notwendig, übernationale Vereinbarungen und Regeln zu entwickeln, um einen gemeinsamen Weg aus der Krise zu finden und nicht das Problem zwischen Nationalstaaten zu verschieben.

Das Kyoto-Protokoll, die Pariser Klimaziele und die Konvention zum Erhalt der biologischen Vielfalt haben bindende Zieldefinitionen auf globaler Ebene festgelegt. Die Agenda 2030 mit ihren 17 Zielen für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, SDGs) hat zwar nur Empfehlungscharakter, legt aber einen globalen Plan zur Förderung nachhaltigen Friedens und Wohlstands und zum Schutz unseres Planeten vor, der explizit auch Klima und Artenvielfalt adressiert (Ziele 13,14 und 15).

9.3 Die Europäische Ebene

Wesentlich konkreter werden die Zielsetzungen und rechtlichen Rahmenbedingungen auf Ebene der Europäischen Union.

Im Sommer 2021 haben das EU-Parlament und der Rat der EU das EU-Klimagesetz beschlossen. Darin verpflichtet sich die EU mit ihren Mitgliedsstaaten bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen (keine Netto-Treibhausgasemissionen). Für das Jahr 2030 wurde das Zwischenziel gesetzt, die Netto-Treibhausgasemissionen um mindestens 55 % gegenüber 1990 zu senken.

Als Instrument für die Umsetzung dieser Ziele hat die Europäische Kommission das „Fit for 55-Paket“ beschlossen.

Neben dem EU-Klimagesetz sind zwei EU-Strategien für den Wald im

Zusammenhang mit Klima und Biodiversität von Bedeutung:

Die EU-Biodiversitätsstrategie, die im Sommer 2020 beschlossen wurde, und die EU-Forststrategie, die im Sommer 2021 beschlossen wurde.

Beide Dokumente haben keinen direkten rechtlich bindenden Charakter, aber eine klare politische Zielsetzung, um Europa aus der Klima- und Biodiversitätskrise zu steuern.

Eine markante Zielsetzung in der Europäischen Biodiversitätsstrategie ist die Formulierung konkreter Flächenziele im Naturschutz: für 30 % der Landes- und Meeresfläche soll ein gesetzlicher Schutz ausgewiesen werden. Davon sollen ein Drittel (10 % der Gesamtfläche) unter ein strenges Schutzregime gestellt werden. Darin sollen alle verbleibenden Primär- und Urwälder der EU geschützt werden. Diese Schutzgebiete sollen effektiv verwaltet und durch ökologische Korridore vernetzt werden.

Weiters sollen degradierte Lebensräume wieder hergestellt werden und insgesamt drei Milliarden zusätzliche Bäume unter Beachtung ökologischer Prinzipien gepflanzt werden.

Die EU-Biodiversitätsstrategie 2030 ist darauf ausgerichtet, einen tiefgreifenden Wandel zu ermöglichen. Mit der Strategie soll das Zusammenwirken aller Beteiligten im Bereich Biodiversität angestoßen werden, um sicherzustellen, dass die Mitgliedstaaten ihre Verpflichtungen aus der Strategie in ihre nationale Politik integrieren.

Noch konkreter auf den Themenbereich Wald fokussiert die EU-Waldstrategie 2030.

Sie streicht den Wald als wichtigen Verbündeten im Kampf gegen den Klimawandel und gegen den Verlust der biologischen Vielfalt heraus. Die Funktion der Wälder als Kohlenstoffsенке einerseits und ihre positive Auswirkung auf das Lokalklima und ihre Schutzfunktion andererseits werden klar angesprochen: Da die europäische Landfläche von Natur aus fast vollständig von Wald bedeckt wäre, beherbergen Waldökosysteme einen großen Teil der biologischen Vielfalt Europas und erfüllen weitere wichtige Funktionen für die Gesellschaft wie Wasserregulierung, die Bereitstellung von Lebensmitteln, Arzneimitteln und Materialien, Katastrophenvorsorge und -kontrolle, Bodenstabilisierung und Erosionskontrolle sowie Luft- und

Wasserreinigung. Wälder sind ein Ort der Erholung, der Entspannung und des Lernens und sichern Existenzgrundlagen.

Die EU-Waldstrategie 2030 ist eine Leitinitiative des europäischen Green Deals und baut auf der EU-Biodiversitätsstrategie 2030 auf. Sie soll dazu beitragen, die EU-Klimaziele zu erreichen und die Verpflichtung der EU umzusetzen, den Abbau von Emissionen durch natürliche Senken gemäß Klimagesetz zu steigern.

Die Strategie enthält eine Vision und konkrete Maßnahmen zur Steigerung der Quantität und Qualität der Wälder in der EU und zur Stärkung ihres Schutzes, ihrer Widerstandsfähigkeit und für ihre Wiederherstellung. Sie zielt darauf ab, Europas Wälder an neue Bedingungen, Wetterextreme und die großen Unsicherheiten infolge des Klimawandels anzupassen. Dies wird als entscheidende Voraussetzung dafür eingestuft, dass Wälder weiterhin in der Lage sind, ihre sozioökonomischen Funktionen zu erfüllen und dynamische ländliche Gebiete und florierende ländliche Gemeinschaften zu gewährleisten.

Die Strategie enthält auch Maßnahmen zur Verbesserung des Konzepts der nachhaltigen Waldbewirtschaftung in Bezug auf klima- und biodiversitätsbezogene Aspekte, fördert klima- und biodiversitätsfreundliche Waldbewirtschaftungsmethoden und sieht die Festlegung verbindlicher Ziele für die Wiederherstellung der Natur in Wäldern im Rahmen des geplanten EU-Gesetzes zur Wiederherstellung der Natur vor, das in der EU-Biodiversitätsstrategie für 2030 angekündigt wurde.

Die Strategie sieht auch die Entwicklung von Zahlungsregelungen für Waldbesitzer:innen sowie Waldbewirtschafter:innen vor, die Ökosystemdienstleistungen erbringen, z. B., indem sie Teile ihrer Wälder unberührt lassen. Mit der Strategie werden die Mitgliedstaaten unter anderem aufgefordert, im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) derartige Zahlungsregelungen für Ökosystemdienstleistungen für Waldbesitzer:innen sowie Waldbewirtschafter:innen einzuführen, um Kosten und Einkommensverluste zu decken.

Zur Strategie gehört auch ein Fahrplan für die Anpflanzung von mindestens 3 Milliarden zusätzlicher Bäume in der EU bis 2030 unter uneingeschränkter Achtung der ökologischen Grundsätze.

Weiters sollen Datenerhebung und Dokumentation des Waldzustandes

über die Grenzen der Mitgliedsstaaten hinweg vereinheitlicht werden.

Darüber hinaus plant die Kommission strengere Durchsetzungsmaßnahmen, um sicherzustellen, dass die EU-Mitgliedstaaten die EU-Rechtsvorschriften über den Schutz der Wälder und die Holzvermarktung anwenden. Dies geschieht zum Beispiel gerade im Rahmen der Novellierung der Europäischen Biomasseverordnung.

Hinsichtlich der Diskussion, ob die positiven Treibhausgas effekte größer sind, wenn mehr oder weniger Holz geerntet wird, stützt sich die EU-Kommission auf jüngste wissenschaftliche Studien. Gemäß diesen Studien gilt es als unwahrscheinlich, dass der potenzielle zusätzliche Nutzen, der aus geernteten Holzprodukten und Materialsubstitution entsteht, die mit der erhöhten Ernte verbundene Verringerung der Nettosenke des Waldes bis 2050 kompensiert. Damit wird implizit ein Vorratsaufbauszenario mit einer Reduktion der Holznutzungsintensität als die effektive Klimastrategie empfohlen.

Durch eine Verlängerung der Verwendungsdauer und einer optimierten kaskadischen Holznutzung soll der Verknappung der Ressource Holz am Markt entgegengewirkt werden.

9.4 Politische Zielsetzungen auf nationaler Ebene

Auch auf österreichischer Nationalebene gibt es eine Waldstrategie 2020+.

Der aktuelle forstpolitische Rahmen wird weitgehend in der Österreichischen Waldstrategie 2020+ (B.M.N.T., 2018) abgebildet. Sie wurde 2016 im Rahmen des Österreichischen Walddialogs gemeinsam mit walddrelevanten und walddinteressierten Akteur:innen erarbeitet und soll als walddpolitischer Eckpfeiler zur Sicherstellung und Optimierung einer nachhaltigen Walddbewirtschaftung in Österreich dienen. Sie stellt eine Leitlinie für das kurz-, mittel- und langfristige forstpolitische Geschehen in Österreich dar, ist aber 4 Jahre vor der EU-Waldstrategie 2030 entstanden und reflektiert daher nicht die Umsetzung der neuen europäischen Zielsetzungen.

Die sieben Handlungsfelder der Österreichischen Waldstrategie 2020+ orientieren sich an den MCPFE-Kriterien für eine nachhaltige

Forstwirtschaft (MCPFE: Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe). Der aktuelle Bericht aus dem Österreichischen Walddialog (ÖWAD) (angenommen im Mai 2017) liefert ein Indikatoren-Set für nachhaltige Walddbewirtschaftung mit Ist- und Soll-Größen (Linser, 2017). Dieses Indikatorenset basiert eben auf den sieben Handlungsfeldern (Klimaschutz, Gesundheit und Vitalität, Produktivität, Biologische Vielfalt, Schutzfunktion, gesellschaftliche Funktion, internationale Verantwortung) und liefert Zielgrößen, um die Zielerreichung überprüfen zu können.

Die Ziele und Zielwerte der Waldstrategie basieren nicht ausschließlich auf fachlicher Expertise, sondern stellen vielmehr das Verhandlungsergebnis der ÖWAD-Arbeitsgruppe dar. Die Maßnahmen basieren sehr stark auf bestehenden Projekten und Vorhaben, die den Zielen zugeordnet wurden, während konkrete zusätzliche Maßnahmen zur Erreichung dieser Ziele nur in sehr geringem Umfang formuliert wurden. Die Ziele werden über den ÖWAD-Kriterienkatalog evaluiert und sollen von den Akteur:innen des Walddialogs umgesetzt werden. Die Strategie ist sehr wirtschaftsorientiert. Die vielfältigen Zielsetzungen sind zum Teil in sich widersprüchlich (z. B. Erhöhung der biologischen Vielfalt bei gleichzeitig stärkerer Nutzung und Forcierung von Holzprodukten) bzw. Erhalt des C-Speicherpotenzials bei gleichzeitiger Erhöhung des Einschlags). Durchgängig ist jedoch die Entwicklung der Wälder hin zu standortgerechten Walddbaumarten und die Umsetzung einer naturnahen Walddbewirtschaftung. Vor allem die Zielsetzungen im Bereich Biologische Vielfalt bleiben eher vage und beinhalten oft nur „Prüfungen von Optionen“, „ausgewählte Flächen“, „in Kooperation“. Eine Zielerreichung für einige der formulierten Ziele scheint sehr ambitioniert. Eine Zielkonfliktanalyse erfolgte ebenso wenig wie die Darstellung konkret formulierter Ziele und entsprechender Finanzierungs- und Umsetzungsinstrumente.

9.5 Wichtige Schritte zur Zielerreichung in Österreich

Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Österreich der letzten Jahrzehnte zeigt, dass im Unterschied zu anderen europäischen Staaten noch keine Trendumkehr erreicht wurde (siehe Kapitel 2.7). Die gesellschaftliche Bedeutung der Erreichung der international vereinbarten Klima- und Biodiversitätsziele erfordert ein ambitionierteres

Handeln auf nationaler Ebene. Die derzeit national ausverhandelten Strategien und eingesetzten (Förder-) Instrumente zeigen (noch) keine Wirkung auf den Treibhausgasausstoß. Die Österreichische Waldstrategie 2020+ bleibt in ihren Zielsetzungen hinsichtlich der Beiträge zu den Klimazielen, insbesondere in der Ausschöpfung des Senkenpotenzials deutlich hinter den europäischen Zielsetzungen zurück und es besteht der Bedarf nachzuschärfen.

Nicht nur die Reduktion der Nutzung fossiler Energie sollte Priorität haben, sondern auch die Reduktion der Netto-Treibhausgasemissionen sowie die optimale Nutzung biologischer Systeme, um CO₂ aus der Atmosphäre langfristig in (Holz-) Biomasse zu binden.

Während bei der Energiegewinnung mehrere Optionen nachhaltiger Energieerzeugung zur Auswahl stehen (Solar-, Windenergie, Wasserkraft) und technische Prozesse zur Energiespeicherung und -verteilung (e-fuels, Wasserstoff-Brennstoffzellen u. a. m.) verfügbar sind oder kurz vor ihrer Serienreife stehen, gibt es noch keine technischen Alternativen, die mit vertretbarem Energieaufwand Treibhausgase wie CO₂ aus der Atmosphäre entnehmen und in einer klimaneutralen Form speichern können. Das können derzeit nur biologische Ökosysteme, vor allem Moore und Wälder.

Daher muss dieser Speicherfunktion gegenüber der energetischen und stofflichen Substitutionsfunktion Priorität eingeräumt werden.

In den nächsten knapp drei Jahrzehnten bis 2050 liegt ein schwieriger technischer und gesellschaftlicher Transformationsprozess hin zu einer klimaneutralen Wirtschaft vor uns, in dem alle zur Verfügung stehenden Handlungsoptionen bestmöglich kombiniert werden sollten.

Beim Ausstieg aus fossilen Brennstoffen muss die Priorität bei Technologien liegen, die keine Treibhausgase freisetzen. Bei der energetischen Nutzung von Holzbiomasse wird etwa gleich viel CO₂ pro Gigawatt (GW) Energie freigesetzt wie bei der Kohleverbrennung, während Solar-, Windenergie oder Wasserkraft praktisch keine Treibhausgase emittieren. Da jedoch auch diese Energieformen oft starke Eingriffe in Ökosysteme darstellen und der Energiebedarf zudem weiter wächst, ist eine zusätzliche Steigerung der Effizienz sowie die massive Einsparung von Energie unausweichlich.

Holzbiomasse wird zwar auch als klimaneutrale Energiequelle

gehandelt, weil auf der beernteten Waldfläche wieder Holz nachwächst und potenziell (falls sich die Wuchsbedingungen durch den Klimawandel nicht verschlechtern) dieselbe Menge CO₂ wieder gebunden werden kann, werden fossile Brennstoffe jedoch durch Solar-, Windenergie oder Wasserkraft ersetzt, können die Bäume im Wald verbleiben und weiter Kohlenstoff binden, damit als zusätzliche positive Kohlenstoffsinken wirken und darüber hinaus einen Beitrag zur Biodiversitätssicherung leisten.

Um die Waldfunktion der Kohlenstoffsinke durch Vorratsaufbau auch wirtschaftlich interessant zu machen, muss es für Waldeigentümer:innen möglich sein, diese Speicherleistung auch wirtschaftlich zu verwerten. Kohlenstoffzertifikate wären dafür ein geeignetes Instrument, das derzeit aber noch nicht verfügbar ist. Der 10-Jahresschnitt der (2011-2020) Preise für Sägerundholz Fichte liegt beispielsweise bei 90 €/Fm (mit einer derzeitigen Spitze von 114€/FM) (LKÖ, 2021). Wenn CO₂-Emissionen mit 50 Euro pro t besteuert würden, könnte der Zertifikatspreis in ähnlicher Größenordnung angesiedelt werden. Umgerechnet auf den Festmeter Holz wären das ca. 45 Euro. Da bei der Kohlenstoffspeicherung im Wald weder Ernteverluste – der Verlust bei der Holzernte von verwertbarem Holz liegt normalerweise bei 15–30 % – noch Erntekosten (20–30 €/m³) anfallen, können Kohlenstoffzertifikate eine attraktive Alternative, vor allem gegenüber der Nutzung von schlechteren Holzqualitäten oder schwer bringbaren Lagen sein.

Da die biologischen Speicherkapazitäten der österreichischen Wälder selbst bei einer Halbierung der jährlichen Erntemengen in den nächsten 50–70 Jahren nicht ausgeschöpft werden und der überwiegende Teil der Waldbestände weit von seiner natürlichen Altersgrenze entfernt ist, könnte der Wald bis 2050 (Zeithorizont Pariser Klimaziele) fast uneingeschränkt als Kohlenstoffsinke genutzt werden und kontinuierlich Kohlenstoff sequestrieren.

Wenn der technologische und gesellschaftliche Wandel 2050 erfolgreich zu einer klimaneutralen Wirtschaft geführt hat, kann die Waldbewirtschaftungsstrategie wieder geändert und bei Bedarf die in den dreißig Jahren aufgebauten Vorräte einer neuen Verwendung zugeführt werden oder zu Gunsten der Biodiversität im Wald verbleiben.

Aus der dargestellten Sachlage lassen sich folgende prioritäre Handlungsfelder für die politischen Entscheidungsträger:innen in

Österreich ableiten:

- Integration der Zielsetzungen der europäischen Waldstrategie 2030 auf österreichischer Ebene in Strategien, Gesetze und Förderschienen.
- Entwicklung von Kohlenstoffzertifikaten für die Abgeltung der Kohlenstoff-Speicherleistung von Wäldern für Waldbesitzer:innen und Waldbewirtschafter:innen
- Anpassung der Förderinstrumente zugunsten der treibhausgasfreien Energiequellen (Solar, Wind, Wasser) und Reduktion des Ausbaus der Biomassenutzung
- Gesetzlicher Schutz von 30 % der Waldfläche, davon ein Drittel (10 % der Waldfläche) unter strengem Schutz (Außernutzungsstellung) als Klima- und Biodiversitätsschutzwälder
- Entwicklung von Mechanismen, die sicherstellen, dass eine Reduktion der Holzernte in Österreich nicht durch Holzimporte egalisiert wird.

Um den Wald und seinen multifunktionalen Nutzen für die Gesellschaft zu schützen, müssen die Pariser Klimaziele erreicht werden – und der Wald kann dazu einen signifikanten Beitrag leisten.

9.6 Positionen ausgewählter österreichischer Stakeholder

Die folgenden Statements basieren auf den Interviews und geben die zusammenfassend die Schlüsselpositionen der Interviewpartner:innen wieder.

Dr. Rudolf Freidhager (Österreichische Bundesforste AG)

Für eine Planbarkeit des forstwirtschaftlichen Handelns ist es von größter Bedeutung, dass wir die Einhaltung der Pariser Klimaziele erreichen. Solange wir im Rahmen der 1,5 °C Erderwärmung (global) bleiben, ist es möglich, die Auswirkungen auf die Waldökosysteme abzuschätzen und darauf mit gezielten waldbaulichen Maßnahmen zu reagieren. Die Österreichische Bundesforste AG hat im Hinblick auf die zukünftigen Entwicklungen die Handlungsstrategie Ökologie & Ökonomie entwickelt, die eine ausgewogene Balance zwischen Stärkung der Waldökosysteme und forstwirtschaftlichem Ertrag sowie der Bereitstellung weiterer Leistungen des Waldes für den Menschen vorsieht. Für jeden einzelnen Waldort wurden die langfristigen

Baumartenzusammensetzungen festgelegt und auf großflächige Kahlschlagnutzung wird sukzessive verzichtet. Der Anteil an Buche, Tanne, Lärche und Kiefer wird sukzessive erhöht werden, während der Fichtenanteil deutlich zurückgeht. Gastbaumarten wie die Douglasie werden nur eine untergeordnete Rolle bei der zukünftigen Bestockung spielen. Die Naturverjüngung wird gefördert und damit die genetische Vielfalt innerhalb der Baumarten erhalten, natürliche Ausleseprozesse werden genutzt und die Kosten gesenkt.

Gleichzeitig soll auch die Biodiversität der Waldbestände der Österreichischen Bundesforste gefördert werden. Durch das Belassen von Habitatbäumen, Altholzinseln und das Belassen von einzelnen Totholzstämmen werden Kleinlebensräume und ökologische Nischen für seltene Tierarten wie Totholzkäfer, Fledermäuse oder Eulen erhalten und geschaffen.

Wenn jedoch die Pariser Klimaziele und damit eine Eindämmung der globalen Erwärmung nicht erreicht werden, verlässt man den planbaren Rahmen einer Waldbewirtschaftung. Die Natur braucht den Menschen nicht. Sie wird entsprechend reagieren und sich an neue Klimasituationen anpassen, es werden neue Waldbilder oder auch Lebensräume ohne Bäume entstehen. Für die Natur an sich ist das keine Katastrophe, weil sie keine Ziele verfolgt und sie sich immer schon an Veränderungen angepasst hat. Für uns Menschen jedoch, die wir unsere Lebensweise an das Vorhandensein der bekannten Ökosystemleistungen des Waldes wie die Bereitstellung von Bau- und Konstruktionsmaterial, der Schutz von Infrastrukturen, vor Naturgefahren oder die Verfügbarkeit von kühlen Erholungsräumen nahe den Ballungszentren angepasst haben, werden solche Veränderungen sehr unangenehm.

Man darf auch nicht vergessen, dass der Rohstoff Holz einer der wenigen ist, der nicht nur praktisch klimaneutral hergestellt werden kann, sondern in seiner Produktion einen hochwertigen Lebensraum für Tiere, Pflanzen und Menschen bereitstellt. Welcher andere Rohstoff kann das von sich behaupten? Für eine nachhaltig lebende Gesellschaft wird daher die Bereitstellung und Nutzung eines solchen Rohstoffs eine wichtige Bedeutung zukommen.

Dr. Mathias Neumann (Universität für Bodenkultur)

Der Wald ist eines der wichtigsten Geo-Engineering-Tools, denn im Laufe der Erdgeschichte haben Pflanzen das Klima entscheidend verändert. Alleine deswegen sind Wälder, die einen großen Teil der Erdoberfläche bedecken, entscheidend, um das Klima zu beeinflussen. Warum nutzen wir diese Möglichkeit nicht zuerst, bevor wir darüber nachdenken, Spiegel im Weltall zu bauen oder Wolkenbildung durch Ausbringen von Sulfat zu versuchen. Mir erscheint ein konsequenter breiter Kohlenstoffaufbau wichtig, und das nicht nur im Wald, sondern auch in der Zivilisation.

Mag. Karin Enzenhofer (WWF Österreich)

Der Wald leistet enorm viel. Denken wir nur an den Schutz vor Naturgefahren, er fungiert als Wasserspeicher, reguliert das Klima (auch lokal), speichert Kohlenstoff, produziert Sauerstoff, ist Holzlieferant, Pilz- und Beerenlieferant, Erholungsort und Lebens- und Nahrungsraum für viele Arten. Er ist also Lebensgrundlage - für uns und viele Mitgeschöpfe.

Ist der Wald in der Krise, sind auch wir in der Krise. Aktuell ist der Wald nicht nur von der Klimakrise betroffen, sondern auch von der Biodiversitätskrise. Durch beide Krisen sind unsere Lebensgrundlagen bedroht und daher müssen beide bekämpft werden. Sie hängen eng miteinander zusammen und sie dürfen nicht gegeneinander ausgespielt werden oder eines wichtiger als das andere erachtet werden.

Unbedingt erforderlich ist, dass die Emissionsreduktion an erster Stelle steht. Auch die Verringerung des Ressourcenverbrauchs (auch von Holz) muss uns beschäftigen.

Ziel muss sein, verschiedenste Instrumente anzuwenden und nachhaltiges Risikomanagement zu betreiben: Wenden wir nur eine Strategie an wie beispielsweise Substitution, so gehen wir durch viele Annahmen, die dahinterstehen, ein großes Risiko ein. Zudem birgt es die Gefahr große Teile der Biodiversität im Wald zu verlieren, wenn wir nur die effizienteste Nutzung von Holz im Blick haben. Der Wald als Lieferant von vielfältigen Ökosystemleistungen muss in den Fokus gerückt werden - Lenkungsmechanismen sind unabdingbar.

Außerdem braucht es im Wald selbst einen klugen Mix aus Nutzung (für langlebige Holzprodukte und Substitution) und Aufbau von Kohlenstoffsinken! Die zukünftige Rolle des Waldes muss sein, so lange wie möglich die Kohlenstoffsénke zu halten und die Bewirtschaftung möglichst naturnah zu gestalten. Resiliente, naturnahe Wälder sind das Ziel.

Die Balance zu finden zwischen Nutzung und Erhaltung ist eine große Herausforderung. Die Klimakrise wird unsere Wälder verändern und daher muss sich auch die Bewirtschaftung, unser Umgang und die Prioritäten ändern. Vielerorts müssen wir damit rechnen, dass etablierte labile Monokulturen zusammenbrechen. Diese Fläche wiederherzustellen – mit naturnahen Wäldern – wird ein Kraftakt. „Save the best and restore the rest“ könnte dabei ein gutes Motto für die Zukunft sein.

DI Martin Höbarth (Landwirtschaftskammer Österreich)

Für die Forstwirtschaft ist es eine große Herausforderung, dass die Politik von Kurzfristigkeit lebt. In der Forstwirtschaft betrachtet man nicht die nächsten 5 Jahre, sondern die nächsten 80–100 Jahre. Dies macht die politische Diskussion schwierig, wo man oft schnelle Lösungen sucht. Selbst wenn man jetzt die

Nutzung einstellt und Vorrat aufbaut – was passiert dann nach 30 Jahren? Langfristige Erfolge für die Menschheit sind nicht das Gleiche wie kurzfristige Erfolge für die Politik.

In der politischen Diskussion werden die Themen Klimaschutz und Kohlenstoffspeicherung mit Biodiversitätsschutz vermischt. Aber aus meiner Sicht muss eine optimale Klimaschutz- und Kohlenstoffspeicherungsleistung von Waldökosystemen nicht zwangsläufig das Beste für die Waldbiodiversität sein. Zudem haben wir mit der Waldbiodiversität kein großes Problem, vorausgesetzt wir betreiben entsprechendes Totholzmanagement im Wald.

Im Mittelpunkt stehen die Kohlenstoffkreisläufe. Hier sind fossiler und biogener Kohlenstoff nicht vergleichbar, weil fossiler Kohlenstoff eigentlich schon vor Jahrmillionen aus dem System ausgeschieden wurde. Wird dieser freigesetzt, ist er wieder zusätzlich und dauerhaft im System. Daher ist es aus meiner Sicht zentral, dass wir bereits im Kreislauf vorhandenen Kohlenstoff nutzen und den fossilen Kohlenstoff belassen, wo er ist, nämlich unschädlich in unterirdischen Endlagerstätten. Die Illusion, dass wir weiter fossilen Kohlenstoff emittieren und über die Sequestrierung im Wald kompensieren, geht sich nicht aus. Wir müssen in den biogenen Kreislauf kommen und diesen nutzen. Das ist in der politischen Diskussion noch nicht klar.

In der Diskussion ist die Assimilation von Kohlenstoff durch Photosynthese zentral. Die aktuelle Diskussion ist stark auf Speicherung, und viel zu wenig auf die CO₂-Aufnahme ausgerichtet. Was nützt uns der größte Kohlenstoffspeicher im Wald, wenn gleichzeitig keine Assimilation mehr stattfindet, weil z. B. der Bestand abstirbt. Dann gibt es vielleicht einen großen Speicher, aber wenig Assimilation. Daher müssen wir danach trachten, Waldökosysteme so zu bewirtschaften, dass eine möglichst dauerhafte große Assimilationsleistung gesichert ist. Wir müssen in der Forstwirtschaft danach trachten, mit gezielter Bewirtschaftung und Nutzung möglichst viel Zuwachs zu generieren. Das wäre ein maximaler Klimateffekt.

Betrachtet man das Ganze bis 2030, bringt der Speicher im Wald die größten Effekte. Aber im Gesamtbild, also inklusive Holzprodukte und substituierter Emissionen über eine Umtriebszeit hinweg sieht das Bild anders aus. Ein moderater Vorratsaufbau wäre die klimaschutzwirksamste Lösung. Das bedeutet, weniger Fokus auf die Kohlenstoffspeicherung im Wald, sondern vielmehr auf eine nachhaltige Waldbewirtschaftung mit Ankurbelung des Zuwachses, weiterhin moderatem Vorratsaufbau kombiniert mit artenspezifischem, gezielten Habitatmanagement und ausreichend Totholz.

Der Fokus auf einen kurzfristigen Vorratsaufbau ist eine gefährliche Betrachtung und eine Strategie, die nicht langfristig wirken kann. Wir müssen uns vielmehr überlegen, wie wir aus der fossilen Welt aussteigen, wenn wir den biogenen

Kohlenstoff nicht nutzen. Das kann sich etwa im energetischen Bereich niemals ausgehen. Das Allerwichtigste ist der Substitutionseffekt. Ich brauche Kreisläufe ohne fossilen Kohlenstoff. Da führt kein Weg an Holzprodukten vorbei. Aus meiner Sicht werden die Substitutionseffekte und vermiedenen Emissionen politisch unterschätzt und zu wenig berücksichtigt. Wenn man die Wirtschaft transformieren will, dann muss man weg von der verschwenderischen Lebensweise und raus aus den fossilen Energieträgern und hin zur Verwendung des biogenen Kohlenstoffes (= Holz) in allen Bereichen. Das sind langlebige und kurzlebige Holzprodukte inklusive der energetischen Verwertung von Holz.

DI Martin Donat (Landesumweltschutzwirtschaft OÖ)

Es ist eine Schlüsselfrage, wie man Klimaschutzziele bis auf das einzelne Verfahren runterdeklinieren kann. Dies betrifft etwa Klima- und Bodenschutz in den UVP-Verfahren. Hier gibt es derzeit nichts Verbindliches. Auch im Forststraßenbau können wir uns in Oberösterreich im Naturschutzverfahren nur die Trasse, nicht aber die indirekten Wirkungen durch die Erschließung in der Fläche und auch nicht die Summeneffekte auf das Waldökosystem ansehen. Der Naturschutz hat sich großteils aus dem Wald verabschiedet.

Aus meiner Sicht kann der Wald nur temporär zur Kohlenstoffspeicherung beitragen. Bis auf den Bodenaufbau ist der Kohlenstoffspeicher im Wald nicht von Dauer. Zusätzlich trägt der Wald aber zur Erhöhung der Transpiration bei und erzeugt so einen Kühlungseffekt. Wichtig ist, die Funktion des Waldes über die Kohlenstoffspeicherung hinaus zu sehen. Das können auch indirekte Effekte sein, wie etwa Erholungsangebote im Wald für klimafreundlichen Urlaub zu Hause.

DI Felix Montecuccoli (Land & Forstbetriebe Österreich)

In der Diskussion muss die Gesellschaft verstärkt in Kreisläufen denken. Der Wald als Kohlenstoffspeicher ist sehr statisch gedacht. Seit 250 Jahren wird (dauerhaft) gespeicherter fossiler Kohlenstoff in die Atmosphäre gepumpt. Der Kohlenstoffkreislauf ist in ständigem Austausch. Solange wir uns innerhalb dieses Kreislaufs bewegen, ist es aus meiner Sicht nachhaltig. Daher sollte unsere Zielsetzung nicht sein, möglichst viel im Wald zu speichern, sondern die komplette Umstellung des Wirtschaftssystems in Richtung Bioökonomie. Ohne das werden wir es auf lange Sicht nicht schaffen. Daher sollte sofort die Substitution im Vordergrund stehen, um den fossilen schnellstens durch biogenen Kohlenstoff zu ersetzen. Die Gesellschaft braucht Kohlenstoff als Roh- und Werkstoff. Hier gibt es keine Alternative zu Holz und dessen vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten.

Wenn wir den Wald zur Sequestrierung heranziehen, dann speichert dieser zwar Kohlenstoff, aber nicht genutzter Wald leistet keinen Beitrag zur

Umstellung auf Bioökonomie. Wenn wir hierzu eine nachhaltige Nutzung des Holzvorrates anstreben, dann ist eine maximale Speicherung im nicht genutzten Wald nicht mehr möglich und kann auch kein Ziel sein. In den Speicherszenarien für den Wald sind zu viele Hoffnungsvorgaben und Unsicherheiten. Vermutlich werden die Temperaturen höher liegen als erwartet. Das bedeutet auch neue Schadorganismen oder höhere Windstärken wie etwa der Tornado in Tschechien. Das hält kein Wald aus. Es muss daher das Ziel sein, möglichst viel Kohlenstoff in die Bioökonomie zu bringen und so den gebundenen Kohlenstoff im Gesamtsystem zu maximieren.

DI Felix Montecuccoli (Land & Forstbetriebe Österreich)

Der Klimawandel ist das bestimmende Thema bei den Waldbesitzern. Aber ein wichtiger Punkt ist in Österreich, dass der Großteil des Waldes Privatbesitz ist. Der Wald wird durch die vielen Kleinwaldbesitzer unglaublich divers bewirtschaftet. Dieses System hat viele Herausforderungen überstanden und ist sehr anpassungsfähig. Daher sind wir unglücklich über übergeordnete Initiativen, Diskussionen und Vorgaben. Wir denken, es wäre das Beste den Waldbesitzern die (wissenschaftlichen) Erkenntnisse zu vermitteln und ihnen Optionen aufzeigen. Der Waldbesitzer soll dann aber entscheiden, was er umsetzt und was nicht.

Die praktische Umsetzung der theoretischen Modelle erfolgt immer draußen am Standort. Mit unpassender Herkunft, Genetik oder Bewirtschaftungsweise geht es eben nicht. Im Klimawandel werden wir noch viele Überraschungen erleben. Aber über die Vielfalt an Besitzer:innen und Bewirtschaftungsformen bleibt das Gesamtsystem stabil. Sicher nicht optimiert auf die maximale Ernte, auch nicht optimiert auf eine andere Waldfunktion. Aber der Wald als solches wird sicher auf Dauer erhalten werden können.

Dr. Dominik Thom (TU München)

In der Debatte sollte nicht nur auf die Kohlenstoffspeicherung Bezug genommen werden, sondern auch weitere klimaregulierende Ökosystemleistungen, wie etwa die evaporative Kühlung oder der Albedoeffekt, einbezogen werden. Zwischen diesen Funktionen gibt es immer Trade-Offs und man sollte nicht leichtfertig nur eine Funktion optimieren. Man muss überlegen, welches Service man wo und wie für eine optimale Klimaregulierung optimieren könnte. Das geht über Kohlenstoff allein hinaus. Anders als von einer globalen Perspektive macht Dauerwald oder Altersklassenwald auf lokaler Ebene einen großen Unterschied. Dabei muss ein Naturwald nicht unbedingt besser sein als ein bewirtschafteter Wald.

DIⁱⁿ Maria Patek (Sektion III Forstwirtschaft und Nachhaltigkeit)

Der Wald spielt in Österreich eine große und wichtige Rolle. Der Klimawandel passiert rasend schnell, vielleicht zu schnell, um den Wald umzubauen. Zugleich benötigen wir auch Rohstoffe. Aus meiner Sicht wird die Debatte oft zu einseitig und mit zu wenig Weitblick geführt.

Natürlich kann der Wald einen wichtigen Beitrag in Bezug auf den Klimawandel leisten. Das umfasst aber nicht nur die Kohlenstoffspeicherung im Wald, sondern auch die kaskadische Nutzung des Holzes, die stoffliche und energetische Substitution. Der Wald soll alles schlucken, obwohl er selbst bereits stark unter dem Klimawandel leidet. Der Wald ist mit unzähligen Anforderungen konfrontiert. Wir wollen Natur und Biodiversität schützen, den Erholungsraum nutzen, eine funktionierende Schutzwaldfunktion, aber auch den Rohstoff Holz nutzen. Alles zugleich, in unregulierten Maßen, ist aber schwierig und führt zu einer massiven Überforderung des Waldökosystems.

Wir können es uns nicht leisten, diese nachwachsende Ressource nicht zu nutzen. Nehmen wir große Flächen aus der Nutzung, würde das Holz mit einer vielleicht höheren CO₂ Bilanz etwa importiert werden (müssen) und es stellt sich die Frage nach der Alternative. Es ist aus meiner Sicht sehr wichtig, dass man einen Ausgleich zwischen den verschiedenen Funktionen findet und nicht Waldwirkungen einseitig maximiert. Mit der florierenden Holz- und Sägeindustrie gibt es zudem auch eine wirtschaftliche Seite. Auch hier braucht es Lösungen. Die Holzindustrie macht sich bereits intensiv Gedanken, wie andere Sortimente abseits der Fichte genutzt werden können.

Es gibt viele Modellrechnungen und Szenarien. Man muss sich aber im Klaren sein, dass dies Annahmen über die Zukunft sind, die so eintreffen können oder auch nicht. Aber ich denke dennoch, dass wir mit der CareforParis Studie nachgewiesen haben, dass es gut ist, langfristig auf langlebige Holzprodukte zu setzen und durch eine nachhaltige Waldbewirtschaftung CO₂ zu binden. Wollen wir ernsthaft aus den fossilen Energieträgern aussteigen, müssen wir langlebige Produkte forcieren. Auch wenn Modellergebnisse besagen, dass wir durch einen Vorratsaufbau für die nächsten 30 Jahre Zeit gewinnen würden, ist das zu kurz gedacht. Hier verschärfen und verschieben wir nur die Problematik und nehmen Druck aus der politischen Diskussion.

Wir richten basierend auf diesen Erkenntnissen unsere Förderinstrumente wie etwa den Waldfonds aus, um hier mit rund 350 Millionen Euro einen Lenkungseffekt zu generieren. Wir befassen uns intensiv mit der Baumartenzusammensetzung der Zukunft und fördern Forschung zu klimafitten Wäldern, zu Provenienzen, und zu Baumarten der Zukunft. Wobei bei der raschen Erwärmung immer die Frage bleibt, ob uns die Situation nicht einfach überholt. Zugleich setzen wir einen bewussten Schwerpunkt auf langlebige

Holzprodukte – etwa mit Fördermöglichkeiten für mehrgeschossige, großvolumige Holzbauten oder Stiftungsprofessuren für Holzbau. Hier ist das gesamte Potenzial in Österreich noch gar nicht angekommen.

Dr. Peter Weiss (Umweltbundesamt)

Wir sind alle im ökologischen Sinne Konsumenten, aber Ressourcen sind limitiert. Daher gibt es die Notwendigkeit Biomasse zu nutzen. Solange wir nie mehr abschöpfen als nachwächst, funktioniert es auch als nachhaltiges System. Mit Holz können wir hier nichts falsch machen. Nadel- wie auch Laubholz wird eine zentrale Rolle spielen, weil es so viele Nutzungsmöglichkeiten gibt. Das wird in Zukunft noch weiter an Bedeutung gewinnen, vor allem, wenn man andere Rohstoffe nicht mehr oder weniger nutzen kann/soll. Es wird daher eine Verknappung geben. Gemäß der Studie zu Ressourcen- und Rohstoffeinsatz in Österreich sieht man, dass wir über unsere Verhältnisse leben. Wir verwenden nur rund 25 % Biomasse (und die ist teilweise importiert), mehr als 50 % sind nichtmetallische mineralische Rohstoffe wie Zement oder Ziegel, 18 % fossile Energieträger – all diese haben einen größeren Treibhausgas-Fußabdruck als vergleichbaren Holzabdruck. Mit diesem Fußabdruck ist ebenfalls offensichtlich, dass wir eine Transformation brauchen. Wir müssen die Lebensdauer der Produkte erhöhen, den Ressourcendurchsatz drastisch verringern, die Kreislaufwirtschaft erhöhen und auf nachwachsende Rohstoffe setzen. Hier muss es alternative Rohstoffe geben. Daher wird der Druck auf regionale Rohstoffe wie Holz steigen, wobei hier auch nur ein zum gesamten aktuellen Ressourcendurchsatz geringes zusätzliches Potenzial aus dem österreichischen Wald nachhaltig vorhanden ist. Die Ressourcenfrage ist auch eine maßgebliche Frage in der Klimaproblematik.

5.7 Potenzielle Gesprächspartner:innen und Expert:innen

- DI Maria Patek, Sektion III Forstwirtschaft und Nachhaltigkeit
- DI Felix Montecuccoli, Land & Forstbetriebe Österreich
- DI Martin Höbarth, Landwirtschaftskammer Österreich
- Mag. Karin Enzenhofer, WWF Österreich
- DI Christian Fraissl, Umweltdachverband
- Dr. Peter Weiss, Umweltbundesamt

10 LITERATURVERZEICHNIS

- Allen, C.D., Breshears, D.D., McDowell, N.G., 2015. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere* 6, art129. <https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1>
- Ammann, P., Junod, P., 2012. Inwiefern unterscheiden sich Plenterwald und Dauerwald? Fachstelle Waldbau (FWB) - Centre de compétence en sylviculture (CCS), Lyss.
- Amt der Tiroler Landesregierung, 2004. Empfohlene Ertragstabellen für Nord- und Osttirol. Innsbruck.
- Anderegg, W.R.L., Trugman, A.T., Badgley, G., Anderson, C.M., Bartuska, A., Ciais, P., Cullenward, D., Field, C.B., Freeman, J., Goetz, S.J., Hicke, J.A., Huntzinger, D., Jackson, R.B., Nickerson, J., Pacala, S., Randerson, J.T., 2020. Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests. *Science* 368, eaaz7005. <https://doi.org/10.1126/science.aaz7005>
- Bastin, J.-F., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., Zohner, C.M., Crowther, T.W., 2019. The global tree restoration potential. *Science* 365, 76–79. <https://doi.org/10.1126/science.aax0848>
- Bebi, P., Seidl, R., Motta, R., Fuhr, M., Firm, D., Krumm, F., Conedera, M., Ginzler, C., Wohlgemuth, T., Kulakowski, D., 2017. Changes of forest cover and disturbance regimes in the mountain forests of the Alps. *Forest Ecology and Management* 388, 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.028>
- Beudert, B., Leibl, F., 2020. Zur Klimarelevanz von Wirtschafts- und Naturschutzwäldern. *AFZ/Der Wald* 35–38.
- BfN, 2020. Wälder im Klimawandel: Steigerung von Anpassungsfähigkeit und Resilienz durch mehr Vielfalt und Heterogenität - Ein Positionspapier des BfN. Bundesamt für Naturschutz, Bonn Bad-Godesberg.
- BFW, 2020. BFW (2020a): Klimakrise managen: Ausblick für Wald und Holznutzung. BFW Praxisinformation Nr 51.
- B.F.W., 2018. Zwischenauswertung der Waldinventur 2016/18. BFW Praxisinformation Nr 50.
- BFW, 2015. Klimaschutz in der Forstwirtschaft - Zukünftige Bewirtschaftungsszenarien für den österreichischen Wald und deren Auswirkungen auf die Treibhausgasbilanz (Endbericht KLIEN). Bundesforschungszentrum für Wald, Wien.
- BFW, 2013. Wald im Fokus. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald Naturgefahren und Landschaft, Wien.
- BFW, B. für W.-, 2019. Infografik: Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald. Lichtung 34.
- Blöschl, G., Komma, J., Nester, T., Rogger, M., Salinas, J., Viglione, A., 2018. Die Wirkung des Waldes auf Hochwässer. *Wildbach- und Lawinenverbau* 88, 288–296.
- B.M.L.R.T., 2021. Grüner Bericht 2021 - Die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft (No. 62. Auflage). Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, Wien.
- B.M.L.R.T., 2020. Holzeinschlagsmeldung über das Kalenderjahr 2019. Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, Wien.
- B.M.N.T., 2018. Österreichische Waldstrategie 2020+. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien.
- Böhmer, S.G., M., K., Th, Pölz, W., 2014. Effiziente Nutzung von Holz: Kaskade versus Verbrennung. Umweltbundesamt Wien.
- Booth, M.S., Mackey, B., Young, V., 2020. It's time to stop pretending burning forest biomass is carbon neutral. *GCB Bioenergy* 12, 1036–1037. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12716>
- Braun, M., Schwarzbauer, P., Hesser, F., 2020. Kohlenstoffspeicherung durch Holzprodukte aus heimischem Einschlag. BFW Praxisinformation 12–16.
- Braun, M., Schwarzbauer, P., Stern, T., 2015. Klimaschutz durch den

- Aufbau eines Harvested Wood Product Pools: Von der Berechnung von THG-Emissionseinsparungen bis zur Steuerung der Speicherwirkung durch Harvested Wood Products (Endbericht). Universität für Bodenkultur, Wien.
- Braun, M., Winner, G., Schwarzbauer, P., T, S., 2016. Apparent Half-Life-Dynamics of Harvested Wood Products (HWPs) in Austria: Development and analysis of weighted time-series for 2002 to 2011. *Forest Policy and Economics* 63, 28–34.
- Brienen, R.J.W., Caldwell, L., Duchesne, L., Voelker, S., Barichivich, J., Baliva, M., Ceccantini, G., Di Filippo, A., Helama, S., Locosselli, G.M., Lopez, L., Piovesan, G., Schöngart, J., Villalba, R., Gloor, E., 2020. Forest carbon sink neutralized by pervasive growth-lifespan trade-offs. *Nat Commun* 11, 4241. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17966-z>
- Bütler, R., Lachat, T., Krumm, F., Kraus, D., Larrieu, L., 2020. Taschenführer der Baummikrohabitate – Beschreibung und Schwellenwerte für Felddaufnahmen. Eidg, Birmensdorf.
- Čada, V., Morrissey, R.C., Michalová, Z., Bače, R., Janda, P., Svoboda, M., 2016. Frequent severe natural disturbances and non-equilibrium landscape dynamics shaped the mountain spruce forest in central Europe. *Forest Ecology and Management* 363, 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.12.023>
- Eckhart, T., Hasenauer, H., 2019. Das Wachstumspotenzial der Douglasie. *Der Waldbauer*.
- Eckmüllner, O., 2003. Der unterschätzte Zuwachs - stimmen unsere Ertragsstafeln? *Österreichische Forstzeitung* Heft 6, 16–17.
- Ellenberg, H., Mayer, R., Schaueremann, J. (Eds.), 1986. Ökosystemforschung: Ergebnisse des Sollingprojekts 1966-1986. E. Ulmer, Stuttgart.
- Ellison, D., Morris, C.E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarsso, D., Gutierrez, V., Noordwijk, M. van, Creed, I.F., Pokorny, J., Gaveau, D., Spracklen, D.V., Tobella, A.B., Ilstedt, U., Teuling, A.J., Gebrehiwot, S.G., Sands, D.C., Muys, B., Verbist, B., Springgay, E., Sugandi, Y., Sullivan, C.A., 2017. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change* 43, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>
- Englisch, M., 2021. Die Douglasie - Für und Wider aus standortkundlicher Sicht.
- Englisch, M., Starlinger, F., 2021. "Gastbaumart" oder "invasive gebietsfremde Art" - ein Spannungsfeld. BFW.
- Enzenhofer, K., 2021. Alt- und Totholz in der Praxis. Erkenntnisse aus einem Forschungsprojekt. WWF Österreich, Wien.
- Enzenhofer, K., Schrank, J., 2019. Alt- und Totholzverbundsysteme. Eine Literaturstudie zur Schaffung von naturschutzfachlichen Grundlagen. WWF Österreich, Wien.
- Erb, K.-H., 2004. Land use?related Changes in Aboveground Carbon Stocks of Austria?s Terrestrial Ecosystems. *Ecosystems* 7. <https://doi.org/10.1007/s10021-004-0234-4>
- Erb, K.-H., Kastner, T., Plutzer, C., Bais, A.L.S., Carvalhais, N., Fetzl, T., Gingrich, S., Haberl, H., Lauk, C., Nierdscheider, M., Pongratz, J., Thurner, M., Luyssaert, S., 2018. Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. *Nature* 553, 73–76. <https://doi.org/10.1038/nature25138>
- Europäische Kommission, 2021. Neue EU-Waldstrategie für 2030 - MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN (No. COM(2021) 572 final). Brüssel.
- European Commission. Joint Research Centre., 2020. Vulnerability of European forests to natural disturbances: JRC PESETA IV project : Task 12. Publications Office, LU.
- Federici, S., Lee, D., Herold, M., 2017. Forest Mitigation: A Permanent Contribution to the Paris Agreement? (No. Working Paper).
- Förster, H., Gores, S., Nissen, C., Siemons, A., Renders, N., Dael, S., Sporer, M., Tomescu, M., 2020. EEA Report No 13/2020.

- Fragnière, Y., Sonnenwyl, V., Clément, B., Kozłowski, G., 2021. Large-scale historical afforestation failure with *Pinus cembra* in the Swiss Prealps. *New Forests*. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09871-0>
- Franklin, J.F., Spies, T.A., Pelt, R.V., Carey, A.B., Thornburgh, D.A., Berg, D.R., Lindenmayer, D.B., Harmon, M.E., Keeton, W.S., Shaw, D.C., Bible, K., Chen, J., 2002. Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example. *Forest Ecology and Management* 155, 399–423. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00575-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00575-8)
- Freeman, C., Ostle, N., Kang, H., 2001. An enzymic “latch” on a global carbon store. *Nature* 409, 149–149. <https://doi.org/10.1038/35051650>
- Fritz, D., Pölz, W., 2019. Bilanzierung von vermiedenen Emissionen.
- Fritz, Ö., Niklasson, M., Churski, M., 2009. Tree age is a key factor for the conservation of epiphytic lichens and bryophytes in beech forests. *Applied Vegetation Science* 12, 93–106. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2009.01007.x>
- Gehring, E., Conedera, M., Maringer, J., Giadrossich, F., Guastini, E., Schwarz, M., 2019. Shallow landslide disposition in burnt European beech (*Fagus sylvatica* L.) forests. *Sci Rep* 9, 8638. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45073-7>
- Geils, B.W., Vogler, D.R., 2011. A natural history of *Cronartium ribicola*, in: *The Future of High-Elevation, Five-Needle White Pines in Western North America*. Proceedings of the High Five Symposium. 28-30 June 2010; Missoula, MT. Proceedings RMRS-P-63. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, pp. 210–217.
- Getzner, M., 2018. Werte der Natur“ – Holz, Tourismus, erneuerbare Energien, Ruhe, Kohlenstoffspeicherung. Bericht zur zweiten Tranche des Projektes „Werte der Natur“, E.C.O. Insti-tut für Ökologie. und Technische Universität Wien, Klagenfurt.
- Getzner, M., Gutheil-Knopp-Kirchwald, G., Huber, M., Jungmeier, M., Kirchmeir, H., Kreimer, E., Zak, D., 2016. Bewertung der Ökosystemleistungen der Österreichischen Bundesforste (ÖBf) “Werte der Natur” Wasserversorgung, Erosionsschutz, Lokale Klimaregulation, Erholungsleistung, Biologische Vielfalt. Studie im Auftrag von: Österreichischen Bundesforste (ÖbF) AG, 136.
- Glade, T., Mergili, M., Sattler, K. (Eds.), 2020. ExtremA 2019: aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. V&R unipress, Göttingen.
- Grabherr, G., Koch, G., Kirchmeir, H., Reiter, K., 1998. Hemerobie österreichischer Waldökosysteme. Veröff. d. Österreichischen MaB-Programms Band 17, 493.
- Grassi, G., House, J., Dentener, F., Federici, S., den Elzen, M., Penman, J., 2017. The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation. *Nature Clim Change* 7, 220–226. <https://doi.org/10.1038/nclimate3227>
- Grüneberg, E., Stümer, W., 2014. Kyoto und der Wald: Wälder in Deutschland speichern mehr Kohlenstoff als vor 20 Jahren. *Wissenschaft erleben* 2014, 10–11.
- Gschwantner, T., 2019. Holzvorrat auf neuem Höchststand. BFW Praxisinformation Nr 50, 8–12.
- Haberl, H., 2017. Die Kohlenstoffbilanz der Bioenergienutzung: aktuelle Probleme und Überlegungen.
- Hanewinkel, M., Albrecht, A., Schmidt, M., 2015. Können Windwurfschäden vermindert werden? Eine Analyse von Einflussgrößen. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 166, 118–128. <https://doi.org/10.3188/szf.2015.0118>
- Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Beerling, D., Berner, R., Masson-Delmotte, V., Pagani, M., M., R., Royer, D.L., Zachos, J.C., 2008. Target Atmospheric CO₂: Where Should Humanity Aim? *The Open Atmospheric Science Journal* 217–231.
- Harmon, M.E., 2019. Have product substitution carbon benefits been overestimated? A sensitivity analysis of key assumptions. *Environ. Res. Lett.* 14, 065008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1e95>
- Hasenauer, H., 2014. Kohlenstoffkreisläufe in Waldökosystemen.

- Broschüre "Nachhaltiger Klimaschutz" des ÖBMV 1–5.
- Heede, R., Oreskes, N., 2016. Potential emissions of CO₂ and methane from proved reserves of fossil fuels: An alternative analysis. *Global Environmental Change* 36, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.10.005>
- Hoch, G., Cech, T., L., Perny, B., 2016. Die Profiteure vom Wald ohne Wasser: Warum Trockenheit Borkenkäfer, Triebsterbenspilze und andere Schadorganismen begünstigt. *Praxisinformationen* Nr. 40-2016, 9–11.
- Hoch, G., Perny, B., 2019. Die anhaltende Borkenkäfer-Kalamität in Österreich. *BFW Praxisinformation* 49, 18–21.
- Hoch, G., Putz, J., Krehan, H., 2017. Forstlicher Pflanzenschutz im globalen Wandel. *BFW-Praxisinformation* 44, 10–13.
- Höllerl, S., Bork, J., 2013. Die Kohlenstoffspeicherung von bewirtschafteten und unbewirtschafteten Fichtenbeständen unter Berücksichtigung von Ausfallrisiken - Aussagen nicht nur über Bestände der montanen Zone. *Forstarchiv* 52–64. <https://doi.org/10.4432/0300-4112-84-52>
- Holzer, P., Hammer, R., 2016. Analyse aktueller Studien der Forstwirtschaft. Systematisch vergleichende Analyse vier aktueller wissenschaftlicher Publikationen zur Umweltrelevanz österr. Holzproduktion und -nutzung - Schlussbericht. *Institute of Building Research and Innovation*, Wien.
- Ibisch, P., Welle, T., Blumröder, J.S., Sommer, J., 2020. Wälder sind Kohlenstoffspeicher - Holzverbrennung ist nicht klimaneutral. Hintergrundpapier anlässlich des Filmbeitrags "Klimaschutz auf dem Holzweg - Wird unser Wald verheizt? (ZDF).
- Ibisch, P.L., Molitor, H., Conrad, A., Walk, H., Mihotovic, v., Geyer, J., 2019. *Humans in the Global Ecosystem. AN Introduction to Sustainable Development.* oekom Verlag, Gesellschaft für ökologische Kommunikation mbH.
- IPCC, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, UK.
- IPCC, 2014. *2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol.* IPCC, Switzerland.
- IPCC (Ed.), 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge ; New York.
- Irauschek, F., Rammer, W., Lexer, M.J., 2017. Can current management maintain forest landscape multifunctionality in the Eastern Alps in Austria under climate change? *Reg Environ Change* 17, 33–48. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0908-9>
- Jacob, M., Bade, C., Calvete, H., Dittrich, S., Leuschner, C., Hauck, M., 2013. Significance of Over-Mature and Decaying Trees for Carbon Stocks in a Central European Natural Spruce Forest. *Ecosystems* 16, 336–346. <https://doi.org/10.1007/s10021-012-9617-0>
- Jandl, Robert, Bauhus, J., Bolte, A., Schindlbacher, A., Schüler, S., 2015. Effect of Climate-Adapted Forest Management on Carbon Pools and Greenhouse Gas Emissions. *Curr Forestry Rep* 1, 1–7. <https://doi.org/10.1007/s40725-015-0006-8>
- Jandl, R., Englisch, T., Gartner, K., Schindlbacher, A., 2017. Auf welchen Standorten kommt der Wald unter Druck? *BFW Praxisinformation* 44, 7–9.
- Jandl, R., Leitgeb, E., Schadauer, K., Freudenschuss, A., 2015. *Internationales Boden-Reporting.* BFW Praxisinformationen.
- Jasser, C., 2017. Der Klimawandel: Konsequenzen für die Waldbewirtschaftung aus regionaler Sicht. *BFW Praxisinformation* 44, 29–34.
- Keenan, T.F., Gray, J., Friedl, M.A., Toomey, M., Bohrer, G., Hollinger, D.Y., Munger, J.W., O'Keefe, J., Schmid, H.P., Wing, I.S., Yang, B., Richardson, A.D., 2014. Net carbon uptake has increased through warming-induced changes in temperate forest phenology. *Nature Clim Change* 4, 598–604. <https://doi.org/10.1038/nclimate2253>

- Keenan, T.F., Williams, C.A., 2018. The Terrestrial Carbon Sink. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 43, 219–243. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030204>
- Khandekar, M.L., Murty, T.S., Chittibabu, P., 2005. The Global Warming Debate: A Review of the State of Science. *Pure appl. geophys.* 162, 1557–1586. <https://doi.org/10.1007/s00024-005-2683-x>
- Kienast, F., Wildi, O., Brzeziecki, B., Zimmermann, N., Lemm, R., 1998. Klimaänderung und mögliche langfristige Auswirkungen auf die Vegetation der Schweiz. *Schlussbericht NFP 31*, Zürich, 72.
- Kirchmeir, H., Huber, M., Berger, V., Wuttej, D., Grigull, M., 2020. Wald in der Krise - Erster unabhängiger Waldbericht für Österreich 2020. WWF Österreich, Wien.
- Kirchmeir, H., Koch, G., Grabherr, G., 1999. Die Naturnähe der Kärntner Wälder unter spezieller Berücksichtigung der aktuellen und potentiellen natürlichen Baumartenkombination. *Carinthia II Jg.* 189/109 Teil 2, 515–531.
- Kleinszig, G., 2017. Forstrevier Wolschart: Klimawandel aus der Sicht eines Waldbewirtschafters. *BFW Praxisinformation* 44, 31–34.
- Knapp, D.H., Siegfried, K., L. Fähser, 2021. Der Holzweg: Wald im Widerstreit der Interessen. Succow Stiftung; Oekom Verlag, Greifswald: München.
- Koch, G., Kirchmeir, H., Grabherr, G., 1999. Naturnähe im Wald. Methodik und praktische Bedeutung des Hemerobiekonzeptes für die Bewertung von Waldökosystemen. Österreichischer Forstverein, Wien.
- Körner, C., 2020. Biodiversität, Kohlenstoffkreislauf und Klimawirkungen sind im Wald eng verknüpft. *WSL Berichte* 65–70.
- Körner, C., Bader, M., 2010. Der Wald in einer CO₂-reichen Welt: Synthese des 8-jährigen CO₂-Anreicherungs experimentes in einem Laubmischwald beim schweizerischen Forschungskran in Hofstetten (SO) in der Nordwestschweiz. Lehrmittelverl. Kanton Solothurn, Solothurn.
- Kownatzki, D., Kriebitzsch, W.-U., Bolte, A., Liesebach, H., Schmitt, U., Elsasser, P., Johann Heinrich von Thünen-Institut (Eds.), 2011. Zum Douglasienanbau in Deutschland: ökologische, waldbauliche, genetische und holzbiologische Gesichtspunkte des Douglasienanbaus in Deutschland und den angrenzenden Staaten aus naturwissenschaftlicher und gesellschaftspolitischer Sicht, Landbauforschung Sonderheft. Johann Heinrich von Thünen-Inst, Braunschweig.
- Kromp-Kolb, H., Nakicenovic, N., Steininger, K., Gobiet, A., Formayer, H., Köppl, A., Prettenhaler, F., Stötter, J., Schneider, J. (Eds.), 2014. Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien. <https://doi.org/10.1553/aar14>
- Krug, J., Köhl, M., 2010. Bedeutung der deutschen Forstwirtschaft in der Klimapolitik. *AFZ/Der Wald* 17, 30–33.
- Krüger, I., Schulz, C., Borken, W., 2012. Totholz als Kohlenstoffsенke - Ein Vergleich von bewirtschafteten und unbewirtschafteten Wäldern. *LWF aktuell* 87, 24–26.
- Krumm, F., Vitkova, L., 2016. Introduced tree species in European forests: opportunities and challenges. (In-Tree policy brief). European Forest Institute.
- Kühmaier, M., Kanzian, C., Kral, I., Gruber, P., Eckert, D., Huber, C., 2019. Ökobilanzierung der Holzbereitstellung bis zum Werk unter Einbeziehung neuer Technologien (Endbericht zur Projektstudie im Auftrag von Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, ÖBf AG und Forstbetrieb Franz Mayr-Melnhof- Saurau). Universität für Bodenkultur, Wien.
- Lachat, T., Brang, P., Bolliger, M., Bollmann, K., Brändli, U.-B., Bütler, R., Herrmann, S., Schneider, O., Wermelinger, B., 2019. Totholz im Wald: Entstehung, Bedeutung und Förderung. Merkblatt für die Praxis 52.
- Langner, A., Irauschek, F., Perez, S., Pardos, M., Zlatanov, T., Öhman, K., Nordström, E.-M., Lexer, M., 2017. Value-based ecosystem service trade-offs in multi-objective management in European mountain forests. *Ecosystem Services* 26, 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.03.001>
- Lee, C.-T.A., Jiang, H., Dasgupta, R., Torres, M., 2019. A Framework for

- Understanding Whole-Earth Carbon Cycling, in: Orcutt, B.N., Daniel, I., Dasgupta, R. (Eds.), *Deep Carbon*. Cambridge University Press, pp. 313–357. <https://doi.org/10.1017/9781108677950.011>
- Lexner, M.J., Seidl, R., 2007. Der österreichische Wald im Klimawandel – Auswirkungen auf die Waldbewirtschaftung. Ländlicher Raum. Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft.
- Linser, S. (Ed.), 2017. ÖWAD-Indikatoren-Set für nachhaltige Waldbewirtschaftung mit Ist- und Soll-Größen und einer englischen Kurzfassung. Erarbeitet im Rahmen des Österreichischen Walddialogs, in: BOKU Wien im Auftrag des BMLFUW. Angenommen vom Österreichischen Waldforum am 16. Mai.
- LKÖ, 2021. Preisentwicklung am Holzmarkt für Fichte und Tanne Oktober 2021. Landwirtschaftskammer Österreich, Wien.
- Loudermilk, E.L., Scheller, R.M., Weisberg, P.J., Yang, J., Dilts, T.E., Karam, S.L., Skinner, C., 2013. Carbon dynamics in the future forest: the importance of long-term successional legacy and climate-fire interactions. *Glob Change Biol* n/a-n/a. <https://doi.org/10.1111/gcb.12310>
- Luyssaert, S., Schulze, E.-D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B.E., Ciais, P., Grace, J., 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455, 213–215. <https://doi.org/10.1038/nature07276>
- Mages, H., 2017. Waldbau mit der Fichte in Zeiten des Klimawandels. 11. Bayerischer Waldbesitzertag.
- Magnússon, R.Í., Tietema, A., Cornelissen, J.H.C., Hefting, M.M., Kalbitz, K., 2016. Tamm Review: Sequestration of carbon from coarse woody debris in forest soils. *Forest Ecology and Management* 377, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.033>
- Mantau, U., Bilitewski, B., 2010. Stoffstrom-Modell-Holz. Bestimmung des Aufkommens, der Verwendung und des Verbleibs von Holzprodukten (Forschungsbericht für den Verband Deutscher Papierfabriken e. V. (VDP)). Celle.
- Marangon, D., Pilotti, M., Zancanaro, F., Costa, M., Lingua, E., 2021. Is deadwood helping regeneration? Natural regeneration dynamics in a stand replacing windthrow area. (other). *pico*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-14348>
- Markart, G., Klebinder, K., Kohl, B., Meissl, G., Perzl, F., Zeidler, A., Zieher, T., 2017. Klimawandel und Naturgefahren. BFW Praxisinformationen 44, 35–38.
- Matthews, R., Sokka, L., Soimakallio, S., Mortimer, N., Rix, J., Schelhaas, M.-J., Jenkins, T., Hogan, G., Mackie, E., Morris, A., Randle, T., 2014. Review of literature on biogenic carbon and life cycle assessment of forest bioenergy - Final Task 1 report, DG ENER project, 'Carbon impacts of biomass consumed in the EU.' Forest Research, Farnham, U.K.
- Niedermair, M., Lexner, M.J., Plattner, G., Formayer, Seidl, R., 2007. Klimawandel & Artenvielfalt - Wie klimafit sind Österreichs Wälder, Flüsse und Alpenlandschaften? (Endbericht). WWF & Österreichische Bundesforste AG - Kompetenzfeld Natur- und Umweltschutz, Wien.
- Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Bentsen, N.S., Larsen, J.B., 2019. Ecosystem carbon stocks and their temporal resilience in a semi-natural beech-dominated forest. *Forest Ecology and Management* 447, 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.038>
- Nunery, J.S., Keeton, W.S., 2010. Forest carbon storage in the northeastern United States: Net effects of harvesting frequency, post-harvest retention, and wood products. *Forest Ecology and Management* 259, 1363–1375. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.12.029>
- Ols, C., Bontemps, J.-D., Gschwantner, T., 2019. Nadelbäume – wie reagiert das Wachstum auf die Klimaerwärmung? BFW Praxisinformation 50, 30–34.
- Ontl, T.A., Janowiak, M.K., Swanston, C.W., Daley, J., Handler, S., Cornett, M., Hagenbuch, S., Handrick, C., McCarthy, L., Patch, N., 2020. Forest Management for Carbon Sequestration and

- Climate Adaptation. *Journal of Forestry* 118, 86–101. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvz062>
- Österreichische Energieagentur, 2021. Holzströme in Österreich 2019. erstellt im Auftrag des BMK.
- Österreichischer Biomasse-Verband, 2017. Basisdaten 2017 Bioenergie Österreich. Wien.
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, A.D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., Hayes, D., 2011. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science* 333, 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Pluess, A.R., Augustin, S., Brang, P., Schweiz, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (Eds.), 2016. Wald im Klimawandel: Grundlagen für Adaptationsstrategien, 1. Auflage. ed. Haupt Verlag, Bern.
- Pohjanmies, T., Eyvindson, K., Triviño, M., Bengtsson, J., Mönkkönen, M., 2021. Forest multifunctionality is not resilient to intensive forestry. *Eur J Forest Res* 140, 537–549. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01348-7>
- Pretzsch, H., Biber, P., Schütze, G., Uhl, E., Rötzer, T., 2014. Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nat Commun* 5, 4967. <https://doi.org/10.1038/ncomms5967>
- Quaschnig, V., 2019. Regenerative Energiesysteme, 10. ed. Hanser Verlag, München.
- Riedel, T., Stümer, W., Hennig, P., Dunger, K., Bolte, A., 2019. Wälder in Deutschland sind eine wichtige Kohlenstoffsенке. *AFZ-Der Wald* 14, 14–18.
- Röder, H., 2017. Holzvorräte je Hektar in Bayern und Weltweit.
- Roques, A., Auger-Rozenberg, M.-A., Boivin, S., 2006. A lack of native congeners may limit colonization of introduced conifers by indigenous insects in Europe. *Canadian Journal of Forest Research* 36, 299–313.
- Ruhm, W., 2017. Waldbauliche Möglichkeiten in Zeiten des Klimawandels. *BFW Praxisinformation* 44, 14–18.
- Russ, W., 2019. Mehr als 4 Millionen Hektar Wald in Österreich. BFW (2019): Zwischenauswertung der Waldinventur 2016/18. BFW Praxisinformation 3–8.
- Rüter, S., 2016. Der Beitrag der stofflichen Nutzung von Holz zum Klimaschutz – Das Modell WoodCarbonMonitor. TU München, Weihenstephan.
- Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J., Schuck, A., 2003. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology* 9, 1620–1633.
- Scherzinger, W., 1996. Naturschutz im Wald. Qualitätsziele einer dynamischen Waldentwicklung. Eugen Ulmer GmbH & Co.
- Schindlbacher, A., Rodler, A.S., Kuffner, M., Kitzler, B., Sessitsch, A., Zechmeister-Boltenstern, S., 2011. Experimental warming effects on the microbial community of a temperate mountain forest soil. *Soil biology & biochemistry* 43, 1417–1425. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.03.005>
- Schmalzl, L., Weiß, P., 2020. Waldschadensanalyse in der KLAR! – Region Südkärnten - Fernerkundung und GIS-basierter Ansatz zur Erhebung und Klassifizierung von Waldveränderungen, die durch Sturmschäden, Rodungen und den Borkenkäfer zwischen.
- Schröder, T. (Ed.), 2010. World Ocean Review 2010 - Mit Meeren leben, World ocean review. Maribus gGmbH, Hamburg.
- Schuldt, B., Buras, A., Arend, M., Vitasse, Y., Beierkuhnlein, C., Damm, A., Gharun, M., Grams, T.E.E., Hauck, M., Hajek, P., Hartmann, H., Hiltbrunner, E., Hoch, G., Holloway-Phillips, M., Körner, C., Larysch, E., Lübke, T., Nelson, D.B., Rammig, A., Rigling, A., Rose, L., Ruehr, N.K., Schumann, K., Weiser, F., Werner, C., Wohlgemuth, T., Zang, C.S., Kahmen, A., 2020. A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests. *Basic and Applied Ecology* 45, 86–103. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.04.003>

- Schüler, S., George, J.P., Grabner, M., 2017. Trockenstress im Wald: Unterschiede zwischen Baumarten und Herkünften. BFW Praxisinformation 44, 23–26.
- Schwarzl, B., Aubrecht, P., 2004. Wald in Schutzgebieten - Kategorisierung von Waldflächen in Österreich anhand der Kriterien der Ministerkonferenz zum Schutz der Wälder in Europa (MCPFE). UBA Monographien M-165. Umweltbundsamt, Wien.
- Searchinger, T.D., Beringer, T., Holtsmark, B., Kammen, D.M., Lambin, E.F., Lucht, W., Raven, P., van Ypersele, J.-P., 2018. Europe's renewable energy directive poised to harm global forests. *Nat Commun* 9, 3741. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06175-4>
- Seedre, M., Taylor, A.R., Brassard, B.W., Chen, H.Y.H., Jöggiste, K., 2014. Recovery of Ecosystem Carbon Stocks in Young Boreal Forests: A Comparison of Harvesting and Wildfire Disturbance. *Ecosystems* 17, 851–863. <https://doi.org/10.1007/s10021-014-9763-7>
- Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Lindner, M., Lexer, 2009. M.J.(2009): Modelling bark beetle disturbances in a large-scale forest scenario model to assess climate change impacts and evaluate adaptive management strategies. *Reg Environ Change* 9, 101–119.
- Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Rammer, W., Verkerk, P.J., 2014. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Clim Change* 4, 806–810. <https://doi.org/10.1038/nclimate2318>
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M.J., Trotsiuk, V., Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T.A., Reyser, C.P.O., 2017. Forest disturbances under climate change. *Nature Clim Change* 7, 395–402. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>
- Senitza, E., 2017. Stabiler Dauerwald - Betriebswirtschaftlich erfolgreich - Erfahrungen aus Österreich.
- Sitch, S., Huntingford, C., Gedney, N., Levy, P.E., Lomas, M., Piao, S.L., Betts, R., Ciais, P., Cox, P., Friedlingstein, P., Jones, C.D., Prentice, I.C., Woodward, F.I., 2008. Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs): UNCERTAINTY IN LAND CARBON CYCLE FEEDBACKS. *Global Change Biology* 14, 2015–2039. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01626.x>
- Steyrer, G., Cech, T.L., Fürst, A., Hoch, G., Perny, B., 2020. Waldschuttsituation 2019 in Österreich: Schäden durch Borkenkäfer weiter extrem hoch. *Forstschutz Aktuell* 64, 33–44.
- Strimitzer, L., Höher, M., Nemestothy, K., 2017. Holzströme in Österreich. Holzflussdiagramm. Ausgabe.
- Suzuki, S.N., Tsunoda, T., Nishimura, N., Morimoto, J., Suzuki, J.-I., 2019. Dead wood offsets the reduced live wood carbon stock in forests over 50 years after a stand-replacing wind disturbance. *Forest Ecology and Management* 432, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.054>
- Taylor, S.D., Marconi, S., 2019. Rethinking global carbon storage potential of trees. A comment on Bastin et al. 2019 (preprint). *Ecology*. <https://doi.org/10.1101/730325>
- Thom, D., Golivets, M., Edling, L., Meigs, G.W., Gourevitch, J.D., Sonter, L.J., Galford, G.L., Keeton, W.S., 2019. The climate sensitivity of carbon, timber, and species richness covaries with forest age in boreal–temperate North America. *Glob Change Biol* 25, 2446–2458. <https://doi.org/10.1111/gcb.14656>
- Thom, D., Rammer, W., Garstenauer, R., Seidl, R., 2018. Disturbance legacies have a stronger effect on future carbon exchange than climate in a temperate forest landscape (preprint). *Earth System Science/Response to Global Change: Climate Change*. <https://doi.org/10.5194/bg-2018-145>
- Thom, D., Rammer, W., Seidl, R., 2017. The impact of future forest dynamics on climate: interactive effects of changing vegetation and disturbance regimes. *Ecological Monographs* 87, 665–684. <https://doi.org/10.1002/ecm.1272>
- Thrippleton, T., Lüscher, F., Bugmann, H., 2020. Climate change

- impacts across a large forest enterprise in the Northern Pre-Alps: dynamic forest modelling as a tool for decision support. *Eur J Forest Res* 139, 483–498. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01263-x>
- Turner, M., Beer, C., Crowther, T., Falster, D., Manzoni, S., Prokushkin, A., Schulze, E., 2019. Sapwood biomass carbon in northern boreal and temperate forests. *Global Ecol Biogeogr* 28, 640–660. <https://doi.org/10.1111/geb.12883>
- UBA, 2020. Klimaschutzbericht 2020 (No. REP-0738), UBA Report.
- Umweltbundesamt, (Hrsg.), 2021. Klimaschutzbericht 2021. Umweltbundesamt GmbH, Wien.
- Valentini, R., Matteucci, G., Dolman, A.J., 2000. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature* 404, 861–865.
- Walter, H., Breckle, S.W., 1999. Vegetation und Klimazonen der Erde. 7. Auflage. Ulmer.
- Weiss, P., Braschel, N., Braun, M., Büchsenmeister, R., Freudenschuss, A., Fritz, D., Gschwantner, T., Jandl, R., Ledermann, T., Neumann, M., Pölz, W., Schadauer, K., Schmid, C., Schwarzbauer, P., Stern, T., 2015. Einleitung zu drei KLIEN-Projekten zur Treibhausgasbilanz der österreichischen Holzkette. BFW Praxisinformation 38, 3–5.
- Weiss, P., Braun, M., Fritz, D., Gschwantner, T., Hesser, F., Jandl, R., Kindermann, G., Koller, T., Ledermann, T., Ludvig, A., Pölz, W., Schadauer, K., Schmid, B.F., Schmid, C., Schwarzbauer, P., Weiss, G., 2020a. Zusammenschau der Treibhausgasergebnisse des waldbasierten Sektors für verschiedene CareforParis Szenarien. BFW Praxisinformation 51, 20–24.
- Weiss, P., Braun, M., Fritz, D., Gschwantner, T., Hesser, F., Jandl, R., Kindermann, G., Koller, T., Ledermann, T., Ludvig, A., Pölz, W., Schadauer, K., Schmid, C., Schwarzbauer, P., Weiss, G., 2020b. Endbericht zum Projekt CareforParis. Umweltbundesamt, Klima- und Energiefonds, Wien.
- Weiss, P., Schieler, K., Schadauer, K., Radunsky, K., Englisch, M., 2000. Die Kohlenstoffbilanz des österreichischen Waldes und Betrachtungen zum Kyoto Protokoll.
- Wermelinger, B., Jakoby, O., 2019. Borkenkäfer, in: Störungsökologie, UTB. Haupt Verlag, Bern, pp. 236–255.
- Wermelinger, B., Seifert, M., 1998. Analysis of the temperature dependent development of the spruce bark beetle *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae). 122. *J. Appl. Entomol.* 122, 185–191.
- Werscheck, M. (Ed.), 2004. Klimastatusbericht 2003, Stand April 2004. ed, Klimastatusbericht. Dt. Wetterdienst, Offenbach am Main.
- Wieshaider, A., 2017. Waldbewirtschaftung im Klimawandel. BFW Praxisinformation 44, 27–30.
- Wohlgemuth, T., Kistler, M., Aymon, C., Hagedorn, F., Gessler, A., Gossner, M.M., Queloz, V., Vöggtli, I., Wasem, U., Vitasse, Y., Rigling, A., 2020. Früher Laubfall der Buche während der Sommertrockenheit 2018: Resistenz oder Schwächesymptom? *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 171, 257–269. <https://doi.org/10.3188/szf.2020.0257>
- Wördehoff, R., Spellmann, H., Evers, J., Nagel, J., 2011. Kohlenstoffstudie Forst und Holz Niedersachsen. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt Band 6. Universitätsverlag Göttingen 104.
- ZAMG, 2021. Klimafakten Österreich kompakt. (online unter www.zamg.ac.at).
- ZAMG, 2015. ÖKS 15 – Klimaszenarien für Österreich | Daten – Methoden - Klimaanalyse (Endbericht). Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.
- ZAMG, o.J. Stürme. Informationsportal Klimawandel.

11 ANNEX: LISTE DER INTERVIEWPARTNER:INNEN

Tabelle 7: Liste der Gesprächspartner:innen (in alphabetischer Reihenfolge)

Person	Position	Organisation/Institution
DI Martin Donat	Umweltanwalt	Oö. Umweltanwaltschaft
Mag. Karin Enzenhofer	Programm für Arten und Lebensräume	WWF Österreich
DI Christian Fraissl	Projektleitung Wald & Biodiversität	Umweltdachverband
Dr. Rudolf Freidhager	Vorstand	Österreichische Bundesforste AG
DI Martin Höbarth	Abteilungsleitung Forst	Landwirtschaftskammer Österreich
Dr. Robert Jandl	Fachbereichsleitung Klima-Forschungskoordination	BFW
DI Felix Montecuccoli	Vorstand	Land & Forstbetriebe Österreich
Dr. Mathias Neumann	Senior Scientist, Institut für Waldbau	Universität für Bodenkultur
DI Maria Patek	Leitung Sektion III - Forstwirtschaft und Nachhaltigkeit	Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus
Dr. Dominik Thom	Senior Scientist, Lehrstuhl Ökosystemdynamik und Waldmanagement in Gebirgslandschaften	TU München
Dr. Peter Weiss	Klimaschutz & Emissionsinventare	Umweltbundesamt